

**Ilmanpuhdistimet radioaktiivisia
aineita sisältävien
aerosolihiukkasten kerääjinä
säteilyvaaratilanteissa**

Pro gradu -tutkielma, 3.11.2023

Tekijä:

PHILSON-AMANDA ADEN

Ohjaaja:

KARI PERÄJÄRVI (STUK)

VILLE BOGDANOFF (JYU)



JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO
FYSIIKAN LAITOS



© 2023 Philson-Amanda Aden

Julkaisu on tekijänoikeussäännösten alainen. Teosta voi lukea ja tulostaa henkilökohtaista käyttöä varten. Käyttö kaupallisiin tarkoituksiin on kielletty. This publication is copyrighted. You may download, display and print it for Your own personal use. Commercial use is prohibited.

Tiivistelmä

Aden, Philson-Amanda

Ilmanpuhdistimet radioaktiivisia aineita sisältävien aerosolihiukkasten kerääjinä säteilyvaaratilanteissa

Pro gradu -tutkielma

Fysiikan laitos, Jyväskylän yliopisto, 2023, 63 sivua

Säteilyvaaratilanteessa hengityksen kautta kehoon kulkeutuvat radioaktiiviset aineet aiheuttavat sisäistä säteilyannosta. Sisälle suojautumisella pyritään vähentämään päästöpilven ylikulun aikana saatavaa sisäistä ja ulkoista säteilyannosta. Sisälle suojauduttaessa suljetaan ja tiivistetään ilmanvaihto mahdollisimman hyvin, mistä huolimatta radioaktiivisia aineita tihkuu sisäilmaan. Tässä pro gradu -tutkielmassa tutkittiin siirrettävien kaupallisesti saatavilla olevien ilmanpuhdistimien kykyä kerätä radioaktiivisia aineita sisältäviä aerosolihiukkasia.

Tutkielmassa tehtiin kirjallisuuskatsaus säteilyvaaratilanteissa syntyvistä radioaktiivisia aineita sisältävistä aerosolihiukkasista ja niiden ominaisuuksista. Lisäksi tutustuttiin radonin ja sen hajoamistuotteiden ominaisuuksiin. Kokeellisessa osiossa radonilla ja sen hajoamistuotteilla simuloitiin säteilyvaaratilanteissa sisäilmaan kulkeutuvia radioaktiivisia aineita. Mittauskampanjassa tutkittiin kahden kaupallisen siirrettävän ilmanpuhdistimen, HEPA-suodattimeen perustuvan Electrolux EAP300 ja sähköstaattisen Elixair E400, kykyä kerätä radonia ja sen hajoamistuotteita.

Ilmanpuhdistimet keräsivät tehokkaasti radonin kiinnittyneitä hajoamistuotteita, joiden hajoamistuotepitoisuus sisäilmassa laski kertaluokalla 100 minuutissa Electrolux EAP300-ilmanpuhdistimella ja 160 minuutissa Elixair E400-ilmanpuhdistimella. Ilmanpuhdistimet eivät keränneet kiinnittymättömiä hajoamistuotteita tai radonia. Tulosten perusteella sisälle suojauduttaessa ilmanpuhdistimet keräisivät tehokkaasti radioaktiivisia aineita sisältäviä akkumulaatiomoodin aerosolihiukkasia ja vähentäisivät hengityksen kautta niistä saatavaa efektiivistä säteilyannosta. Ilmanpuhdistimet eivät keräisi radioaktiivisia jalokaasuja tai ultrahienoja aerosolihiukkasia.

Avainsanat: Radioaktiivisia aineita sisältävät aerosolihiukkaset, radon, radonin hajoamistuotteet, ilmanpuhdistimet, säteilyvaaratilanne, suojelutoimet

Abstract

Aden, Philson-Amanda

Air purifiers as collectors of aerosol particles containing radioactive substances in radiation hazard situations

Master's thesis

Department of Physics, University of Jyväskylä, 2023, 63 pages.

In a radiation hazard situation inhaled radioactive substances cause internal contamination. Sheltering indoors is performed to decrease internal and external dose while a plume passes through an area. Despite shutting off and sealing all ventilation while sheltering indoors, radioactive substances will seep into indoor air. In this master's thesis, portable commercially available air purifiers were studied as collectors of aerosol particles containing radioactive substances.

In this thesis, a literature review on the properties of aerosol particles containing radioactive substances created during a radiation hazard situation has been conducted. The properties of radon and radon progeny were also studied. In the experimental part, radon and radon progeny were used to simulate radioactive substances carried into indoor air during a radiation hazard situation. In the measurement campaign, the ability to collect radon and radon progeny using two portable commercially available air purifiers, Electrolux EAP300 employing a HEPA filter and Elixair E400 electrostatic purifier, was studied.

The air purifiers collected effectively attached radon progeny as their activity concentration was found to decrease by an order of magnitude in 100 minutes with the Electrolux EAP300 and in 160 minutes with the Elixair E400. The air purifiers didn't collect the unattached radon progeny or radon. Based on the results, portable commercial air purifiers would be effective at collecting accumulation mode aerosol particles containing radioactive substances while sheltering indoors and would decrease the effective internal inhaled dose from these particles. The air purifiers wouldn't collect radioactive noble gases or ultrafine aerosol particles.

Keywords: Aerosol particles containing radioactive substances, radon, radon progeny, air purifiers, radiation hazard situation, protective actions

Esipuhe

Haluan kiittää ohjaajiani Kari Peräjärveä ja Ville Bogdanoffia loistavasta ohjauksesta, mielenkiintoisista keskusteluista ja kannustavasta sanoista. Haluan myös kiittää esihenkilöitani Maarit Muikkua ja Piia Keski-Jaskaria Säteilyturvakeskuksesta mahdollisuudesta työskennellä opinnäytetyöntekijänä näin mielenkiintoisen aiheen parissa. Lisäksi haluan kiittää ylitarkastaja Tuukka Turtiaista radonmittauslaitteiston lainasta, laitteistoon liittyvästä koulutuksesta sekä radonmittauksiin liittyvästä ohjauksesta ja ylitarkastaja Jani Turusta avusta koeasetelman rakentamisessa.

Lopuksi haluan kiittää perhettäni ja ystäviäni kannustuksesta ja tuesta opinnäytetyöprosessin aikana.

Jyväskylässä 3. marraskuuta 2023

Philson-Amanda Aden

Sisällys

| | |
|--|-----------|
| Tiivistelmä | 3 |
| Abstract | 5 |
| Esipuhe | 7 |
| 1 Johdanto | 11 |
| 2 Säteilyfysiikan peruskäsitteitä | 13 |
| 2.1 Radioaktiivinen hajoaminen | 13 |
| 2.2 Säteilyannos | 14 |
| 2.3 Sisäinen säteilyannos hengitysilma- masta | 16 |
| 3 Säteilyvaaratilanteissa syntyvät radioaktiivisia aineita sisältävät ae- rosolihiukkaset | 19 |
| 3.1 Säteilyvaaratilanteissa vapautuvat radionuklidit | 20 |
| 3.2 Radioaktiivisia aineita sisältävien aerosolihiukkasten muodostuminen | 23 |
| 3.3 Radioaktiivisia aineita sisältävien aerosolihiukkasten käyttäytyminen ja laskeuma | 25 |
| 3.4 Radioaktiivisia aineita sisältävien aerosolihiukkasten kokojakauma . . . | 28 |
| 4 Radon sisäilmassa | 33 |
| 4.1 Radonkaasu | 33 |
| 4.2 Radonin hajoamistuotteet | 34 |
| 5 Ilmanpuhdistusteknologiat | 37 |
| 5.1 Mekaaninen suodatus | 38 |
| 5.2 Sähköstaattinen suodatus | 39 |
| 6 Mittauslaitteisto ja mittaukset | 41 |
| 6.1 Mittauslaitteisto | 41 |

| | | |
|----------|----------------------------------|-----------|
| 6.1.1 | AlphaGUARD P30 | 41 |
| 6.1.2 | Tracerlab BWLM-PLUS-2S | 42 |
| 6.1.3 | RanidPro200 | 43 |
| 6.2 | Ilmanpuhdistimet | 44 |
| 6.2.1 | Electrolux EAP300 | 44 |
| 6.2.2 | Elixair E400 | 44 |
| 6.3 | Koeasetelma | 45 |
| 6.4 | Mittaukset | 47 |
| 7 | Tulokset ja havainnot | 49 |
| 7.1 | Mittaustulokset | 49 |
| 7.2 | Havainnot | 54 |
| 8 | Johtopäätökset | 57 |
| | Lähteet | 58 |

1 Johdanto

Säteilyturvakeskuksen (STUK) valmiusohjeessa 1 (VAL 1, [1]) on määritetty suojelutoimet säteilyvaaratilanteen varhais- ja jälkivaiheessa. Säteilyvaaratilanne, joka vaatii suojelutoimia, voi olla esimerkiksi vakava ydinvoimalaonnettomuus Suomessa tai lähialueilla, likaisen pommin käyttö tai ydinräjäytyksen aiheuttama päästöpilvi. Suojelutoimien tavoitteena on, että säteilyvaaratilanteessa väestön säteilyaltistus jää mahdollisimman pieneksi, tilanteesta aiheutuvat haitat pysyvät maltillisina ja yhteiskunnan toiminta saadaan palautettua säteilyvaaratilanteen jälkeen mahdollisimman nopeasti normaaliksi.

Väestöä koskevissa suojelutoimissa määritetään ohjeistus sisälle suojautumiselle säteilyvaaratilanteen varhaisvaiheessa [[1], 2.1.1]. Ohjeistuksen mukaan sisälle suojautuminen tavallisiin sisätiloihin on riittävä toimenpide säteilyvaaratilanteissa lukuun ottamatta esimerkiksi lähialueen ydinräjäytystilannetta, josta syntyvän päästöpilven lisäksi on otettava huomioon myös muut vaikutukset, kuten ydinräjähdysten aiheuttama paineisku ja vapautuva lämpösäteily, joiden vuoksi väestön tulisi suojautua väestönsuojatiloihin. Sisälle suojautumisella pyritään vähentämään ulkoisesta säteilystä saatavaa säteilyannosta sekä radioaktiivisten aineiden kulkeutumista kehoon hengitysilman mukana. Annoskriteeri sisälle suojautumiselle on yli 10 millisievertin (mSv) säteilyannos kahden vuorokauden aikana. Vaihtoehtoisesti ohjeellinen toimenpidetaso voi täytyä, jos ulkoisen säteilyn annosnopeuden arvioidaan olevan yli $100 \mu\text{Sv/h}$ tai jos ilmassa olevien radioaktiivisten aineiden aktiivisuuspitoisuuden arvioidaan ylittävän alfasäteilijöiden osalta 1 Bq/m^3 , beetasäteilijöiden osalta 1000 Bq/m^3 ja gammasäteilijöiden osalta 10 kBq/m^3 .

Sisätiloihin suojauduttaessa suljetaan ilmanvaihto ja kaikki ilmanvaihtoaukot tiivistetään mahdollisimman hyvin. Sisälle suojautumisen keston ei pitäisi ylittää kahta vuorokautta, sillä tällöin muut säteilyvaaratilanteeseen liittyvät haitat, kuten ruuan ja lääkkeiden saatavuus, lisääntyvät nopeasti. Lisäksi on arvioitu, että päästöpilven ollessa vielä alueella kahden vuorokauden päästä, ovat sisätilat jo kontaminoituneet tiivistämisestä huolimatta eikä sisälle suojautumisesta ole enää merkittävää hyötyä säteilyannoksen vähentämisessä. [1]

Tässä pro gradu -tutkielmassa suoritetaan esitutkimus siirrettävien kaupallisesti saatavilla olevien ilmanpuhdistimien hyödyntämisestä säteilyvaaratilanteen yhteydessä sisälle suojauduttaessa hengitysilman mukana saatavan sisäisen säteilyannoksen vähentämiseksi. Ilmanpuhdistimien on tutkittu keräävän sisäilmasta radonin lyhytikäisiä hiukkasina leijuvia hajoamistuotteita, erityisesti niitä, jotka ovat kiinnittyneet aerosolihiukkasiin [2],[3]. Ilmiötä ei ole tutkittu Suomessa tai tarkasteltu mahdollisuutena vähentää hengitysilman kautta saatavaa sisäistä säteilyannosta sisälle suojauduttaessa säteilyvaaratilanteen aikana.

Tutkielman teoriaosassa tehdään kirjallisuuskatsaus säteilyvaaratilanteissa vapautuvista radioaktiivisista aineista, niitä sisältävistä aerosolihiukkasista ja niiden ominaisuuksista. Erityisesti keskitytään radioaktiivisia aineita sisältävien aerosolihiukkasten kokojakaumaan, joka on merkittävä tekijä hengityksen kautta saatavan sisäisen säteilyannoksen ja ilmanpuhdistimien puhdistustehokkuuden kannalta. Teoriaosassa tutustutaan myös radoniin ja radonin hajoamistuotteiden muodostamien hiukkasten ominaisuuksiin, sekä eri ilmanpuhdistusteknologioihin.

Tutkielman kokeellisessa osiossa luonnollisesti esiintyvällä radonilla ja radonin hajoamistuotteilla simuloidaan säteilyvaaratilanteessa päästöpilven mukana sisäilmaan kulkeutuvia radioaktiivisia aineita. Mittauskampanjassa hyödynnetään kahta erilaista kaupallista siirrettävää ilmanpuhdistinta, sähköstaattista ilmanpuhdistinta, Elixair E400, ja HEPA-suodattimeen perustuvaa ilmanpuhdistinta, Electrolux EAP300. Kokeellisen osion tavoitteena on tutkia, miten sisäilman radonin ja sen hajoamistuotteiden aktiivisuuspitoisuudet muuttuvat tiivistetyssä tilassa ilmanpuhdistimien käytön seurauksena.

Kirjallisuuskatsauksen ja kokeellisten tulosten perusteella arvioidaan ilmanpuhdistimien hyödyntämistä säteilyvaaratilanteessa sisäilman radioaktiivisten aerosolihiukkasten kerääjinä. Lisäksi pohditaan mahdollisten lisätutkimusten tarpeellisuutta ja laajuutta. Tutkielma tehdään yhteistyössä Säteilyturvakeskuksen kanssa.

2 Säteilyfysiikan peruskäsitteitä

2.1 Radioaktiivinen hajoaminen

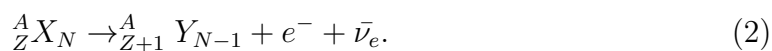
Radioaktiivisella hajoamisella tarkoitetaan prosessia, jossa epästabiili ydin muuttuu toiseksi ytimeksi ja lähettää samalla hiukkasia tai fotoneja. Alkuperäistä ydintä kutsutaan emoytimeksi ja hajoamistuotteena syntynyttä uutta ydintä tytärytimeksi. Atomytimiä kutsutaan myös nuklideiksi.

Alfahajoamisessa emonuklidi hajoaa tytärnuklidiksi ja alfahiukkaseksi, eli kahdesta protonista ja neutronista koostuvaksi heliumatomin ytimeksi (${}^4_2\text{He}$), alla olevan reaktioyhtälön 1 mukaisesti



Reaktioyhtälössä X tarkoittaa emonuklidia, Y tytärnuklidia, A emonuklidin massalukua, Z emonuklidin protonilukua ja N emonuklidin neutronilukua.

Beetahajoamisessa ytimen protoni- ja neutroniluvut muuttuvat, mutta massaluku ei. β^- -hajoamisessa yksi emonuklidin neutroneista hajoaa protoniksi, elektroniksi, jota kutsutaan beetahajoamisen yhteydessä beetahiukkaseksi e^- , ja antineutriinoksi $\bar{\nu}_e$ reaktioyhtälön 2 mukaisesti



Muodostunut protoni jää ytimeen, ja beetahiukkanen ja antineutriino sinkoutuvat ytimestä.

Alfa- ja beetahajoamisen yhteydessä tytärnuklidi voi jäädä virittyneeseen tilaan ja viritystilan purkautuessa syntyy gammasäteilyä tai konversioelektroneja. Konversioelektronihajoamisen yhteydessä vapautuu usein myös karakteristista sähkömagneettista röntgensäteilyä. Gammasäteily on korkeaenergistä ja lyhytaaltoista sähkömagneettista säteilyä. Viritystilan purkautumisen seurauksena vapautuvan gammasäteilyn energia on likimain ytimen alkutilan ja lopputilan energioiden erotus. Osa energiasta kuluu hajoaneen nuklidin rekyyliin. Useimmiten tapahtuu viritysti-

lan purkautuminen lähes välittömästi, mutta joskus sen elinikä voi olla niin pitkä, että nuklidin virittyntä tilaa tarkastellaan itsenäisenä radionuklidina. Pitkäikäistä virittyntä tilaa kutsutaan isomeeriseksi tilaksi ja merkitään m-kirjaimella nuklidin massaluvun perässä, esim. ^{129m}Te . Viritystilän purkautumisen lisäksi gammasäteilyä voi syntyä esimerkiksi myös fissioreaktioissa.

Alfa-, beeta- ja gammasäteily ovat ionisoivan säteilyn lajeja. Ionisoivalla säteilyllä tarkoitetaan säteilyä, jonka energia on tarpeeksi suuri irrottamaan elektroneja atomeista, eli ionisoimaan atomeita, tai rikkomaan aineen molekyylejä. Ionisoivan säteilyn aiheuttamat atomi- ja molekyyllitason muutokset voivat vaurioittaa soluja ja DNA:ta.

Radioaktiivisen lähteen aktiivisuus A tarkoittaa lähteessä tapahtuvien hajoamisten lukumäärää aikayksikössä. Aktiivisuuden SI-yksikkö on becquerel (Bq). Aktiivisuuspitoisuus C_A tarkoittaa tarkasteltavassa tilassa olevaa aktiivisuutta jaettuna tilan tilavuudella ja sen yksikkö on Bq/m^3 . Puoliintumisajalla $T_{1/2}$ kuvataan aikaa, jonka kuluessa tietystä radionuklidista koostuvan radioaktiivisen lähteen aktiivisuus laskee puoleen. [4]

2.2 Säteilyannos

Säteilysuojelun perussuureilla pyritään arvioimaan säteilyn aiheuttamia terveyshaittoja. Ihmisen saama säteilyannos voidaan jakaa ulkoiseen ja sisäiseen säteilyannokseen. Ulkoisella säteilyannoksella tarkoitetaan kehon ulkopuolisesta säteilylähteestä saatavaa annosta ja sisäisellä annoksella kehossa olevista lähteistä aiheutuvaa annosta. Gammasäteily aiheuttaa merkittävää ulkoista säteilyannosta, kun taas alfa- ja beeta-aktiiviset lähteet kehossa aiheuttavat merkittävästi sisäistä säteilyannosta.

Säteilyannos riippuu aineeseen säteilyn seurauksena siirtyvästä energiasta. Absorboitunut annos D kuvaa säteilyn vaikutusta aineeseen. Absorboitunutta annosta kuvaa yhtälö

$$D = \frac{d\epsilon}{dm}, \quad (3)$$

jossa $d\epsilon$ tarkoittaa absorboitunutta energiaa ja dm massa-alkiota. Absorboituneen annoksen yksikkö on gray (Gy), SI-yksiköissä $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$.

Absorboitunut annos ei kuitenkaan ole riittävä kuvaamaan säteilyn vaikutuksia kudoksessa tai elimessä. Vaikutukset riippuvat absorboituneen energian lisäksi muun muassa säteilyn lajista ja energiajakaumasta, annoksen jakautumisesta kudoksessa,

säteilyn kohteena olevan kudoksen vaurioitumisalttiudesta, kudoksen merkityksestä ihmisen terveydelle ja säteilyannoksen kertymisnopeudesta.

Altistumista arvioidaan ekvivalenttiannoksen ja efektiivisen annoksen avulla. Elimen tai kudoksen ekvivalenttiannos lasketaan keskimääräisten absorboituneiden annosten $D_{T,R}$ avulla. Absorboitunut annos on määritettävä erikseen kutakin säteilyn komponenttia R kohti. Komponentista R saatava elimen tai kudoksen T absorboitunut annos saadaan kaavasta

$$D_{T,R} = \frac{1}{m_T} \int_{m_T} D_R dm_T, \quad (4)$$

jossa m_T on tarkasteltavan elimen tai kudoksen massa ja D_R paikallinen absorboitunut annos. Edelleen absorboituneiden annosten summasta voidaan laskea elimen tai kudoksen ekvivalenttiannos H_T kaavalla

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R}, \quad (5)$$

jossa w_R on säteilylajille tyypillinen painotuskerroin. Esimerkiksi alfahiukkasen painotuskerroin on 20 ja lähes kaikkien elektronien sekä fotonien 1. Ekvivalenttiannoksen yksikkö on sievert (Sv).

Efektiivinen annos E kuvaa säteilyn kokonaisvaikutusta kehossa ja se voidaan laskea ekvivalenttiannoksen H_T avulla kaavalla

$$E = \sum_T w_T H_T, \quad (6)$$

jossa w_T on elimen tai kudoksen painotuskerroin. Painotuskertoimella w_T otetaan huomioon elinten ja kudosten vaurioitumisalttius. Esimerkiksi keuhkojen painotuskerroin on 0,12 ja ihon vain 0,01. Efektiivisen säteilyannoksen yksikkö on sievert (Sv). [5] Keskimääräinen suomalaisen saama efektiivinen säteilyannos vuodessa on 5,9 mSv [6].

2.3 Sisäinen säteilyannos hengitysilma

Puhuttaessa sisälle suojautumisesta ollaan erityisen kiinnostuneita hengitetyn ilman kautta kehon saamasta sisäisestä annoksesta. Hengitysilma aiheutuvaan säteilyannokseen vaikuttaa merkittävästi hiukkaskoko sekä hiukkasten kemialliset ominaisuudet. [7]

Hiukkaskoko vaikuttaa hiukkasten kulkeutumiseen hengityselimistössä. Suuret hiukkaset (halkaisija useita mikrometrejä) tarttuvat todennäköisimmin ylähengitysteihin, erityisesti nenän ja nielun alueelle. Parin mikrometrin hiukkaset kulkeutuvat alahengitysteihin ja hiukkaset, joiden halkaisija on $< 0,1 \mu\text{m}$ tarttuvat keuhkorakkuloihin [8]. Hiukkasten kulkeutumiseen hengityselimistössä vaikuttaa myös hengitetäänkö suun vai nenän kautta. Suun kautta hengittäessä nenään, nieluun ja syvemmälle keuhkoihin pääsee suurempi osa hiukkasista kuin nenän kautta hengittäessä. [7]

Hiukkasen kemialliset ominaisuudet vaikuttavat siihen, miten hiukkanen imeytyy kehon nesteisiin. Jos radionuklidi on kiinnittyneenä muista aineista koostuvaan hiukkaseen, liukenee se vasta hiukkasen hajottua. Säteilysvaaratilanteiden näkökulmasta esimerkiksi ^{90}Sr on yleensä sitoutuneena ydinpolttoainehiukkasiin ja liukenee polttoainehiukkasen määräämällä nopeudella. Jodin ja cesiumin yhdisteet ovat yleisesti helppoliukoisia ja imeytyvät nopeasti kehon nesteisiin. [9]

Kaasumaiset ja höyrynä ilmassa esiintyvät radionuklidit pääsevät hengitysilman mukana kaikkialle hengityselimistöön. Osa radionuklideista tarttuu hengityselimistön limakalvoille ja liukenee tai reagoi pinnan kanssa. Muuten radionuklidit poistuvat kehosta uloshengityksen mukana. Esimerkiksi kaasumainen jodi on erittäin reaktiivinen, minkä vuoksi se tarttuu herkästi hengityselimistön limakalvoille ja imeytyy kehon nesteisiin. Radioaktiiviset jalokaasut, kuten ksenon ja radon, ovat kemiallisesti inerttejä ja niiden tarttuminen hengityselimistöön on epätodennäköistä. [7]

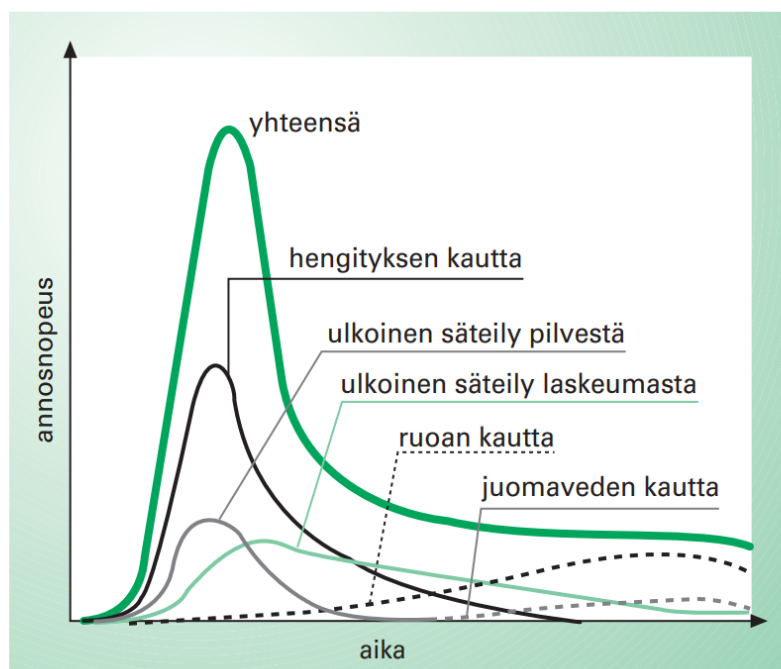
Henkilön efektiivisen säteilyannoksen kertymää hengitetyistä radioaktiivisista aineista voidaan arvioida kaavalla

$$E_h = \sum_j h(g)_j \cdot I_j, \quad (7)$$

missä $h(g)_j$ on ikäryhmään g kuuluvan henkilön annoskerroin hengityksen h kautta kehoon päässeelle radionuklidille j ja I_j radionuklidista hengityksen välityksellä tapahtunut saanto. Saantoon hengityksen tapauksessa vaikuttaa esimerkiksi hengityksenopeus v_h , radionuklidin aktiivisuuspitoisuus hengitysilmassa, sekä aika t , joka

tilassa vietetään. [7] ICRP (International Commission on Radiological Protection) on määrittänyt annoskertoimet muun muassa hengityksen kautta kehoon pääseville radionuklideille väestölle eri ikäryhmissä ja työntekijöille erilaisissa työolosuhteissa. Annoskertoimet on määritetty niin sanotuille referenssihenkilöille. [10]

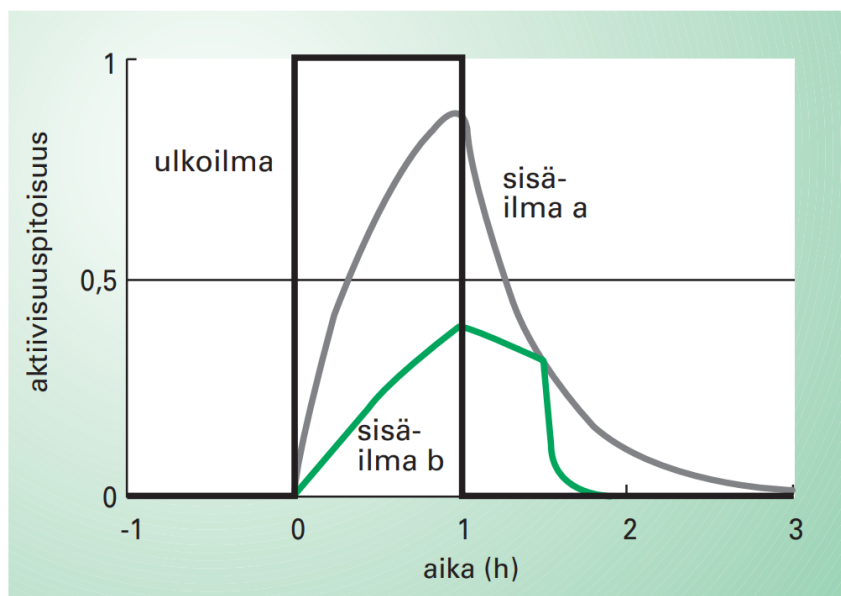
Säteilyvaaratilanteessa vapautuvat radioaktiiviset kaasut ja hiukkaset kulkeutuvat ilmassa tuulen mukana, muodostaen niin sanotun päästöpilven. Kuvassa 1 on esitetty radioaktiivisesta päästöpilvestä, laskeumasta ja elintarvikkeista aiheutuvat säteilyannokset ydinonnettomuuden jälkeen. Kuvasta voidaan nähdä, että päästöpilven ylikulun aikana merkittävin säteilyaltistus tapahtuu ilman radioaktiivisten aineiden hengittämisestä. Pilven poistuttua alueelta hengityksen kautta saatavan sisäisen säteilyannoksen osuus kokonaisannoksesta vähenee huomattavasti, mutta hengitysilmassa voi kuitenkin esiintyä radioaktiivisia aineita sisältäviä aerosolihiukkasia, jotka ovat resuspendoituneet pinnoilta. [9]



Kuva 1. Radioaktiivisista aineista saatava säteilyannos ydinonnettomuuden jälkeen. Kuva lähteestä [9].

Sisälle suojautumisella voidaan merkittävästi vähentää hengitysilman radioaktiivisten aineiden aktiivisuuspitoisuuksia päästöpilven ylikulun aikana. Kuvassa 2 on esitetty sisäilman aktiivisuuspitoisuuden aikakäyttäytyminen, kun ulkoilmassa on radioaktiivisia aineita tunnin ajan. Tilanteessa (a) ei ole suoritettu varautumistoi-

menpiteitä. Sen sijaan tilanteessa (b) ilmanvaihto on suljettu, rakennus on tiivistetty ja sisäilma on tuuletettu puoli tuntia ulkoilman puhdistuttua. Sisäilman (b) aktiivisuuspitoisuus on noin puolet sisäilman (a) aktiivisuuspitoisuudesta. Huomioitavaa on, että varautumistoimenpiteet, kuten tiivistäminen ja ilmanvaihdon sulkeminen, vähentävät radioaktiivisia aineita sisältävien aerosolihiukkasten kulkeutumista sisäilmaan, mutta monet kaasuna ilmassa esiintyvät radionuklidit, erityisesti jalokaasut, ja pieniin aerosolihiukkasiin kiinnittyneet radionuklidit, pääsevät varautumistoimenpiteistä huolimatta sisäilmaan.



Kuva 2. Sisäilman aktiivisuuspitoisuuden aikakäyttäminen, kun ulkoilmassa on radioaktiivisia aineita tunnin ajan a) ilman varautumistoimenpiteitä, b) kun asianmukaiset varautumistoimenpiteet on suoritettu. Kuva lähteestä [11].

3 Säteilyvaaratilanteissa syntyvät radioaktiivisia aineita sisältävät aerosolihiukkaset

Tässä kappaleessa tutustutaan säteilyvaaratilanteissa vapautuviin radionuklideihin, niitä sisältäviin radioaktiivisiin aerosolihiukkasiin sekä näiden aerosolihiukkasten käyttäytymiseen ja kokojakaumaan. Kappaleessa keskitytään erittäin vakaviin logaritmisen INES-luokitteluasteikon (International Nuclear Event Scale) 7- tason ydinvoimalaonnettomuuksiin, eli Tshernobylin ja Fukushima ydinvoimalaonnettomuuksiin. Lisäksi kappaleessa tarkastellaan ydinaseräjätysten seurauksena syntyviä radioaktiivisia aineita sisältäviä aerosolihiukkasia ydinasekoikeista julkaistun kirjallisuuden pohjalta.

Tshernobylin ydinvoimalaonnettomuus tapahtui 26. huhtikuuta 1986 Tshernobylin ydinvoimalassa, Ukrainassa (aikanaan Ukrainan Sosialistinen Neuvostotasavalta). Onnettomuuden aiheutti epäonnistunut reaktoritesti voimalan neljännessä reaktorissa. Reaktorin tehon tuotto nousi hallitsemattomasti, aiheuttaen suuren räjähdysen. Seuraavan 10 päivän aikana onnettomuudesta suuria määriä radioaktiivisia aineita vapautui ympäristöön, kunnes lämpöräjähdysten aiheuttamat tulipalot saatiin sammutettua. [12]

Fukushiman ydinvoimalaonnettomuus tapahtui 11. maaliskuuta 2011 Fukushimassa, Itä-Japanin rannikolla. Onnettomuuden syynä oli Tohokun maanjäristys ja sen aiheuttama tsunami. Maanjäristyksen ja tsunamin yhteisvaikutuksesta ydinvoimala jäi ilman sähköä. Sähkökatkon vuoksi laitoksen jäähdytysjärjestelmät pysähtyivät, mistä johtuen ydinvoimalan kuudesta reaktorista kolmen, reaktorien 1, 2 ja 3, ydinpolttoaine ylikuumeni ja suli. Paineen noustessa reaktorien suojarakenteet lopulta pettivät ja radioaktiivisia aineita vapautui ympäristöön. [13]

Ydinasekoikeita suoritettiin ilmakehässä suuria määriä 1950- ja 1960-luvuilla eri valtioiden toimesta. Yhdysvallat suoritti vuosien 1951–1958 aikana lähes 100 ydinasekoetta ilmakehässä Nevadan koealueella (engl. Nevada Test Site, NTS), sekä lukuisia muita eri alueilla. Neuvostoliitto suoritti 456 ydinasekoetta vuosien 1949–1989 aikana Semipalatinskin ydinkoealueella (engl. Semipalatinsk Test Site, STS). [14] Lähimpä-

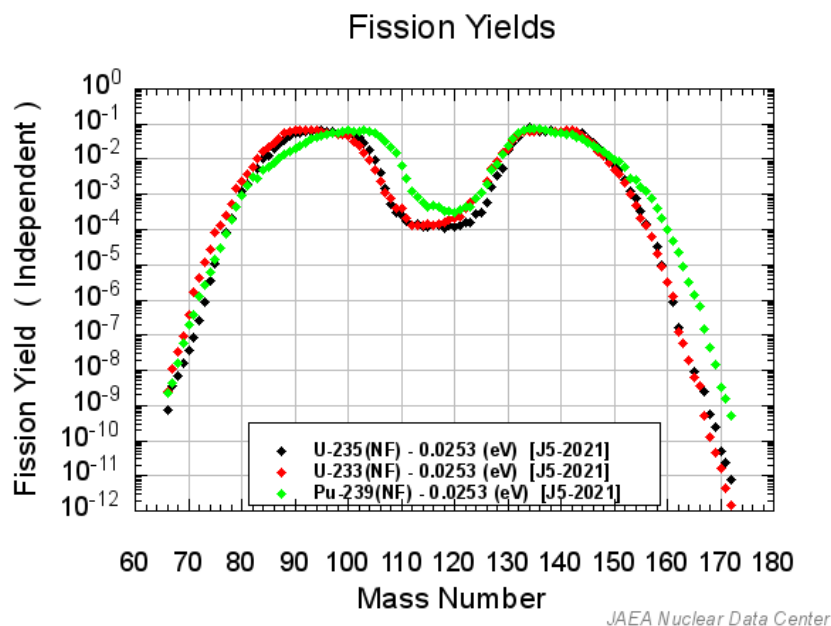
nä Suomea Neuvostoliitto suoritti ydinasekokeita Novaja Zemljan ydinkoealueella. Ilmakehässä suoritettujen ydinasekokeiden määrää rajoitti vuonna 1963 allekirjoitettu osittainen ydinasekielto (engl. Partial Test Ban Treaty, PTBT), joka kielsi kaikki muut paitsi maanalaiset kokeet. Vasta vuonna 1996 YK:n yleiskokouksessa asetettiin ydinaseräjäytykset täysin kieltävä sopimus (engl. Comprehensive Test Ban Treaty, CTBT), jota kuitenkin kaikki maat eivät ole sitoutuneet noudattamaan. [9]

3.1 Säteilyvaaratilanteissa vapautuvat radionuklidit

Ydinonnettomuuksissa vapautuvat radionuklidit ovat uraanin ja plutoniumin isotooppeja, sekä fissio- ja aktivoitumistuotteita. Kun uraani- tai plutoniumytimien kaltaisia raskaita ytimiä pommitetaan neutroneilla, voi ydin hajota fissioreaktion kautta kevyemmiksi, yleensä erimassaisiksi tytärytimiksi, joita kutsutaan fissiotuotteiksi. Lisäksi reaktiossa syntyy kaksi tai kolme neutronia sekä gamma- ja neutriinosäteilyä. Vapautuneet neutronit voivat edelleen aiheuttaa uusia fissioreaktioita ja näin synnyttää ketjureaktion. Fissiotuotteiden ohella syntyy aktivoitumistuotteita, kun reaktorin tai ydinaseen ei-radioaktiiviset materiaalit absorboivat neutroneita ja muuntuvat radioaktiivisiksi. Lisäksi reaktioympäristön raskaat fissiilit tai fissiokelpoiset radionuklidit voivat kaapata neutroneita ja aktivoitua tai fissioitua. [4] Fissioreaktiossa vapautuvaa energiaa hyödynnetään ydinvoimaloissa lämmön ja sitä kautta sähkön tuottoon hallitun reaktion kautta. Ydinaseissa sama prosessi tapahtuu huomattavasti nopeammin ja hallitsemattomasti, aiheuttaen räjähdyksen.

Kuvassa 3 on esitetty yleisempien fissiomateriaalien, fissiilien uraanin ja plutoniumin isotooppien ^{233}U , ^{235}U ja ^{239}Pu , fissiotuotteiden massajakaumat. Kuvassa itsenäinen fissiotuotteiden massajakauma (engl. Fission yield (Independent)) tarkoittaa odotettuja arvoja jokaiselle tuotetulle fissiotuotteelle sillä hetkellä, kun fissioreaktio tapahtuu. Odotusarvo on kaksi, kun otetaan huomioon vain kahden kappaleen fissioreaktio. Odotusarvo on kuitenkin hieman suurempi kuin kaksi, koska fissiotuotteiden massajakaumassa on otettu huomioon myös kevyet nuklidit, jotka syntyvät kolmen kappaleen fissioreaktiossa. [15] Kuvasta voidaan nähdä, että suuri osa fissiotuotteista on massaluvultaan joko 90–100 tai 130–150.

Taulukossa 1 on esitetty merkittävimmät Tshernobylin ja Fukushimaon ydinvoimalaonnettomuuksissa vapautuneet radionuklidit. Vapautuneista radionuklideista kaikki ovat beeta-aktiivisia, lukuun ottamatta plutoniumin isotooppeja ^{238}Pu , ^{239}Pu ja ^{240}Pu , sekä curiumin isotooppia ^{242}Cm , jotka ovat alfa-aktiivisia. Taulukosta



Kuva 3. ^{233}U , ^{235}U ja ^{239}Pu fissiotuotteiden massajakaumat [15].

nähdään, että Tshernobylin arvioidut päästöt ovat huomattavasti suurempia kuin Fukushimaan. Fukushimaan ydinvoimalaonnettomuudessa merkittävimpiä vapautuneita radionuklideja olivat jalokaasut ^{85}Kr ja ^{133}Xe , sekä muut helposti vapautuvat fissiotuotteet, kuten jodin isotoopit ^{131}I ja ^{133}I , cesiumin isotoopit ^{134}Cs ja ^{137}Cs , telluurin isomeerinen tila ^{129m}Te ja isotooppi ^{132}Te . Helposti vapautuvat radionuklidit esiintyvät tyypillisesti kaasumaisina, niillä on matala kiehumispiste tai ne ovat syntyneet kaasumaisen emonuklidin hajoamisen seurauksena. Sen sijaan Tshernobylin ydinvoimalaonnettomuudessa myös heikosti vapautuvia fissiotuotteita, kuten ^{89}Sr , ^{103}Ru ja ^{140}Ba , sekä heikosti kemiallisesti tai lämmön vaikutuksesta reagoivia radionuklideja, kuten ^{241}Pu , vapautui huomattavia määriä ympäristöön. Heikosti vapautuvilla radionuklideilla on tyypillisesti korkea kiehumispiste. Merkittävin osa Tshernobylin päästöistä koostui silti myös helposti vapautuvista radionuklideista.

Taulukko 1. Arvioidut ilmakehään vapautuneet radionuklidit Tshernobylin ja Fukushimaan ydinvoimalaonnettomuuksista [16]. Puoliintumisaajat on haettu NuDat3-tietokannasta [17]. Vapautuneet radionuklidit on jaettu ominaisuuksiensa mukaan neljään ryhmään: (a) fissiotuotteet, jotka ovat jalokaasuja, (b) helposti vapautuvat (volatiilit) fissiotuotteet, (c) heikosti vapautuvat fissiotuotteet ja (d) heikosti kemiallisesti tai lämmön vaikutuksesta reagoivat aineet.

| Radionuklidi | Puoliintumisaika | Vapautuminen Tshernobyl (PBq) | Vapautuminen Fukushima (PBq) |
|------------------------|------------------|-------------------------------|------------------------------|
| ⁸⁵ Kr (a) | 10,739 a | 33 | 6,4–32,6 |
| ⁸⁹ Sr (c) | 50,563 d | 115 | 0,043–13 |
| ⁹⁰ Sr (c) | 28,9 a | 10 | 0,0033–0,14 |
| ⁹⁵ Zr (c) | 64,032 d | 84 | 0,017 |
| ⁹⁹ Mo (d) | 65,976 h | > 72 | $8,8 \cdot 10^{-8}$ |
| ¹⁰³ Ru (c) | 39,347 d | > 168 | $(0,75–7,1) \cdot 10^{-5}$ |
| ¹⁰⁶ Ru (c) | 371,8 d | > 73 | $2,1 \cdot 10^{-6}$ |
| ^{129m} Te (b) | 33,6 d | 240 | 3,3–12,2 |
| ¹³² Te (b) | 3,204 d | 1150 | 0,76–162 |
| ¹³¹ I (b) | 8,0252 d | 1760 | 100–400 |
| ¹³³ I (b) | 20,83 h | 2500 | 0,68–300 |
| ¹³³ Xe (a) | 5,2475 d | 6500 | 6000–12000 |
| ¹³⁴ Cs (b) | 2,0652 a | 47 | 8,3–50 |
| ¹³⁶ Cs (b) | 13,04 d | 36 | - |
| ¹³⁷ Cs (b) | 30,08 a | 85 | 7–20 |
| ¹⁴⁰ Ba (c) | 12,7527 d | 240 | 1,1–20 |
| ¹⁴¹ Ce (d) | 32,511 d | 84 | 0,018 |
| ¹⁴⁴ Ce (d) | 284,91 d | 50 | 0,011 |
| ²³⁹ Np (d) | 2,356 d | 400 | 0,076 |
| ²³⁸ Pu (d) | 87,7 a | 0,015 | $(0,24–1,9) \cdot 10^{-5}$ |
| ²³⁹ Pu (d) | 24110 a | 0,013 | $(0,041–0,32) \cdot 10^{-5}$ |
| ²⁴⁰ Pu (d) | 6561 a | 0,018 | $(0,051–0,32) \cdot 10^{-5}$ |
| ²⁴¹ Pu (d) | 14,329 y | 2,6 | $(0,033–120) \cdot 10^{-5}$ |
| ²⁴² Cm (d) | 162,8 d | 0,4 | $(0,98–10) \cdot 10^{-5}$ |

Taulukossa 2 on esitetty keskeisimmät ilmakehässä suoritetuissa ydinasekokeissa globaalisti vapautuneet radionuklidit. Ydinaseen räjähtäessä vapautuu koko aseensisältö. Ydinaseen materiaalien lisäksi vapautuneisiin radionuklideihin vaikuttaa räjäytyskorkeus, sillä lähellä maanpintaa suoritetuissa räjäytyksissä syntyvä tulipallo imaisee sisäänsä ympärillä olevia materiaaleja, kuten maaperää ja rakennusmateriaaleja, jotka voivat aktivoitua tulipallossa.

Taulukko 2. Arvio ilmakehässä tehdyissä ydinasekokeissa globaalisti vapautuneista radionuklideista [12]. Puoliintumisaikat on haettu NuDat3-tietokannasta [17]. Vapautuneet radionuklidit on jaettu ominaisuuksiensa mukaan neljään ryhmään: (a) fissiotuotteet, jotka ovat jalokaasuja, (b) helposti vapautuvat (volatiilit) fissiotuotteet, (c) heikosti vapautuvat fissiotuotteet ja (d) heikosti kemiallisesti tai lämmön vaikutuksesta reagoivat aineet.

| Radionuklidi | Puoliintumisaika | Vapautuminen (PBq) |
|-----------------------|------------------|--------------------|
| ^3H (a) | 12,32 a | 186 000 |
| ^{14}C (a) | 5700 a | 213 |
| ^{54}Mn (b) | 312,2 d | 3980 |
| ^{55}Fe (b) | 2,744 a | 1530 |
| ^{89}Sr (c) | 50,563 d | 117 000 |
| ^{90}Sr (c) | 28,9 a | 622 |
| ^{91}Y (c) | 58,51 d | 120 000 |
| ^{95}Zr (c) | 64,032 d | 148 000 |
| ^{103}Ru (c) | 39,247 d | 247 000 |
| ^{106}Ru (c) | 371,8 d | 12 200 |
| ^{125}Sb (c) | 2,75856 a | 741 |
| ^{131}I (b) | 8,0252 d | 675 000 |
| ^{137}Cs (b) | 30,08 a | 948 000 |
| ^{140}Ba (c) | 12,7527 d | 759 000 |
| ^{141}Ce (d) | 32,511 d | 263 000 |
| ^{144}Ce (d) | 284,91 d | 30 700 |
| ^{239}Pu (d) | 24110 a | 6,5 |
| ^{240}Pu (d) | 6561 a | 4,4 |
| ^{241}Pu (d) | 14,329 a | 142 |

3.2 Radioaktiivisia aineita sisältävien aerosolihiukkasten muodostuminen

Aerosoli tarkoittaa ulkoilman kaasuista ja hiukkasista, eli aerosolihiukkasista, muodostuvaa kokonaisuutta. Useimmat ilmassa esiintyvät radionuklidit ovat ulkoilman lämpötilassa kiinteitä tai nestemäisiä ja kiinnittyvät usein aerosolihiukkasiin. Merkittäviä poikkeuksia ovat jalokaasut, kuten radon, ksenon ja krypton, jotka ovat kemiallisesti inerttejä, eivätkä tästä syystä muodosta kemiallisia yhdisteitä muiden aineiden kanssa. Jodin isotoopit voivat esiintyä ulkoilmassa kaasumaisina tai sitoutuneena hiukkasiin. [11]

IAEA (International Atomic Energy Agency) on kategorisoinut Tshernobylin ydinonnettomuudessa vapautuneet radioaktiivisia aineita sisältävät hiukkaset kolmeen

kategoriaan: rutenium-hiukkasiin, ydinpolttoainehiukkasiin ja kondensaatiohiukkasiin [12].

Rutenium-hiukkasten, tai monoelementaalisten hiukkasten, gammaspektrometrialla mitattujen aktiivisuuksien katsottiin olevan peräisin pääasiassa ruteniumin isotoopeista ^{103}Ru ja ^{106}Ru . Lisäksi hiukkasissa havaittiin myös vakaita siirtymämatalleja, kuten Mo, Tc, Fe, Ni ja Pd, sekä matala-aktiivisia isotooppeja, kuten ^{125}Sb ja ^{60}Co . Rutenium-hiukkasten on arvioitu muodostuneen joko reaktorissa tapahtuneen räjähdysten korkeassa lämpötilassa kondensaatioprosesseilla, tai ne ovat voineet olla jo muodostuneina ydinpolttoaineessa ja vapautuivat räjähdysten seurauksena.

Ydinpolttoainehiukkaset ovat UO_2 -polttoainefragmentteja, jotka sisältävät myös fissio- ja aktivoitumistuotteita. Gammaspektrometrialla hiukkasista havaittiin korkean kiehumispisteen radioaktiivisia aineita, kuten ^{239}Np , ^{141}Ce , ^{144}Ce , ^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{95}Zr , ^{95}Nb ja ^{99}Mo . Alfaspektrometrialla havaittiin plutoniumin, curiumin ja amerikumien isotooppeja. Beetaspektrometrialla hiukkasista havaittiin strontiumin ja yttriumin isotooppeja. Hiukkasista ei kuitenkaan havaittu isotooppeja, jotka esiintyvät kaasumaisina, tai joilla on matala kiehumispiste, kuten ^{131}I , ^{132}Te , ^{134}Cs ja ^{137}Cs . Ydinpolttoainehiukkasten on arvioitu syntyneen onnettomuuden ensimmäisen päivän aikana UO_2 -polttoaineen mekaanisen tuhoutumisen seurauksena, jolloin hiukkasia deponoitui reaktorin länsipuolelle. Seuraavien neljän päivän aikana tulipalojen aiheuttamassa korkeassa lämpötilassa ja happirikkaassa ilmassa ydinpolttoainehiukkasia hapettui ja deponoitui voimalan pohjoiselle, koilliselle ja eteläiselle alueelle. Ydinpolttoainehiukkaset laskeutuivat suurimmaksi osaksi ydinvoimalan lähialueelle, joskin yksittäisiä hiukkasia havaittiin eri puolilla Eurooppaa.

Viimeinen kategoria on niin sanotut kondensaatiohiukkaset, jotka muodostuivat, kun helposti vapautuvat radionuklidit, kuten jodin isotoopit ^{131}I ja ^{133}I , telluurin isotooppi ^{132}Te ja cesiumin isotoopit ^{134}Cs ja ^{137}Cs , tiivistyivät ilman aerosolihiukkasten tai maaperän hiukkasten pintaan. Radioaktiivisia aineita sisältäviä kondensaatiohiukkasia syntyi suuria määriä onnettomuuden ensimmäisen neljän päivän aikana tulipalojen korkean lämpötilan vuoksi. Kun tulipalot saatiin sammutettua, kondensaatiohiukkasia muodostui vähemmän. Suurin osa onnettomuuden kaukoluskeumasta koostui kondensaatiohiukkasista, jotka aiheuttivat suurimmat terveyshaitat väestölle, kuten jodinuklidien aiheuttama kilpirauhassyöpäriskin nousu. [12].

Fukushiman ydinvoimalaonnettomuudessa suurin osa syntyneistä radioaktiivisia aineita sisältävistä aerosolihiukkasista olivat jodin ja cesiumin isotooppien kondensaa-

tiohiukkasia ja ne muodostivatkin onnettomuuden merkittävimmän laskeuman [13]. Heikosti vapautuvia radionuklideja vapautui Tshernobyliin verrattuna huomattavasti vähemmän onnettomuusolosuhteista johtuen. Plutoniumin isotooppeja on kuitenkin havaittu niin kutsutuissa cesium-rikkaissa mikropartikkeleissa (engl. cesium-rich microparticles, CsMPs) [18].

Ydinaseräjätöksessä muodostuvien radioaktiivisia aineita sisältävien aerosolihiukkasten ominaisuudet, kuten koostumus ja kokojakauma, riippuvat vapautuvien radioaktiivisten aineiden kemiallisista ominaisuuksista, käytetystä pommista ja sen materiaalien ominaisuuksista, sekä räjäytyskorkeudesta.

Ydinräjäytyksen synnyttämässä tulipallossa lähes kaikki materiaalit höyrystyvät korkean lämpötilan vuoksi. Radioaktiivisia aineita sisältävä pilvi nousee nopeasti korkealle ilman ollessa huomattavasti ympäröivää ilmaa kuumempi. Kuitenkin jo minuutin sisällä räjäytyksestä tulipallon lämpötila laskee, jolloin materiaalit ja fissiotuotteet, joilla on korkea sulamispiste, tiivistyvät muodostaen aerosolihiukkasia. Esimerkiksi plutoniumin isotoopeilla on korkea sulamispiste ja ne tiivistyvät aikaisin aerosolihiukkasiin. Muut fissiotuotteet ja materiaalit tiivistyvät aerosolihiukkasten pinnalle myöhemmin lämpötilan laskettua lisää. Radioaktiiviset aineet, jotka esiintyvät tyypillisesti kaasumaisina tai joilla on kaasumainen emonuklidi, tiivistyvät aerosolihiukkasiin viimeisenä. Tällaisia radioaktiivisia aineita ovat esimerkiksi ^{90}Sr , ^{137}Cs ja ^{131}I .

Muodostuneiden aerosolihiukkasten koostumukseen vaikuttaa myös räjäytyskorkeus. Korkealla ilmakehässä suoritetuissa ydinräjäytyksissä höyrystyneet fissio- ja aktivoitumistuotteet, sekä pommimateriaalit tiivistyvät pääasiassa kondensaatiohiukkasiksi. Lähellä maata tehdyissä ydinräjäytyksissä tulipallo imaisee itseensä ympäristöstä materiaaleja, kuten maaperää, jolloin muodostuvat aerosolihiukkaset ovat tyypillisesti suurempia. [19]

3.3 Radioaktiivisia aineita sisältävien aerosolihiukkasten käyttäytyminen ja laskeuma

Aerosolihiukkasten liikkeeseen ilmassa vaikuttaa sääolosuhteiden lisäksi useita tekijöitä, kuten Brownin liike, diffuusio, impaktio, maan vetovoima ja sähköinen vetovoima [11].

Brownin liike aiheuttaa aerosolihiukkasten epäsäännöllistä ja satunnaista liikettä,

joka johtuu aerosolihiukkasten törmäyksistä ilman kaasumolekyylien kanssa. Brownin liikkeen aiheuttamaa keskineliösiirtymää x_{rms} ajan t kuluessa kuvaa yhtälö

$$x_{rms} = \sqrt{2Dt}, \quad (8)$$

jossa D on diffuusiokerroin. Aerosolihiukkasen diffuusiokerroin on kääntäen verrannollinen aerosolihiukkasen halkaisijaan d , toisin sanoen diffuusiokerroin on sitä suurempi, mitä pienempi aerosolihiukkanen on. Brownin liikkeen vaikutuksesta tapahtuu diffuusiota, jonka seurauksena aerosolihiukkaset ja kaasut siirtyvät kohti aluetta, jossa niiden pitoisuus on pienempi. Erityisesti lyhyillä kulkeutumisaikavälillä diffuusio aiheuttaa aerosolihiukkasten deponoitumista, eli kiinnittymistä, pinnoille. Deponoituneet aerosolihiukkaset voivat nousta takaisin ilmaan, jolloin puhutaan resuspensiosta.

Impaktiolla tarkoitetaan aerosolihiukkasten liikettä, kun aerosolihiukkasia kuljettavan ilmavirtauksen tiellä on este. Ilmavirtaus kiertää esteen, mutta ilman mukana kulkeutuvat aerosolihiukkaset eivät välttämättä inertiansa vaikutuksesta pysty muuttamaan liikkeensä suuntaa ilmavirtauksen mukana vaan törmäävät, eli impaktoituvat, esteeseen. Impaktion todennäköisyys kasvaa aerosolihiukkasen halkaisijan ja ilman virtausnopeuden kasvaessa, toisin sanoen impaktio vaikuttaa enemmän suurempiin ja tiheämpiin aerosolihiukkasiin.

Ilman aerosolihiukkasten liikkeeseen vaikuttaa myös maan vetovoima. Maan vetovoiman vaikutus aerosolihiukkasen liikkeeseen on suoraan verrannollinen hiukkasen halkaisijan neliön d^2 ja hiukkasen tiheyden p tuloon. Maan vetovoimalla on siis suurempi vaikutus suurempiin ja tiheämpiin aerosolihiukkasiin.

Ilman radioaktiivisia aineita sisältävät aerosolihiukkaset voivat varautua sähköisesti radioaktiivisen hajoamisen aiheuttaman itsevarautumisen vuoksi. Aerosolihiukkaset voivat varautua myös törmäämällä ilmassa esiintyviin ioneihin. Samaan aikaan aerosolihiukkaset voivat myös menettää varauksensa törmäämällä vastakkaismerkkisesti varautuneisiin ioneihin. Erittäin aktiivisilla hiukkasilla voi olla itsevarautumisen vuoksi suuri sähkövaraus. Ionisoivan säteilyn seurauksena ilmassa saattaa kuitenkin olla korkea ionipitoisuus, joten voimakkaassa säteilykentässä aerosolihiukkaset voivat menettää varauksensa nopeasti. Sähköisen vetovoiman vaikutus aerosolihiukkasen liikkeeseen on suoraan verrannollinen hiukkasen varaukseen q ja kääntäen verrannollinen hiukkasen halkaisijaan d . Sähköisen vetovoiman vaikutus on siis vahvempi,

mitä pienempi aerosolihiukkanen on ja mitä suurempi varaus sillä on. Hyvin pienillä aerosolihiukkasilla liikettä dominoi kuitenkin Brownin liike ja diffuusio ja suurilla aerosolihiukkasilla maan vetovoima ja impaktio. Sähköisellä vetovoimalla on merkittävimmin vaikutus sellaisten aerosolihiukkasten liikkeeseen, joiden halkaisija on $0,1\text{--}1\ \mu\text{m}$. [11]

Aerosolihiukkasten liikkeeseen vaikuttavien tekijöiden vuoksi erikokoiset aerosolihiukkaset siirtyvät ilmasta maahan ja pinnoille eri nopeuksilla. Suuremmat aerosolihiukkaset deponoituvat maahan nopeammin kuin pienemmät aerosolihiukkaset. Suuret aerosolihiukkaset laskeutuvat usein maahan lähellä onnettomuuspaikkaa niin kutsuttuna lähilaskeumana. Kaukolaskeuma koostuu pääasiassa pienistä aerosolihiukkasista, jotka voivat kulkeutua ilmakehässä kuukausien ja vuosien aikana useiden tuhansien kilometrien päähän onnettomuuspaikasta.

Aerosolihiukkasten laskeuma voidaan jaotella myös märkä- ja kuivalaskeumaan. Kuivalaskeumalla tarkoitetaan tilannetta, jossa aerosolihiukkaset kulkeutuvat hyvin lähelle pintaa deponoituen sille edellä mainittujen tekijöiden vaikutuksesta. Märkälaskeumalla tarkoitetaan sateen, sumun tai lumen mukana tapahtuvaa aerosolihiukkasten deponoitumista maahan. Kaasumaiset aineet voivat liueta pisaroihin ollessaan sadepilvessä tai sen alapuolella. Sadepilven alapuolella sijaitsevat aerosolihiukkaset koaguloituvat, eli törmäävät ja takertuvat, putoaviin pisaroihin. Lumisateen yhteydessä aerosolihiukkanen voi toimia tiivistymisytimenä lumikiteelle. Märkälaskeuma tuo aerosolihiukkasia huomattavasti tehokkaammin maahan kuin kuivalaskeuma.

Myös ydinaseräjätöksissä muodostuneiden aerosolihiukkasten koko ja muoto määräävät niiden laskeuman. Riippuen räjäytyksen korkeudesta ja voimakkuudesta, aerosolihiukkaset jaetaan kolmeen ryhmään. Suuremmat aerosolihiukkaset nousevat aluksi radioaktiivisen pilven mukana, mutta putoavat jo vuorokauden kuluessa maahan aiheuttaen lähilaskeuman mahdollisesti satojen kilometrien alueella räjäytyspaikan tuulen suunnan ja muiden sääolosuhteiden vaikutuksesta. Pienemmät aerosolihiukkaset voivat nousta troposfääriin yläkerroksiin, jossa ne voivat viipyä joitain viikkoja tullen lopulta sateen mukana alas. Jos räjäytys on tarpeeksi voimakas, voivat pienet aerosolihiukkaset nousta stratosfääriin, josta ne laskeutuvat maahan vasta vuosien kuluttua räjäytyksestä. [19] 1950- ja 1960-luvuilla ilmakehässä suoritettujen ydinasekokeiden laskeuma aiheuttaa edelleen vuosittaista efektiivistä säteilyannosta suomalaisille, joskin osuus kokonaisannoksesta on tänä päivänä hyvin pieni [6].

3.4 Radioaktiivia aineita sisältävien aerosolihiukkasten kokojakauma

Radioaktiivia aineita sisältävien aerosolihiukkasten kokojakaumaa kuvataan useiden suureiden avulla. Aerodynaamisella halkaisijalla tarkoitetaan sellaisen pallomaisen hiukkasen halkaisijaa, jonka tiheys on 1 g/m^3 . Aerodynaaminen halkaisija esitetään usein mikrometreinä. Aerosolihiukkasilla, joilla on sama aerodynaaminen halkaisija, voi olla erilainen muoto, koko ja tiheys, mutta niiden laskeutumisnopeus on sama. Aerosolihiukkasen kokoa voidaan kuvata myös aktiivisuusmediaanihalkaisijalla (AMD), joka tarkoittaa, että puolet aktiivisuudesta on hiukkasissa, joiden halkaisija on pienempi kuin aktiivisuusmediaanihalkaisija. Aktiivisuusmediaanihalkaisija esitetään usein aerodynaamisen halkaisijan avulla, jolloin puhutaan aerodynaamisesta aktiivisuusmediaanihalkaisijasta (AMAD), joka tarkoittaa aerodynaamista halkaisijaa, jota pienemmissä hiukkasissa on puolet aktiivisuudesta. [11]

Aerosolihiukkasten kokojakaumat voidaan jakaa karkeasti neljään eri moodiin, jotka on esitelty taulukossa 3. Nukleaatiomoodin ja Aitken-moodin aerosolihiukkasia kutsutaan myös ultrahienoiksi (engl. ultrafine) aerosolihiukkasiksi. Aerosolihiukkasten massa- ja pinta-alapitoisuudet ovat yleensä suurimmat akkumulaatiomoodin (engl. accumulation mode) hiukkasissa. Aerosolihiukkasia, joiden aerodynaaminen halkaisija on suurempi kuin akkumulaatiomoodin aerosolihiukkasten, kutsutaan karkeiksi hiukkasiksi (engl. coarse particles). Karkeilla hiukkasilla on usein lyhyt elinikä ilmakehässä maan vetovoiman vaikutuksesta, ja ne laskeutuvat nopeasti maahan tai pinnoille kuiva- tai märkälaskeumana. Ultrahienoilla aerosolihiukkasilla laskeutumisnopeuteen vaikuttaa vahvasti Brownin liike. Pienet aerosolihiukkaset voivat myös koaguloitua ja muodostaa suurempia aerosolihiukkasia, siirtyen akkumulaatiomoodiin. Akkumulaatiomoodin aerosolihiukkasilla on pisin elinikä ilmassa. [20]

| Moodi | Halkaisija (μm) |
|--------------|---------------------------------|
| Nukleaatio | 0,001–0,01 |
| Aitken | 0,01–0,1 |
| Akkumulaatio | 0,1–1 |
| Karkea | 1– |

Taulukko 3. Aerosolihiukkasten kokojakaumien eri moodit.[20]

Taulukossa 4 on esitetty Euroopassa kokeellisesti määritettyjä geometrisia keskiarvoja Tshernobylin ydinvoimalaonnettomuudessa syntyneiden radioaktiivisia aineita sisältävien aerosolihiukkasten aerodynaamisille halkaisijoille. Halkaisijat on määritetty alipainekaskadi-impaktoreilla, lukuun ottamatta Reineking ym. (1987) [21] tutkimusta, jossa hyödynnettiin myös suuren volyymin kaskadi-impaktoria. Taulukosta nähdään, että radioaktiivisia aineita sisältävien aerosolihiukkasten kokojakaumat vastasivat hyvin toisiaan, lukuun ottamatta radionuklidia ^{131}I sisältäviä aerosolihiukkasia, jotka olivat tyypillisesti pienempiä. Radionuklidia ^{131}I sisältävien aerosolihiukkasten erilaisen kokojakauman arvioidaan johtuvan siitä, että ^{131}I :ia havaittiin suuria määriä kaasumaisena (60-85% havaitusta ^{131}I :sta oli kaasumaisena [22]). Kulkeutumisen aikana kaasumaisen ^{131}I :n uskotaan adsorpoituneen paikallisten aerosolihiukkasten pintaan, toisin kuin radionuklidien ^{137}Cs , ^{132}Te ja ^{103}Ru , joiden arvioidaan vapautuneen hiukkasina ja sitoutuneen aerosolihiukkasiin jo onnettomuuden alkuvaiheilla. Tästä syystä ^{131}I :ia sisältävät aerosolihiukkaset ovat tyypillisesti pienempiä ja niiden kokojakaumissa voi esiintyä bi- tai trimodaalisuutta riippuen missä vaiheessa kulkeutumista radionuklidi on tiivistynyt aerosolihiukkasen pintaan [22], [21], [23]. Taulukon perusteella Tshernobylistä päästöpilven mukana kulkeutuneiden radioaktiivisia aineita sisältävien aerosolihiukkasten aerodynaamiset halkaisijat ovat $< 1 \mu\text{m}$ ja ne kaikki kuuluvat akkumulaatiomoodiin.

Taulukossa 5 on esitetty kokeellisesti määritettyjä tuloksia Fukushima ydinvoimalaonnettomuudessa syntyneiden radioaktiivisia aineita sisältävien aerosolihiukkasten aerodynaamisille aktiivisuusmediaanihalkaisijoille, AMAD. Kokojakaumat on määritetty alipainekaskadi-impaktoreilla, lukuun ottamatta Doi ym. (2013) [24] tutkimusta, jossa hyödynnettiin suuren volyymin kaskadi-impaktoria. Samoin kuin Tshernobylin kokojakaumien tapauksessa, myös Fukushima tapauksessa ^{131}I :ia sisältävien aerosolihiukkasten kokojakaumat ovat pienempiä. Miyamoto ym. (2014) [25] keräsivät ja analysoivat Fukushima ydinvoimalaonnettomuudesta syntyneitä aerosolihiukkasia 114 km päässä ydinvoimalasta, Tokaissa, alkaen 6 päivää onnettomuuden tapahduttua. Tämän keräyksen uskotaan olevan aikaisin suhteellisen lähellä suoritettu ilmanäytekeräys [25], [14]. Kerättyjen radioaktiivisia aineita sisältävien aerosolihiukkasten AMAD:it olivat $> 1 \mu\text{m}$ ja lukeutuivat karkeisiin hiukkasiin. Sen sijaan myöhemmin ja kauempaa onnettomuusalueelta kerättyjen radioaktiivisia aineita sisältävien aerosolihiukkasten AMAD:it olivat $< 1 \mu\text{m}$ ja ne kuuluivat akkumulaatiomoodiin.

Crocker ym. (1966) [26] karakterisoivat ydinaseräjätöyksissä vapautuvien aerosolihiukkasten fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia. Raportti koostettiin osana DASA:n (Defence Atomic Support Agency) koontia, jonka pohjana oli muun muassa yli 200 lähdedokumenttia liittyen ydinasekokeiluihin alkaen 1960-luvulta. Raportin mukaan korkealla ilmakehässä suoritetuissa ydinaseräjätöyksissä syntyvien radioaktiivisia aineita sisältävien aerosolihiukkasten halkaisija on tyypillisesti alle $20 \mu\text{m}$. Vastaavasti matalalla ilmakehässä, torneissa tai maanpinnalla tehdyissä räjätöyksissä aerosolihiukkasten kokojakauma vaihtelee muutamasta mikrometristä useisiin satoihin tai tuhansiin. Kokojakauma riippuu vahvasti ympäristön ominaisuuksista, kuten maaperän materiaaleista, sekä räjätöyskorkeudesta.

Kirjallisuuden perusteella säteilyvaaratilanteissa syntyneet ja päästöpilven mukana kulkeutuneet radioaktiivisia aineita sisältävät aerosolihiukkaset kuuluvat pääasiassa akkumulaatiomoodin aerosolihiukkasiin, joiden aerodynaaminen halkaisija on $0,1\text{--}1 \mu\text{m}$. Radioaktiivisia aineita sisältävät aerosolihiukkaset sisältävät tyypillisesti isotooppeja ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{103}Ru , ^{106}Ru ja ^{131}I . Kirjallisuudessa esiteltyt aerosolihiukkaset on pääasiassa kerätty kaukana onnettomuuspaikasta, useiden päivien tai kuukausien kuluttua onnettomuudesta. Miyamoto ym. (2014) [25] määrittämien kokojakaumien perusteella voidaan olettaa, että ydinvoimalaonnettomuuden lähialueella radioaktiivisia aineita sisältävistä aerosolihiukkasista merkittävä osuus voi kuulua karkeisiin hiukkasiin, joiden aerodynaaminen halkaisija on $> 1 \mu\text{m}$. Hiukkasmaisina esiintyvistä radioaktiivisista aineista poiketen jodi voi esiintyä sekä kaasumaisena, että aerosolihiukkasiin sitoutuneena. Jodi voi sitoutua aerosolihiukkasiin kulkeutumisen eri vaiheissa ja sen kokojakauma on tyypillisesti pienemmissä aerodynaamisissa halkaisijoissa, riippuen siitä milloin jodi on tiivistynyt. Ydinaseräjätöyksissä syntyvät radioaktiivisia aineita sisältävät aerosolihiukkaset ovat keskimäärin suurempia kuin ydinvoimalaonnettomuuksissa, ja niiden halkaisija voi olla useita kymmeniä tai satoja mikrometrejä. Yleisesti suuret aerosolihiukkaset kuitenkin laskeutuvat maan vetovoiman vaikutuksesta nopeasti lähilaskeumana räjätöysalueen lähetyville. Radioaktiivisen päästöpilven kannalta merkittävin kokojakauma on akkumulaatiomoodi, joihin kuuluvilla aerosolihiukkasilla on pisin elinikä ilmassa.

Taulukko 4. Kokeellisesti määritettyjen Tshernobylin ydinvoimalaonnettomuudessa syntyneiden radioaktiivisia aineita sisältävien aerosolihiukkasten aerodynaamisten halkaisijoiden geometriset keskiarvot DG .

| Sijainti | Ajankohta | Radionuklidi | DG (μm) | Lähde | |
|---------------------|---------------------|------------------------|------------------------|--|--|
| Wien, Itävalta | 30.4.–2.5. 1986 | ^{131}I | 0,5 | Tschiersch ja Georgi (1987) [22] | |
| | | ^{103}Ru | 0,5 | | |
| München, Saksa | 2.5.–7.5.1986 | ^{131}I | 0,35 | | |
| | | ^{103}Ru | 0,65 | | |
| | 6.5.1986 | ^{131}I | 0,45 | | |
| | | ^{103}Ru | 0,5 | | |
| 7.5.1986 | ^{131}I | 0,45 | | | |
| | ^{103}Ru | 0,55 | | | |
| Hannover, Saksa | 2.–5.5.1986 | ^{131}I | 0,6 | | |
| | | ^{103}Ru | 0,8 | | |
| 5.5.–7.5.1986 | | ^{131}I | 0,5 | | |
| | | ^{103}Ru | 0,8 | | |
| Helgoland, Saksa | 4.–6.5.1986 | ^{103}Ru | 0,85 | | |
| Göttingen, Saksa | 30.4.–18.6. 1986 | ^{103}Ru | 0,79* | Reineking ym. (1987) [21] | |
| | | $^{103}\text{Ru}^{**}$ | 0,93* | | |
| | | ^{131}I | 0,59* | | |
| | | $^{131}\text{I}^{**}$ | 0,613* | | |
| | | ^{137}Cs | 0,83* | | |
| | | $^{137}\text{Cs}^{**}$ | 0,86* | | |
| Helsinki, Suomi | 7.–5.1986 | ^{103}Ru | 0,83 | Kauppinen ym. (1986) [23] | |
| | | ^{131}I | 0,33 | | |
| | | ^{131}Te | 0,93 | | |
| | 9.–12.5.1986 | | ^{103}Ru | 0,63 | |
| | | | ^{131}I | 0,36 | |
| | | | ^{137}Cs | 0,63 | |
| | 12.–14.5.1986 | | ^{103}Ru | 0,65 (1,7) | |
| | | | ^{131}I | 0,57 (2,0) | |

*AMAD

** Aerodynaaminen halkaisija määritetty suuren volyymin kaskadi-impaktorilla.

Taulukko 5. Kokeellisesti määritettyjä Fukushima ydinvoimalaonnettomuudessa syntyneiden radioaktiivisia aineita sisältävien aerosolihiukkasten aerodynaamisia aktiivisuusmediaanihalkaisijoita (AMAD).

| Sijainti | Ajankohta | Radionuklidi | AMAD (μm) | Lähde |
|--------------------|---------------------|---------------------------|------------------------|----------------------------------|
| Tokai, Japani | 17.3.–1.4. 2011 | $^{129\text{m}}\text{Te}$ | 1,5 | Miyamoto ym.(2014) [25] |
| | | ^{131}I | 0,45 | |
| | | ^{134}Cs | 1,5 | |
| | | ^{136}Cs | 1,6 | |
| | | ^{137}Cs | 1,5 | |
| | | 9.–13.5.2011 | ^{134}Cs | 0,94 |
| | | ^{137}Cs | 0,94 | |
| Tsukuba, Japani | 4.–11.4.2011 | ^{131}I | 0,7* | Doi ym. (2013) [24] |
| | | ^{134}Cs | 1,8* | |
| | | ^{137}Cs | 1,5* | |
| | 14.–21.4.2011 | ^{131}I | 0,7* | |
| | | ^{134}Cs | 1,0* | |
| | | ^{137}Cs | 1,0* | |
| Tsukuba, Japani | 28.4.–12.5. 2011 | ^{134}Cs | 0,54 | Kaneyasu et al.(2012) [27] |
| | | | 0,23 | |
| | | ^{137}Cs | 0,67 | |
| | | | 0,53 | |
| | 12.–26.2011 | ^{134}Cs | 0,23 | |
| | | | 0,67 | |
| | | ^{137}Cs | 0,63 | |
| | | | 0,63 | |

*AMAD määritetty suuren volyymin kaskadi-impaktorilla.

4 Radon sisäilmassa

Radon on sisäilmassa esiintyvä radioaktiivinen jalokaasu, jonka on todettu lisäävän riskiä sairastua keuhkosityöpään. Erityisesti keuhkosityöpäriskiä kasvattaa radonin lyhytikäisten hiukkasina ilmassa esiintyvien hajoamistuotteiden kulkeutuminen hengitysilman mukana elimistöön. Hajoamistuotteet tarttuvat hengityselimistön pinnoille, toisin kuin radon, joka poistuu kehosta uloshengityksen mukana. Suomalaisissa asunnoissa voi olla korkea radonpitoisuus johtuen Suomen kylmästä ilmastosta, rakennusten perustamistavasta ja tiiviydestä, sekä tavallista enemmän uraania sisältävästä maanperästä. [28] Suomalaisen keskimääräisestä efektiivisestä säteilyannoksesta vuodessa yli puolen, eli 4 mSv, arvioidaan tulevan sisäilman radonista [6].

4.1 Radonkaasu

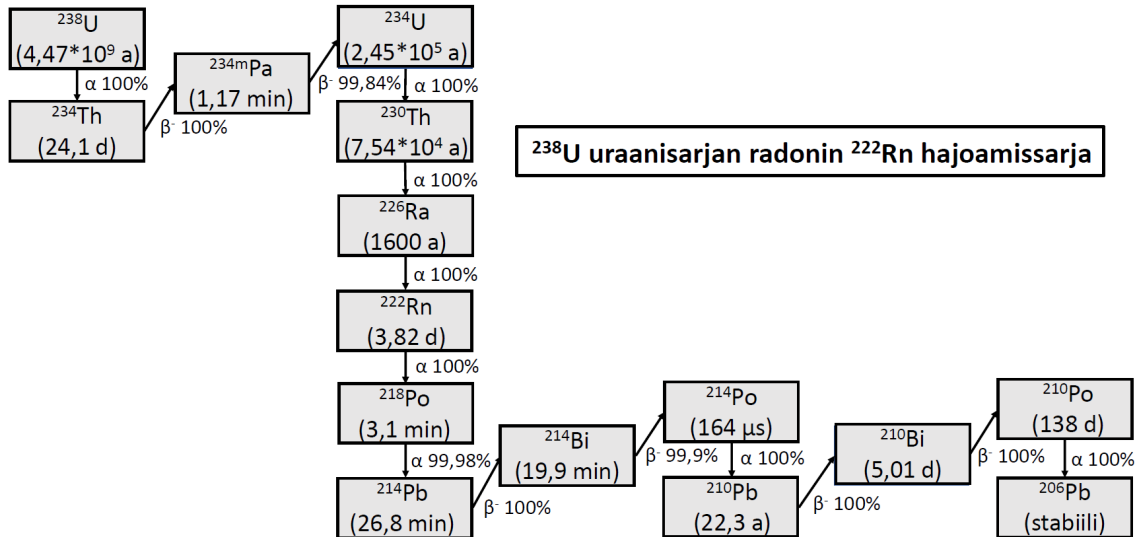
Radonia syntyy kallio- ja maaperässä uraanin isotooppien ^{238}U ja ^{235}U ja toriumin ^{232}Th hajoatessa useiden vaiheiden kautta stabiileiksi lyijyn isotoopeiksi ^{206}Pb , ^{207}Pb ja ^{208}Pb . Radonin eri isotoopit ovat hajoamissarjojensa ainoat kaasut. Tyypillisesti puhuttaessa radonista, tarkoitetaan (^{238}U) uraanisarjan ^{222}Rn :ia ($T_{1/2} = 3,82$ d). Muita isotooppeja ovat (^{232}Th) toriumisarjan ^{220}Rn , eli toron ($T_{1/2} = 56$ s) ja (^{235}U) aktiniumisarjan ^{219}Rn , eli aktinon ($T_{1/2} = 3,96$ s), joita kuitenkin esiintyy huoneilmassa hyvin vähän niiden lyhyiden puoliintumisaikojen vuoksi. Puhuttaessa radonista, tarkoitetaan yleensä juuri uraanisarjan ^{222}Rn -isotooppia.

Radon kulkeutuu maaperästä ilmavirtausten mukana asuintiloihin riippuen maaperän läpäisevyydestä, sisä- ja ulkoilman välisestä paine-erosta ja lattian rakojen aiheuttamasta virtausvastuksesta. Sisäilman radonpitoisuus vaihtelee vuorokausittain ja vuodenaikojen välillä. Radonpitoisen ilman virtaus maaperästä sisätiloihin lisääntyy, kun sisä- ja ulkolämpötilaero kasvaa, jolloin myös sisä- ja ulkoilman välinen paine-ero kasvaa. Tästä syystä talvisin on korkeampi radonpitoisuus kuin kesäisin, samoin kuin öisin on korkeampi radonpitoisuus kuin päivisin.

Radonin aktiivisuuspitoisuuden C SI-yksikkö on becquereliä kuutiometrissä (Bq/m^3). Radonin aktiivisuuspitoisuutta kutsutaan radonpitoisuudeksi. [28]

4.2 Radonin hajoamistuotteet

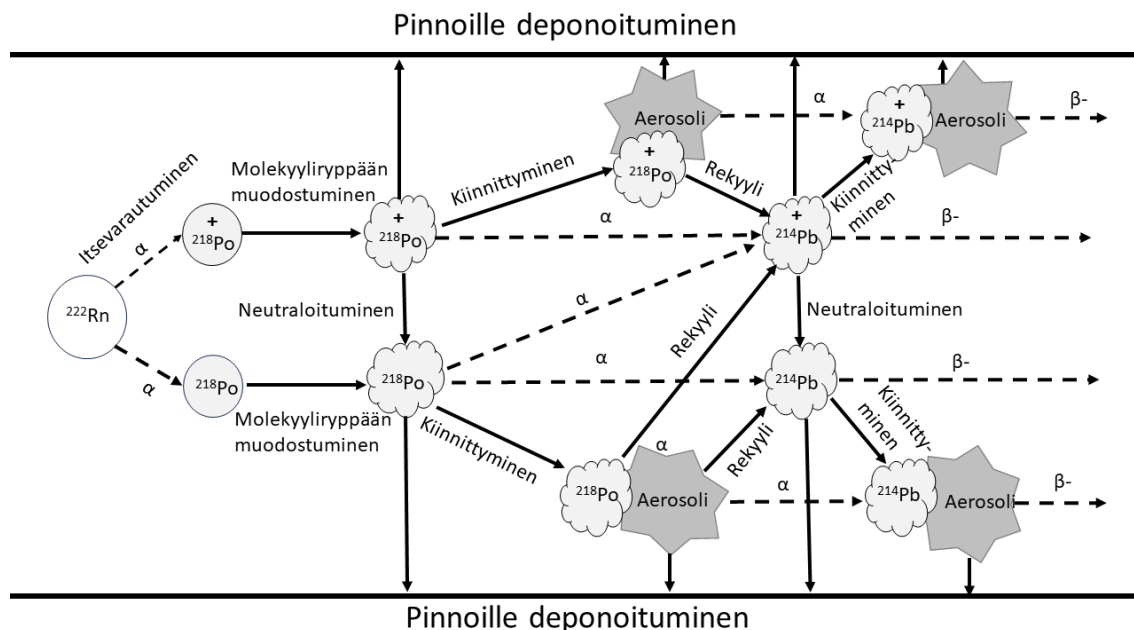
Radonkaasu hajoaa poloniumin ($Z = 84$), vismutin ($Z = 83$) ja lyijyn ($Z = 82$) isotoopeiksi. Uraanisarjan ^{222}Rn :in hajoamissarja on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Uraanisarjan radonin (^{222}Rn) hajoamissarja. Mukailleen lähteestä [19].

Radonin hajoamistuotteet ovat olomuodoltaan huoneilmassa kiinteitä ja esiintyvät ilmassa kahdessa eri muodossa, kiinnittymättöminä sekä aerosolihiukkasiin kiinnittyneinä. Radonin hajoamistuotteet reagoivat nopeasti ilmassa höyryjen ja kaasujen kanssa ja muodostavat molekyyliyrppäitä. Diffuusion vaikutuksesta muodostuneet molekyyliyrppäät törmäävät ilman aerosolihiukkasiin ja kiinnittyvät niihin. Radonin hajoamistuotteet voivat myös irrota aerosolihiukkasista. Alfa-aktiivisten hajoamistuotteiden, kuten ^{218}Po :n, hajotessa tytärytimen, ^{214}Pb :n, rekyylienergia voi olla tarpeeksi suuri, että se irtoaa aerosolihiukkasesta, johon sen emoydin oli kiinnittynyt. Beetahajoamisen yhteydessä rekyylienergia ei riitä aerosolihiukkasesta irrottautumiseen. [11] Radonin hajoamistuotteiden prosesseja sisäilmassa esitellään kuvassa 5.

Karkeasti jaoteltuna radonin kiinnittymättömät hajoamistuotteet ovat kooltaan alle $0,01 \mu\text{m}$ molekyyliyrppäissä ja kiinnittyneet yli $0,01 \mu\text{m}$ aerosolihiukkasissa. Yuness et al. (2016) [29] määrittä radonin hajoamistuotteiden aerodynaamiset aktiivisuusmediaanihalkaisijat hajoamistuotteiden kiinnittymättömälle ja kiinnittyneelle osuudelle. Kiinnittymättömien ^{218}Po :ta sisältävien hiukkasten AMAD oli $0,00128 \mu\text{m}$. ^{214}Pb :ta sisältävien hiukkasten kiinnittymättömien hajoamistuotteiden AMAD oli



Kuva 5. Radonin hajoamistuotteiden prosessit ilmassa, esimerkkinä hajoamistuotteet ^{218}Po ja ^{214}Pb . Mukailleen lähteestä [14].

$0,0013 \mu\text{m}$ ja kiinnittyneiden osuuden $0,343 \mu\text{m}$, ^{214}Bi :tä sisältävien kiinnittyneiden hajoamistuotteiden AMAD oli $0,38 \mu\text{m}$. ICRP:n referenssiarvot radonin hajoamistuotteiden aerodynaamiselle aktiivisuusmediaanihakaisijalle ovat nukleaatiomoodissa $0,03 \mu\text{m}$ ja akkumulaatiomoodissa $0,25 \mu\text{m}$ sisätyöpaikoilla [30].

Kiinnittyneiden ja kiinnittymättömien hajoamistuotteiden keskinäiseen tasapainoon sisäilmassa vaikuttaa sisäilman hiukkaspitoisuus. Jos sisäilman hiukkaspitoisuus on korkea, on kiinnittymättömien hajoamistuotteiden osuus pienempi ja päinvastoin.

Hajoamistuotteiden aktiivisuuspitoisuudet voidaan ilmoittaa samoissa yksiköissä kuin radonin aktiivisuuspitoisuus. Kuitenkin yleisesti on järkevämpää kuvata ilmassa olevien hajoamistuotteiden seoksen ja radonin aktiivisuuspitoisuuden suhdetta. Radonin hajoamistuotteiden aktiivisuuspitoisuus ilmoitetaan yleensä potentiaalisena alfaenergiapitoisuutena (engl. potential alpha energy concentration, *PAEC*), joka tarkoittaa tilavuusyksikössä ilmaa olevien lyhytikäisten hajoamistuotteiden alfahajoamisissa vapautuvaa energiamäärää, kun jokainen atomeista on hajonnut ^{210}Pb :ksi. Potentiaalisen alfaenergiapitoisuuden *PAEC* SI-yksikkö on joulea kuutiometrissä (J/m^3). Hajoamistuotepitoisuus *EEC* (engl. Equilibrium Equivalent Concentration) on radonpitoisuus kerrottuna tasapainosuhteella. Hajoamistuotepitoisuuden SI-yksikkö on becquereliä kuutiometrissä (Bq/m^3).

Radonin kiinnittymättömien hajoamistuotteiden osuutta kaikista hajoamistuotteista kuvataan suhteella f_p yhtälön

$$f_p = \frac{PAEC_u}{PAEC_s} = \frac{EEC_u}{EEC_s} \quad (9)$$

mukaisesti. Yhtälössä alaindeksi u tarkoittaa kiinnittymättömien hajoamistuotteiden osuutta ja s kaikkia hajoamistuotteita. Vastaavasti hajoamistuotepitoisuuden ja radonin aktiivisuuspitoisuuden suhdetta kuvataan tasapainokertoimella F [28] seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$F = \frac{PAEC_s}{C} = \frac{EEC_s}{C}. \quad (10)$$

5 Ilmanpuhdistusteknologiat

Sisäilmastolla tarkoitetaan rakennusten ympäristötekijöitä, jotka vaikuttavat ihmisen terveyteen sekä viihtyvyyteen. Tällaisia ympäristötekijöitä ovat esimerkiksi lämpö- ja kosteusolosuhteet ja allergeenit, eli ilmassa olevat eloperäiset hiukkaset (siite- ja eläinpölyt, sieni-itiöt). Näihin ympäristötekijöihin lukeutuvat myös kaasumaiset ja hiukkasmaiset epäpuhtaudet, jotka ovat peräisin esimerkiksi tupakoinnista, rakennusmateriaaleista, ihmisten toiminnasta, sekä maaperästä ja rakennusmateriaaleista peräisin olevasta radioaktiivisuudesta. [31]

Sisäilman epäpuhtauksia voidaan vähentää kolmella tavalla. Ensisijaisesti olisi pyrittävä poistamaan epäpuhtauksien lähteet, esimerkiksi asianmukaisilla rakennusmateriaaleilla, tupakoimalla ulkona, sekä puhdistamalla rakennukset biologisista epäpuhtauksista säännöllisesti. Seuraava strategia on tuuletus, eli ilmanvaihto ulkoilman kanssa, jos ulkoilma on puhdasta. Ilmanpuhdistus on kolmas strategia, jota hyödynnetään, jos kaksi edellistä eivät ole parantaneet sisäilmanlaatua vaaditulle tasolle.

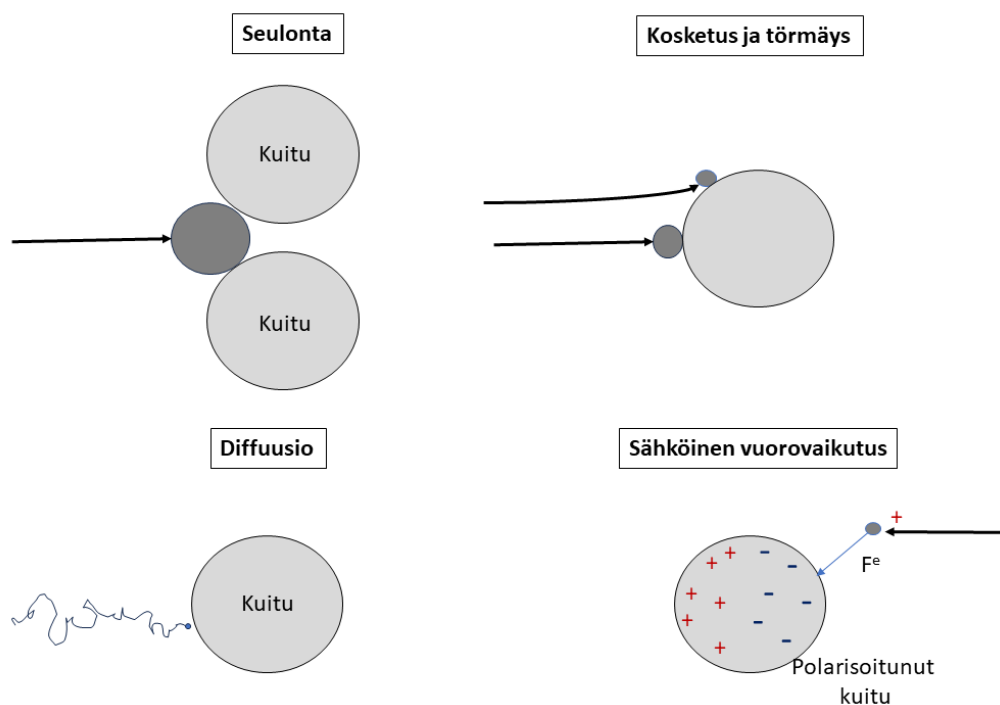
Ilmanpuhdistimet ovat laitteita, joilla pyritään poistamaan epäpuhtaudet sisäilmasta. Ilmanpuhdistimet voidaan rakentaa osaksi rakennuksen ilmanvaihtoa. Vaihtoehtoisesti voidaan hyödyntää ilmanpuhdistimia, joilla puhdistetaan tietty tila tai huone. Ilmanpuhdistimilla yleensä kerätään epäpuhtaudet sisäilmasta, joskin joidenkin puhdistimien puhdistusteknologia perustuu epäpuhtauksien tuhoamiseen, vahingoittamiseen tai muuntamiseen. [32]

Tässä kappaleessa keskitytään kaupallisesti saatavilla oleviin siirrettäviin ilmanpuhdistimiin ja niiden yleisimpiin ja työn kannalta tärkeimpiin ilmanpuhdistusteknologioihin.

5.1 Mekaaninen suodatus

Kuitusuodattimet keräävät aerosolihiukkasia mekaanisesti ilmavirtauksen kulkiessa suodatinmateriaalin läpi. Kuitusuodattimien keräystehokkuuteen vaikuttavat monet tekijät, kuten kuitujen määrä ja läpimitta, ilman virtausnopeus, aerosolihiukkasten koko ja suodatinmateriaalin ja aerosolihiukkasten ominaisuudet.

Jos aerosolihiukkasen halkaisija on suurempi kuin kuitumateriaalien kuitujen välinen etäisyys, jäävät ne kiinni kuitumateriaalin pintaan. Tätä kutsutaan seulonnaksi. Suuret ja tiheet aerosolihiukkaset voivat myös impaktoitua kuituihin, jos ne eivät inertiansa vuoksi pysy kuitujen ohi kiertävän ilmavirran mukana. Kosketusvaikutuksella tarkoitetaan tilannetta, jossa pienet aerosolihiukkaset kulkevat ilmavirran mukana niin läheltä kuidun pintaa, että deponoituvat siihen. Pienet aerosolihiukkaset voivat myös deponoitua kuitujen pinnalle Brownin liikkeen ja diffuusion seurauksena. Joissain tapauksissa kuitumateriaalit ovat sähköisesti varattuja, jolloin ne vetävät puoleensa tai hylkivät ilman varautuneita aerosolihiukkasia. [33] Kuvassa 6 on esitetty edellä mainitut erotusmenetelmät.



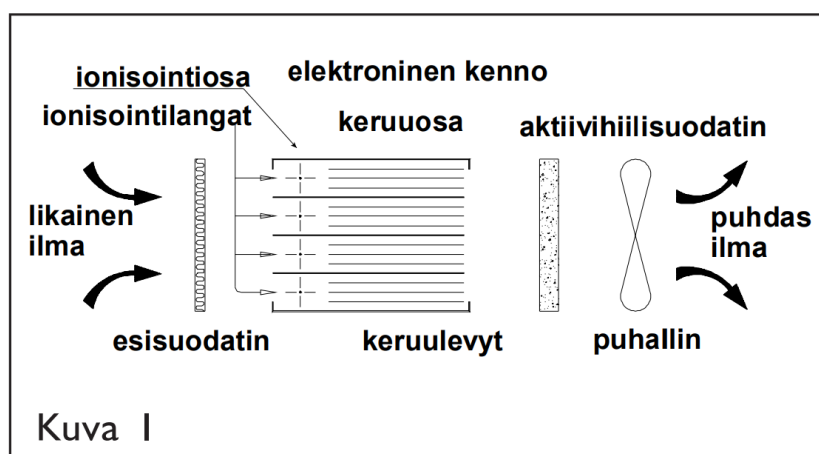
Kuva 6. Kuitusuodattimien keräysmenetelmät. Mukailten lähteestä [33].

Kuitusuodattimien pitää noudattaa Euroopassa ISO-16890-standardia. Korkean suodatustason suodattimet, eli HEPA (High Efficiency Particulate Air) ja ULPA (Ultra

Low Particulate Air), jaetaan suodatustason mukaan eri luokkiin. Luokka määritetään sen mukaan kuinka tehokkaasti suodatin pysäyttää kaikkein tunkeutuvimpia hiukkasia (engl. MPPS, Most Penetrating Particle size), joiden halkaisija on 0,1–0,25 μm . Kaupallisissa siirrettävissä kuitusuodattimia hyödyntävissä ilmanpuhdistimissa käytetään usein luokan H13 suodattimia. H13-luokan suodatin pysäyttää 99,95 % tehokkuudella MPPS-kokoluokan hiukkaset. [34]

5.2 Sähköstaattinen suodatus

Sähköstaattinen suodatus perustuu ilman aerosolihiukkasten ionisointiin sähkökentässä. Ilma kulkee suodattimessa ionisoivan osan läpi, jossa ilman molekyylit törmäävät elektroneihin ja saavat positiivisen varauksen (positiivinen varaaminen on yleisempää vähäisemmän otsonituoton vuoksi). Varautuneet molekyylit kiinnittyvät edelleen aerosolihiukkasiin. Varautuneet aerosolihiukkaset kulkeutuvat seuraavaksi keräysalueelle. Positiivisesti varatut levyt hylkivät positiivisesti varautuneita aerosolihiukkasia, jotka kerääntyvät negatiivisesti varatuille keruulevyille. Kun hiukkaset ovat asettuneet levyille, kasaantuvat ne molekyylien välisten voimien vaikutuksesta. Kuvassa 7 on esitetty sähköstaattisen ilmanpuhdistimen (Elixair E400) toimintaperiaate



Kuva 7. Sähköstaattisen ilmanpuhdistimen (Elixair E400) toimintaperiaate. Kuva lähteestä [35].

Keruulevyt täytyy pestä säännöllisesti, jotta sähköstaattisen ilmanpuhdistimen keräystehokkuus säilyy. Sähköstaattisissa ilmanpuhdistimissa hyödynnetään usein myös esisuodatinta ennen laitteen ionisoivaa osaa, millä kerätään suurimmat hiukkaset. Lisäksi puhdistajissa on usein aktiivihiilisuodatin poistamassa hajuja ja kaasuja.

Aktiivihiili on yleisin esimerkki adsorptiivasta materiaalista. Adsorptio on prosessi, jossa kaasun tai nesteen nuklidit, ionit tai molekyylit kiinnittyvät materiaalin pintaan sähköisen vetovoiman vaikutuksesta. Adsorptioprosessin tehokkuuteen vaikuttaa erityisesti komponentin pinta-ala ja materiaalin ominaisuudet. Adsorptiomateriaalit tuotetaan usein rakeisiksi tai jauheiksi, jotta materiaalin pinta-ala on mahdollisimman suuri. Adsorptiivisia materiaaleja käytetään pääasiassa hajujen, kaasujen ja kemikaalien poistoon. Aktiivihiili on suosittu adsorptiomateriaali, koska sillä on korkea huokoisuus, suuri sisäinen pinta-ala ja se on materiaalina turvallinen ja edullinen. [36]

6 Mittauslaitteisto ja mittaukset

Ilmanpuhdistimien kykyä suodattaa radioaktiivisia aineita sisältäviä aerosolihiukkasia tutkittiin 45 tuntia kestäneessä mittauskampanjassa 22.–24.5.2023 välisenä aikana Jyväskylän yliopiston fysiikan laitoksen tiloissa. Tässä kappaleessa esitellään mittauksissa käytetty laitteisto, rakennettu koeasetelma, sekä suoritettut mittaukset.

6.1 Mittauslaitteisto

6.1.1 AlphaGUARD P30

Koetilan radonpitoisuutta mitattiin Saphymo GmbH (nykyään Bertin Technologies) AlphaGUARD P30 -radonilmaisimella. AlphaGUARD P30 on radonilmaisim, jonka toiminta perustuu pulssi-ionisaatiokammioon. Ilmaisimessa on sylinterimäinen 0,56 l ionisaatiokammio, jonka käyttöjännite on +750 V. Radonkaasu kulkeutuu diffuusion välityksellä lasikuitusuodattimen läpi ionisaatiokammioon. Vain kaasumainen radon pääsee suodattimen läpi, toisin kuin radonin pienhiukkasina ilmassa esiintyvät hajoamistuotteet, jotka pysähtyvät suodattimeen. Suodatin suojaa ionisaatiokammiota myös ilman muilta epäpuhtauksilta, kuten pölyltä. Radonpitoisuuden lisäksi AlphaGUARD P30 mittaa myös koetilan ilmasto-olosuhteita, eli ilman lämpötilaa, suhteellista kosteutta ja ilmanpainetta. [37] Mittausten aikana ilmaisinta käytettiin jatkuvaan radonpitoisuusmittaukseen 10 min mittausjaksoilla diffuusiomoodissa. Diffuusiomoodilla tarkoitetaan, ettei ilmaa imetty ionisointikammioon erillisellä pumpulla.

AlphaGUARD P30 -radonilmaisimen mittaamista arvoista radonin aktiivisuuspitoisuus C lasketaan ISO-11665-5:2020-standardin [38] mukaisesti kaavalla

$$C = (\mu - \mu_0) \cdot \omega, \quad (11)$$

jossa μ on mitattu aktiivisuuspitoisuus, μ_0 taustasignaali ja ω ilmaisimen kalibrointikerroin. Radonmittauksissa, joissa käytetään ionisaatiokammiota, täytyy ottaa huomioon laitteen eliniän aikana ionisaatiokammioon kerääntyvästä aktiivisuudesta

aiheutuva taustasignaali. Mittauksissa käytetty AlphaGUARD P30 -radonilmaisim on kalibroitu 14.1.2021 Säteilyturvakeskuksen toimesta, jolloin ilmaisimelle määritettiin taustasignaali $\mu_0 = 5,9 (\pm 10,4)$ Bq/m³ ja kalibroitikerroin $\omega = 1,005 (\pm 0,031)$ diffuusiomoodissa 10 min mittausjaksoille (epävarmuuskerroin $k = 1$).

Radonpitoisuuden C epävarmuus δC lasketaan ISO-11665-5:2020-standardin mukaisesti kaavalla

$$\delta C = \sqrt{\omega^2 \cdot (\delta\mu^2 + \delta\mu_0^2) + C^2 \cdot \left(\frac{\delta\omega}{\omega}\right)^2}, \quad (12)$$

jossa $\delta\mu$ on mitatun pitoisuuden statistinen epävarmuus, $\delta\mu_0$ taustasignaalin epävarmuus ja $\delta\omega$ kalibroitikertoimen epävarmuus.

6.1.2 Tracerlab BWLM-PLUS-2S

Tracerlab BWLM-PLUS-2S -ilmaisimella mitattiin radonin hajoamistuotteiden aktiivisuuspitoisuuksia huoneilmassa. Tracerlab pystyy keräämään radonin kiinnittyneet ja kiinnittymättömät hajoamistuotteet kahdella erilaisella kerääjällä. Toisessa kerääjässä on metalliverkko. Koska ultrahienojen aerosolihiukkasten (halkaisija alle 0,1 μm) liikkumista dominoi diffuusio, kerää metalliverkko tehokkaammin radonin kiinnittymättömiä hajoamistuotteita. Toisessa kerääjässä on suodatin, joka kerää sekä kiinnittyneitä, että kiinnittymättömiä hajoamistuotteita. Hajoamistuotteiden aktiivisuuden Tracerlab mittaa metalliverkosta ja suodattimesta pii-puolijohdeilmaisimella. Tracerlab-ilmaisim ilmoittaa radonin hajoamistuotteiden potentiaalisen alfaenergia-pitoisuuden $PAEC$ ja hajoamistuotepitoisuuden EEC kiinnittyneiden ja kiinnittymättömien hajoamistuotteiden summalle ja kiinnittymättömille hajoamistuotteille. [39] Ilmaisinta käytettiin jatkuvaan mittaukseen slow-metodilla 10 min sykleillä koko mittauskampanjan ajan.

Mittauksissa käytetty ilmaisim on kalibroitu laitevalmistajan toimesta 9.2.2022. Kalibroinnissa kalibroitikertoimelle ω on määritetty kaksi arvoa, $\omega_s = 0,9 (\pm 0,03)$, joka on hajoamistuotteiden summan kalibroitikerroin ja $\omega_u = 1,26 (\pm 0,075)$, joka on kiinnittymättömien osuuden kalibroitikerroin (epävarmuuskerroin $k = 1$).

Tracerlabilla mitatuista arvoista lasketaan hajoamistuotepitoisuus EEC myös ISO 11665-5:2020-standardin mukaisesti kaavalla 11. Tracerlabin tapauksessa taustasignaalia μ_0 ei oteta huomioon, koska hajoamistuotteiden aktiivisuudet mitataan suodattimelta ja metalliverkolta, jotka vaihdetaan säännöllisesti. Kalibroitikertoi-

met on myös viety laitteen asetuksiin, jolloin $\omega_u = \omega_s = 1$ ja kaava 11 saadaan muotoon

$$EEC = \omega \cdot (\mu - \mu_0) = \mu. \quad (13)$$

Kaava 13 pätee kiinnittymättömien ja kiinnittyneiden hajoamistuotteiden summan hajoamistuotepitoisuudelle EEC_s ja kiinnittymättömien hajoamistuotteiden hajoamistuotepitoisuudelle EEC_u .

Kalibroitikertoimien epävarmuuksia ei ole otettu huomioon laitteen määrittämässä statistisessa epävarmuudessa. Hajoamistuotepitoisuuksien epävarmuudet lasketaan myös ISO-11665-5:2020-standardin mukaisesti kaavalla

$$\delta EEC = \sqrt{\omega^2 \cdot \delta\mu^2 + EEC^2 \cdot \left(\frac{\delta\omega}{\omega}\right)^2}, \quad (14)$$

jolloin myös kalibroitikertoimien epävarmuudet otetaan huomioon.

6.1.3 RanidPro200

Bertin Environics RanidPro200-mittausrepulla, jossa on LaBr₃-ilmaisoin (Saint Gobain Brillance 38s38 LaBr₃) gammasäteilyn havaitsemiseen [40], seurattiin ilmanpuhdistimien välissä radonin hajoamistuotteen ²¹⁴Pb piikin 351,9 keV aikakäyttäytymistä mittausten aikana. Tarkasteluun valittiin radonin hajoamistuote ²¹⁴Pb, koska se on beeta-aktiivinen ja sillä on mittaussvälien (2–3 h) suhteen sopiva puoliintumisaika (26,8 min). ²¹⁴Pb on sopiva tarkasteluun myös, koska sen edeltäjä ²¹⁸Po on alfa-aktiivinen ja ²¹⁴Pb:n hajoamistuotteella ²¹⁴Bi ei ole merkittäviä gammapiikkejä. RanidPro200-mittausrepun mittaamasta gammaspektristä on määritetty summeerausmenetelmällä piikin pinta-ala A . Tuloksen luotettavuutta kuvaa suure piikkimerkitsevyys

$$S = \frac{A}{k_\alpha \sqrt{2N_B}}, \quad (15)$$

jossa k_α on asetettu riskiraja virheellisten positiivisten havaitsemille ja N_B määritetty tausta. Kun $k_\alpha = 4,753$, tulos $S > 1$ tarkoittaa yhtä virheellistä positiivista havaintoa miljoonasta havainnosta. Piikin pinta-alan A epävarmuutta arvioidaan kaavalla.

$$\delta A = \sqrt{A + 2N_B} = \sqrt{A + \left(\frac{A}{k_\alpha S}\right)^2}. \quad (16)$$

6.2 Ilmanpuhdistimet

Mittauksissa käytettiin kahta siirrettävää kaupallisesti saatavilla olevaa ilmanpuhdistinta, joiden suodatusteknologiat perustuivat eri mekanismeihin.

6.2.1 Electrolux EAP300

Ensimmäinen tutkituista ilmanpuhdistimista oli Electrolux EAP300. EAP300- ilmanpuhdistimen suodatus perustuu aktiivihiiliesuodattimeen ja HEPA13-suodattimeen. Laitevalmistajan mukaan aktiivihiiliesuodatin kerää suurikokoiset hiukkaset ja HEPA13-suodatin 99,99 % hiukkasista, joiden halkaisija on $0,3 \mu\text{m}$ tai suurempi. Ilmanpuhdistin imee huoneilman sisään laitteen sivuilta ja puhaltaa puhdistetun ilman laitteen yläosassa olevasta ulostuloaukosta. Laitteessa on neljä eri nopeutta, sekä automaattinen ilmanpuhdistusasetus, jolla laite seuraa ilman epäpuhtauksien määrää ja säätää puhaltimen nopeutta sen mukaan. Laite soveltuu jatkuvaan, ympärivuorokautiseen käyttöön. Ilmanpuhdistimen suurin suositeltu huonekoko on 70 m^2 ja maksimi ilmavirta $335 \text{ m}^3/\text{h}$. [41] Mittausten aikana ilmanpuhdistinta operoitiin suurimmalla teholla.

6.2.2 Elixair E400

Toinen tutkituista ilmanpuhdistimista oli Elixair E400 sähköstaattinen ilmanpuhdistin. Elixair E400 imee huoneilman sisään etuosastaan ja puhaltaa puhdistetun ilman ulos laitteen takaosan tuulettimen kautta. Laitteessa on kaksi tehoa ja se on suunniteltu jatkuvaan, ympärivuorokautiseen käyttöön. Laitevalmistajan mukaan esisuodatin kerää ilmasta isot pölyhiukkaset, elektroninen kenno poistaa haitalliset pienhiukkaset ja aktiivihiiliesuodatin poistaa hajuja ja kaasuja. Laitteen suurin suositeltu huonekoko on 70 m^2 ja maksimi ilmavirta $400 \text{ m}^3/\text{h}$. [35] Mittausten aikana ilmanpuhdistinta operoitiin suurimmalla teholla.

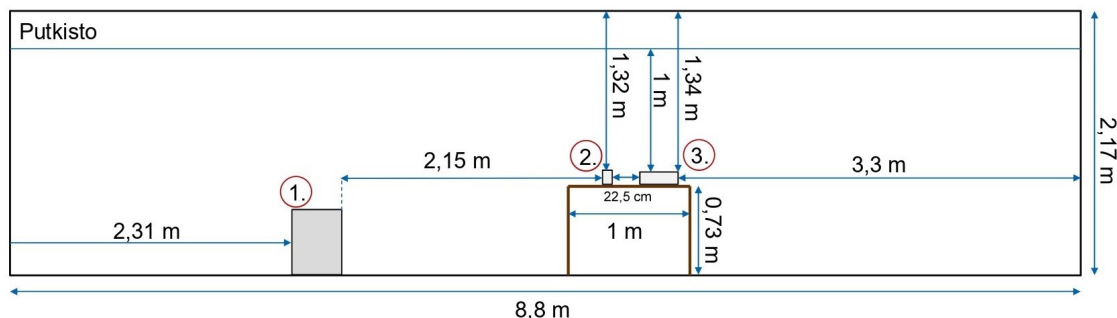
6.3 Koeasetelma

Mittauksia varten ei ollut mahdollista tehdä kokeita keinotekoisilla radioaktiivisilla aineilla, joten työn kokeellisessa osiossa hyödynnettiin luonnollisesti esiintyvää radonia ja radonin hajoamistuotteita simuloimaan säteilyvaaratilanteissa syntyviä radioaktiivisia aineita sisältäviä aerosolihiukkasia. Mittaukset suoritettiin Jyväskylän yliopiston fysiikan laitoksen tiloissa.

Tilan valitsemisessa harkittiin seuraavia seikkoja; tilan koko, radonpitoisuus, käyttöaste, sekä ilmanvaihto. Tärkein kriteeri oli radonpitoisuus. Pitoisuuden täytyi olla mahdollisimman korkea, jotta saataisiin suurin mahdollinen statistiikka. Mittausaika- taulun sekä radonilmaisimien saatavuuden vuoksi, mittaukset suoritettiin toukokuun lopulla, vaikka talviaikaan sisäilman radonpitoisuus on tyypillisesti korkeampi. Tila valittiin tekemällä AlphaGUARD P30 -radonmonitorilla lyhyitä mittauksia eri tiloissa fysiikan laitoksella. Tilan koon täytyi vastata mahdollisimman hyvin keskimääräistä asuintilan kokoa. Vähimmäispinta-ala Suomessa asuinhuoneelle on 7 m². Huonealaan ei lasketa tilaa, jonka huonekorkeus on alle 1,6 metriä ja asuinhuoneen vähimmäishuonekorkeus on tyypillisesti 2,5 metriä. [42] Tilan toivottiin olevan myös mahdollisimman vähällä käytöllä. Lisäksi tilassa oleva ilmastointi piti pystyä sulkemaan tai estämään kokonaan.



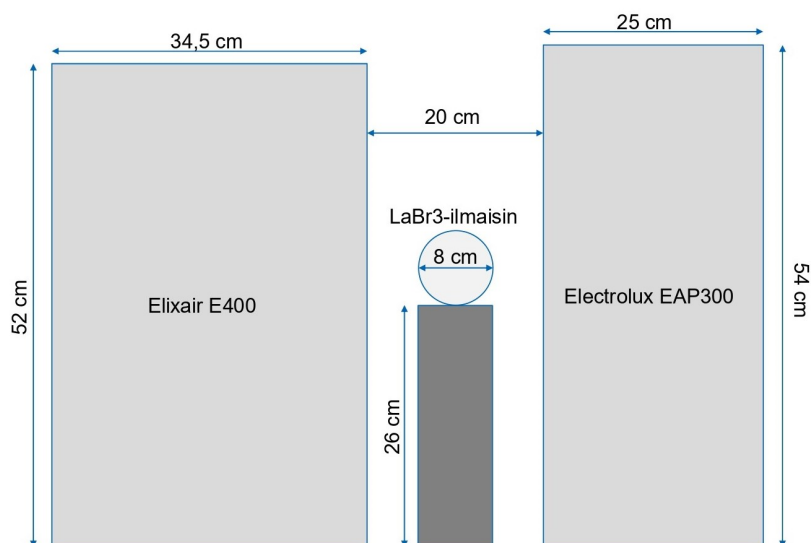
Kuva 8. Rakennettu koeasetelma eri kuvakulmista. Koeasetelmaan kuului 1. Elixair E400-ilmanpuhdistin 2. Electrolux EAP300-ilmanpuhdistin 3. LaBr₃-gamma-spektrometri 4. Tracerlab BWLM-PLUS-2S-ilmaisimen kiinnittymättömien hajoamistuotteiden kerääjä 5. Tracerlab BWLM-PLUS-2S-ilmaisimen kiinnittyneiden ja kiinnittymättömien hajoamistuotteiden kerääjä 6. AlphaGUARD P30-radonmittari. Oikeanpuoleisessa kuvassa on merkitty 7. suljettu ilmanvaihto. Vasemmanpuoleiseen kuvaan on merkitty ilmavirtauksen suunta ilmanpuhdistimissa, punainen nuoli vastaa puhdistajan keräämää ilmaa ja sininen nuoli ulospuhallettavaa puhdistettua ilmaa.



Kuva 9. Koeasetelma ja asetelman eri komponenttien keskinäiset etäisyydet. Koeasetelmaan kuului 1. Ilmanpuhdistimet, 2. Tracerlab BWLM-PLUS-2S-ilmaisimien ja kerääjät, ja 3. AlphaGUARD P30 -radonilmaisimien. Tilassa kulki putkia, joten kuvaan on merkitty erikseen laitteiston etäisyydet katosta, sekä putkistosta.

Koeasetelma rakennettiin putkitunneliin fysiikan ja kemian laitoksen välillä. Tunnelista rajattiin tilavuudeltaan noin 63 m^3 kokoinen tila ($8,8 \text{ m (L)} \times 2,17 \text{ m (K)} \times 3,32 \text{ m (S)}$) rakennusmuoveilla mahdollisimman tiiviiksi. Tilan huonekorkeus on tyyppillisen asuinhuoneen vähimmäishuonekorkeutta matalampi ($2,17 \text{ m}$), mutta huoneen pinta-ala (29 m^2) koettiin riittäväksi. Tilassa radonpitoisuus oli päivisin alhaisimmillaan keskimäärin 300 Bq/m^3 ja öisin korkeimmillaan lähes 1000 Bq/m^3 . Tilan radonpitoisuudet olivat korkeimmat, jotka fysiikan laitoksen tiloissa mitattiin, muissa mittauskohteissa radonpitoisuus pysyi alle toimenpiderajan 200 Bq/m^3 . Ilmanvaihtoa ei pystytty sulkemaan, mutta se estettiin mahdollisimman hyvin tiivistämällä. Tila ei ole yleisessä käytössä. Electrolux EAP300 -ilmanpuhdistin, ilmavirralla $335 \text{ m}^3/\text{h}$, kierrätti koetilan ilman noin 11 minuutissa ja Elixair E400-ilmanpuhdistin, ilmavirralla $400 \text{ m}^3/\text{h}$, reilussa 9 minuutissa.

Koetila, koeasetelma ja koeasetelman komponenttien dimensioidut ja etäisyydet toisistaan on esitetty kuvissa 8, 9 ja 10. Tracerlab BWLM-PLUS-2S-ilmaisimen kerääjät ja AlphaGUARD P30-radonmonitori asetettiin pöydälle lähelle 1 metrin korkeutta laitevalmistajien ohjeistuksen mukaan. RandidPro200-mittausreppun LaBr_3 -gamma-spektrometri asetettiin ilmanpuhdistimien väliin seuraamaan puhdistajien keräämän radonin hajoamistuotteen ^{214}Pb aikakäyttäytymistä.



Kuva 10. Ilmanpuhdistimien ja LaBr₃-gammasektrometrin dimensiot ja etäisyydet toisistaan

6.4 Mittaukset

Mittaukset suoritettiin 22.5.–24.5.2023 välisenä aikana 45 tuntia kestäneessä mittauskampanjassa. Mittausten aikana Electrolux EAP300 -ilmanpuhdistinta pidettiin päällä kaksi kertaa eri päivinä, samoin Elixair E400 -ilmanpuhdistinta. Kun toinen ilmanpuhdistin suljettiin, annettiin koetilan olosuhteiden kehittyä n. 2–3 tuntia, ennen kuin toinen ilmanpuhdistin laitettiin päälle. Koetilan olosuhteiden annettiin myös kehittyä myös yli mittauspäivien välissä. Mittausten välissä myös ilmanpuhdistimien sisään kertyneen radonin hajoamistuotteen ²¹⁴Pb aiheuttaman radioaktiivisuuden annettiin hajota. Mittausaikataulu on esitelty taulukossa 6.

Taulukko 6. Mittauskampanjan aikataulu

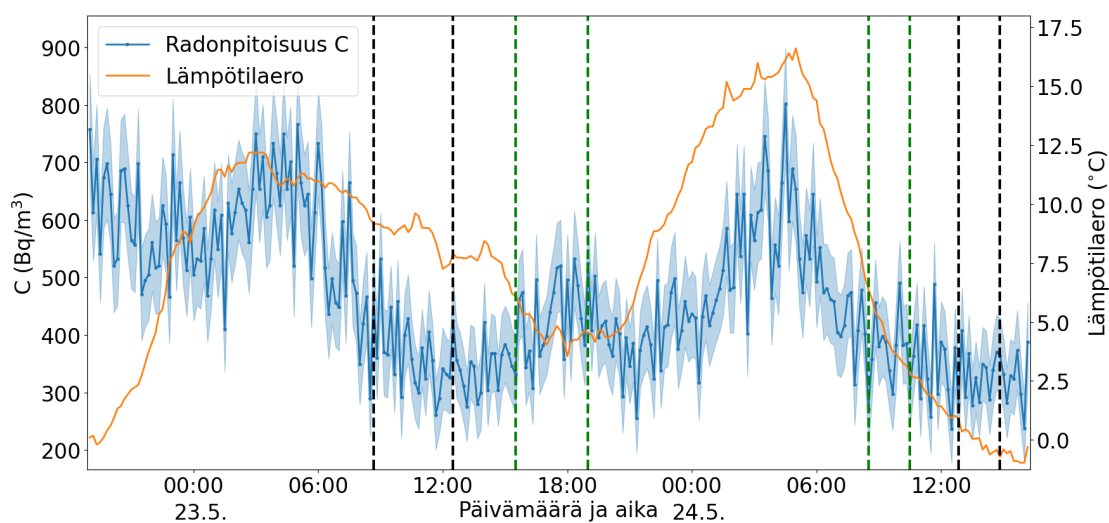
| Mittaus | Päivämäärä ja aika | Vaihe |
|------------------|----------------------------|--|
| | 22.5.2023 19:00 | Mittauskampanja alkoi |
| Mittaus 1 | 23.5.2023 8:53 12:28 | Electrolux EAP300 ON Electrolux EAP300 OFF |
| Mittaus 2 | 15:32 19:00 | Elixair E400 ON Elixair E400 OFF |
| Mittaus 3 | 24.5.2023 8:28 10:30 | Elixair E400 ON Elixair E400 OFF |
| Mittaus 4 | 12:47 14:50 16:10 | Electrolux EAP300 ON Electrolux EAP300 OFF Mittauskampanja päättyi |

7 Tulokset ja havainnot

7.1 Mittaustulokset

AlphaGUARD P30 -radonmonitorilla seurattiin mittauskampanjan aikana koetilan lämpötilaa T , ilmanpainetta p ja ilman suhteellista kosteutta RH . Sisälämpötilan keskiarvo (ja keskihajonta) mittauskampanjan aikana oli 22,2 (0,3) °C, ilmanpaineen 1006 (2) mbar ja ilman suhteellisen kosteuden 48 (2) %. Koetilan olosuhteet pysyivät siis suhteellisen vakioina koko mittauskampanjan ajan.

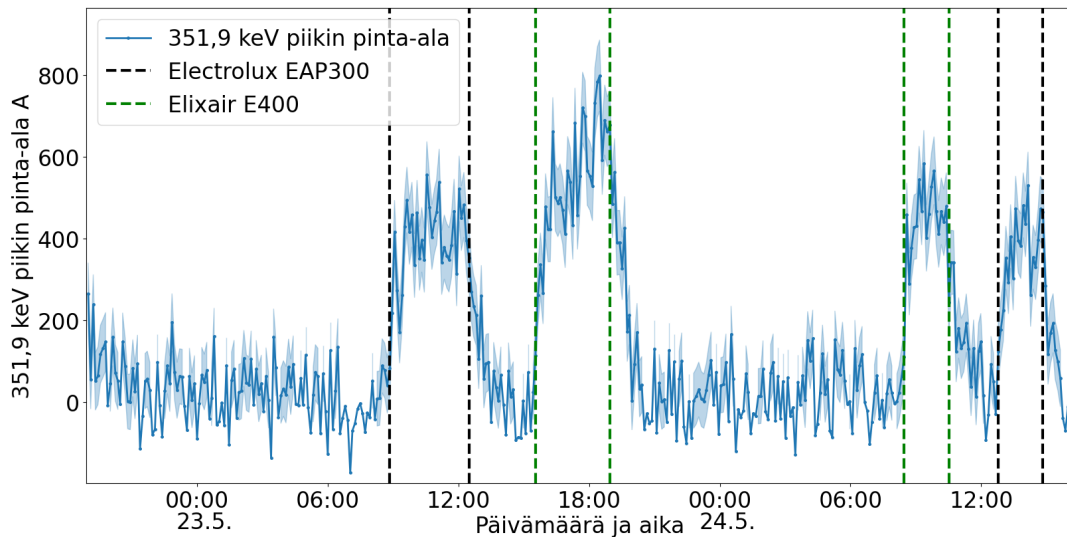
Kuvassa 11 on esitetty AlphaGUARD P30-radonmonitorilla mitatun radonpitoisuuden ja ulko- ja sisäilman välisen lämpötilaeron aikakäyttäytyminen mittauskampanjan aikana. Radonpitoisuus C on laskettu kaavalla 11 ja epävarmuus kaavalla 12. Ulkolämpötila on mitattu Ilmatieteen laitoksen säähavainnointiasemalla Jyväskylässä (Tikkakoski) ja haettu Ilmatieteen laitoksen verkkosivuilta [43]. Alkuperäisistä säähavainnoista on otettu 10 min havainnointiväleille keskiarvot. Mustilla katkoviivoilla merkitään mittauksia, joissa käytettiin Electrolux EAP300-ilmanpuhdistinta ja vihreillä katkoviivoilla mittauksia, joissa käytettiin Elixair E400-ilmanpuhdistinta.



Kuva 11. Radonpitoisuuden C ja sisä- ja ulkoilman välisen lämpötilaeron aikakäyttäytyminen mittauskampanjan aikana.

Kuvasta 11 nähdään, että koetilan radonpitoisuuden aikakäyttäytyminen seuraa ulko- ja sisätilan lämpötilaeron aikakäyttäytymistä karkeasti. Ilmanpuhdistimien toiminnalla ei ollut siis merkittävää vaikutusta radonpitoisuuteen.

Kuvassa 12 on esitetty radonin hajoamistuotteen ^{214}Pb gammaenergia-piikin 351,9 keV, pinta-alan A aikakäyttäytyminen, joka on määritetty RanidPro200-mittausrepun LaBr_3 -gammaskpektrometrilla mitatuista gammaskpektreistä summeerausmenetelmällä. Epävarmuus pinta-alalle on määritetty kaavalla 16. Kuvaajasta nähdään, että 351,9 keV piikin pinta-ala kasvaa nopeasti ilmanpuhdistimien ollessa päällä ja palaa takaisin taustan tasolle, kun ilmanpuhdistimet sammutetaan ja niiden keräämä radioaktiivinen ^{214}Pb hajoaa. Tämän perusteella voidaan sanoa, että ilmanpuhdistimet keräävät hajoamistuotteita, joskin vielä ei voida arvioida, ovatko ne keränneet sekä kiinnittyneitä, että kiinnittymättömiä hajoamistuotteita.



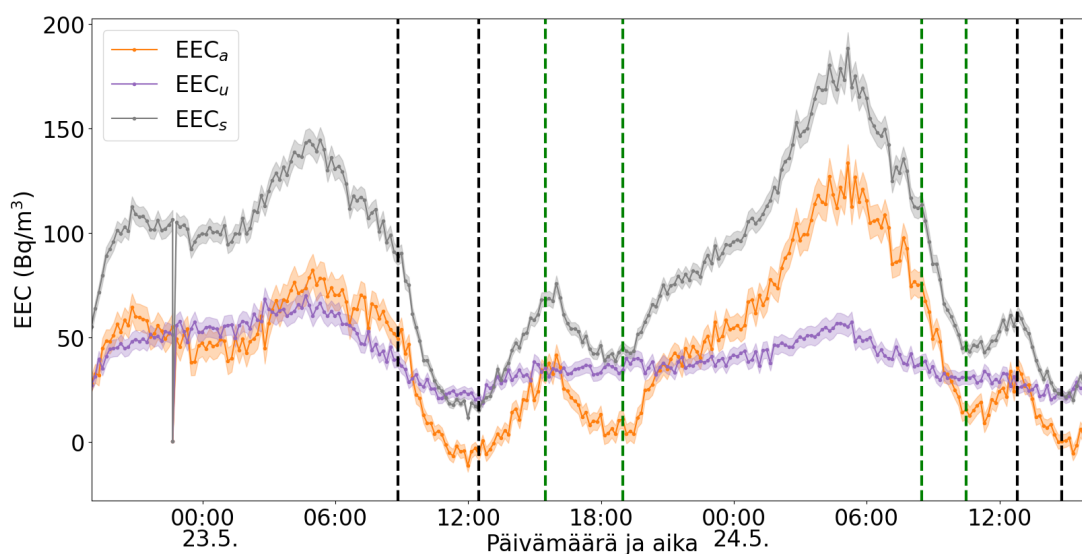
Kuva 12. 351,9 keV (^{214}Pb) piikin pinta-alan aikakäyttäytyminen mittauskampanjan aikana.

Tracerlab BWLM-PLUS-2S-ilmaisimella mitatuista radonin hajoamistuotepitoisuuksista on määritetty kaavalla 13 kiinnittyneiden ja kiinnittymättömien summan hajoamistuotepitoisuus EEC_s ja kiinnittymättömien hajoamistuotteiden hajoamistuotepitoisuus EEC_u . Hajoamistuotepitoisuuksien epävarmuudet on laskettu kaavalla 14. Lisäksi tuloksista arvioitiin kiinnittyneiden hajoamistuotteiden hajoamistuotepitoisuutta EEC_a vähentämällä summan hajoamistuotepitoisuudesta EEC_s kiinnittymättömien hajoamistuotteiden hajoamistuotepitoisuus EEC_u . Epävarmuus on

laskettu yleisen virheen etenemislain [44] mukaisesti kaavalla

$$\delta EEC_a = \sqrt{(\delta EEC_s)^2 + (\delta EEC_u)^2}. \quad (17)$$

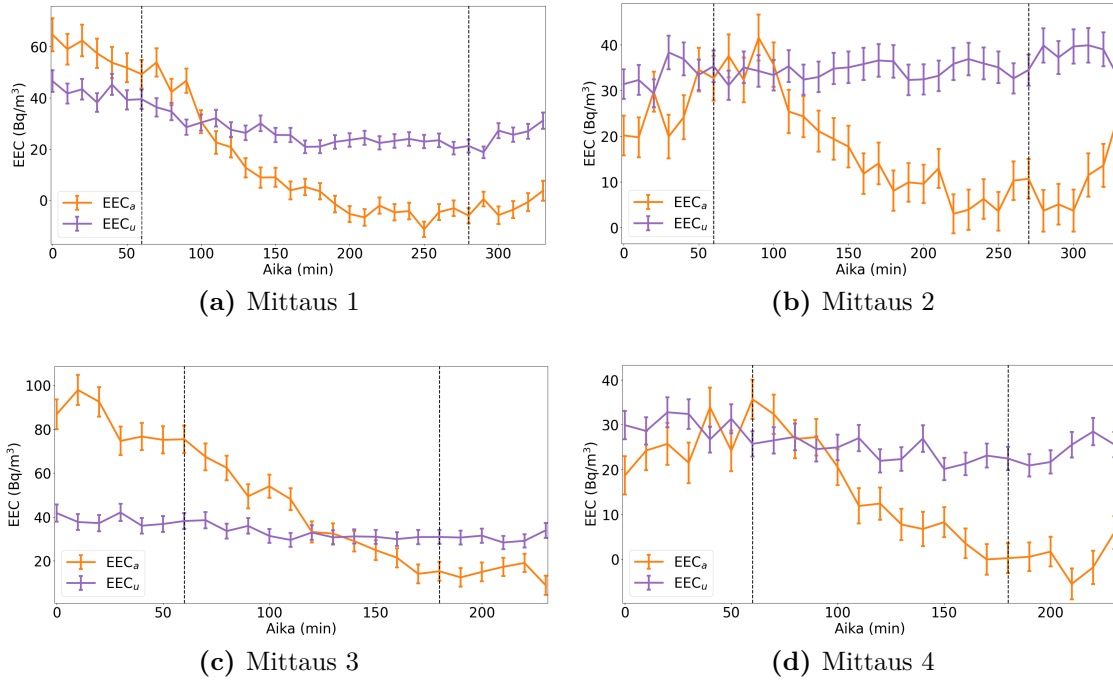
Kuvassa 13 on esitetty hajoamistuotepitoisuuksien EEC_a , EEC_u ja EEC_s aikakäyttäytyminen mittauskampanjan aikana. Kuvajista nähdään, että ilmanpuhdistimilla ei ole ollut radikaalia vaikutusta kiinnittymättömien hajoamistuotteiden hajoamistuotepitoisuuden EEC_u aikakäyttäytymiseen. Kiinnittymättömien hajoamistuotteiden hajoamistuotepitoisuus EEC_a sen sijaan laskee merkittävästi ilmanpuhdistimien käyttöaikoina. Hajoamistuotteiden summan hajoamistuotepitoisuuden EEC_s aikakäyttäytyminen seuraa varsin hyvin kiinnittymättömien hajoamistuotteiden hajoamistuotepitoisuuden EEC_a aikakäyttäytymistä, koska EEC_u on käytökseltään varsin tasainen. Ilmanpuhdistimet vaikuttavat siis keräävän pääasiassa radonin kiinnittyneitä hajoamistuotteita.



Kuva 13. Hajoamistuotepitoisuuksien EEC_a , EEC_u ja EEC_s aikakäyttäytyminen mittauskampanjan aikana.

Kuvissa 14 a–d on esitetty kiinnittyneiden hajoamistuotteiden ja kiinnittymättömien hajoamistuotteiden hajoamistuotepitoisuuksien EEC_a ja EEC_u aikakäyttäytyminen tarkemmin mitausten 1–4 aikana (katso myös Taulukko 6). Kuvista 14a ja 14c nähdään, että mitausten 1 ja 3 alkaessa kiinnittyneiden hajoamistuotteiden hajoamistuotepitoisuus oli huomattavasti suurempi kuin kiinnittymättömien hajoamistuotteiden. Tämä voi johtua siitä, että ennen mittauksia koeolosuhteet saivat

kehittyä varsin pitkään ilman häiriöitä. Kuvista 14b ja 14d huomataan, että mittauksissa 2 ja 4 sen sijaan kiinnittyneiden ja kiinnittymättömien hajoamistuotteiden hajoamistuotepitoisuudet ovat lähes yhtä suuret mittausten alussa. Toisin kuin mittauksissa 1 ja 3, mittaukset 2 ja 4 suoritettiin vain noin 2–3 h edellisten mittausten jälkeen.



Kuva 14. Kiinnittyneiden hajoamistuotteiden ja kiinnittymättömien hajoamistuotteiden hajoamistuotepitoisuuksien EEC_a ja EEC_u aikakäyttäytyminen mittauksissa 1–4.

| (Bq/m ³) | Mittaus 1 | Mittaus 2 | Mittaus 3 | Mittaus 4 |
|----------------------|------------|------------|------------|------------|
| $EEC_a(100\%)$ | 49 ± 6 | 33 ± 5 | 75 ± 7 | 36 ± 5 |
| $EEC_a(50\%)$ | 23 ± 5 | 12 ± 5 | 33 ± 5 | 12 ± 4 |
| t_{50} | 50 min | 100 min | 60 min | 50 min |
| $EEC_a(10\%)$ | 4 ± 4 | 3 ± 5 | - | 4 ± 4 |
| t_{10} | 100 min | 160 min | - | 100 min |

Taulukko 7. Ajat t , joissa EEC_a oli puoliintunut tai laskenut kertaluokalla.

Taulukossa 7 on esitetty aika t , jossa mittauksissa 1–4 kiinnittyneiden hajoamistuotteiden hajoamistuotepitoisuus EEC_a puoliintui tai oli vähentynyt kertaluokalla

sen jälkeen, kun tutkittava ilmanpuhdistin oli laitettu päälle. Mittauksissa 1 ja 4 hajoamistuotepitoisuus EEC_a on puoliintunut 50 minuutissa ja vähentynyt kertaluokalla 100 minuutissa. Mittauksessa 2 hajoamistuotepitoisuus EEC_a puoliintui 100 minuutissa ja aleni kertaluokalla 160 minuutissa. Mittauksessa 3 hajoamistuotepitoisuus EEC_a puoliintui 60 minuutissa, mutta mittausajan puitteissa EEC_a ei kerennyt vähentyä kertaluokalla. Tulosten perusteella Electrolux EAP300-ilmanpuhdistin keräsi radonin kiinnittyneitä hajoamistuotteita tehokkaammin kuin Elixair E400.

Kuvista 14 a–d nähdään, että kiinnittymättömien hajoamistuotteiden hajoamistuotepitoisuus EEC_u pysyi tasaisena mittausten 1–4 aikana. Hajoamistuotepitoisuuden EEC_u keskiarvot (ja keskihajonnat) mittauksissa 1–4 olivat 1. 27 (6), 2. 34 (3), 3. 33 (3) ja 4. 23 (3). Kiinnittymättömien hajoamistuotteiden hajoamistuotepitoisuudessa EEC_u ei siis tapahtunut ilmanpuhdistimien käytön johdosta merkittäviä muutoksia. Näin ollen tutkitut ilmanpuhdistimet eivät keränneet radonin kiinnittymättömiä hajoamistuotteita.

Kuvissa 15 a–d on esitetty tasapainosuhteen F aikakäyttäytyminen mittausten 1–4 aikana. Tasapainosuhte on laskettu kaavan 10 mukaisesti ja sen epävarmuus yleisen virheen etenemislain mukaisesti kaavalla

$$\delta F = \sqrt{\left(\frac{\delta EEC_s}{EEC_s}\right)^2 + \left(\frac{\delta C}{C}\right)^2}. \quad (18)$$

Lisäksi kuvissa esitetään kiinnittymättömien hajoamistuotteiden hajoamistuotepitoisuuden EEC_u ja radonpitoisuuden C välinen suhde F_u , joka on laskettu kaavalla

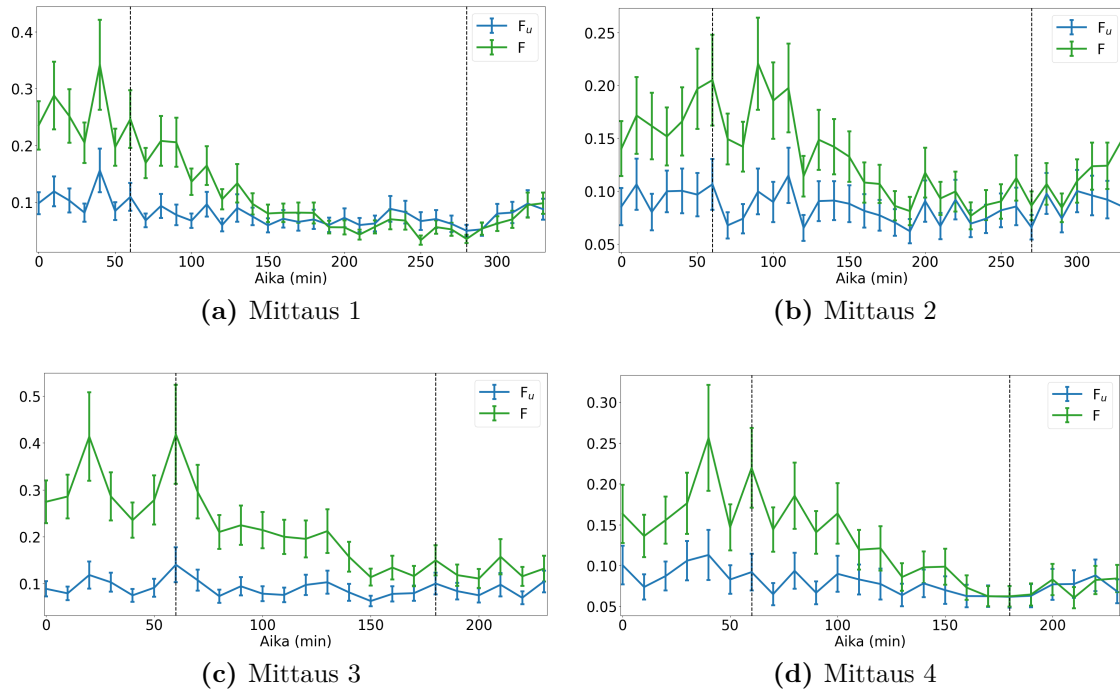
$$F_u = \frac{EEC_u}{C}, \quad (19)$$

ja epävarmuus suhteelle virheen yleisen etenemislain mukaisesti kaavalla

$$\delta F_u = \sqrt{\left(\frac{\delta EEC_u}{EEC_u}\right)^2 + \left(\frac{\delta C}{C}\right)^2}. \quad (20)$$

Kuvista 15a–d voidaan nähdä, että suhde F_u pysyy keskimäärin vakiona kaikkien mittausten ajan. Suhteen F_u keskiarvo (ja keskihajonta) mittauksissa 1–4 oli 1. 0,08 (0,02), 2. 0,09 (0,01), 3. 0,09 (0,02) ja 4. 0,08 (0,01) ja koko mittauskampanjan aikana 0,09 (0,02). Ilmanpuhdistimien toiminnalla ei siis ollut vaikutusta radonin tai kiinnittymättömien hajoamistuotteiden pitoisuuksien väliseen suhteeseen mittauskampanjan aikana. Mittausten loppupuolella tasapainosuhte F lähestyy F_u :ta,

mikä tukee aikaisempia havaintoja siitä, että ilmanpuhdistimet ovat keränneet tehokkaasti radonin kiinnittyneitä hajoamistuotteita ja sisäilmassa on pääasiassa enää kiinnittymättömiä hajoamistuotteita ja radonia.



Kuva 15. Tasapainosuhteen F ja suhteen F_u aikakäyttäytyminen mittauksissa 1–4.

7.2 Havainnot

Säteilyvaaratilanteissa syntyvät radioaktiivisia aineita sisältävät aerosolihiukkaset luokituvat kirjallisuuden perusteella pääasiassa akkumulaatiomoodin hiukkasiin, joiden halkaisija on $0,1\text{--}1\ \mu\text{m}$. Radonin kiinnittyneet hajoamistuotteet kuuluvat myös saman kokoluokan akkumulaatiomoodin hiukkasiin, jolloin seuraamalla niiden käytöstä sisäilmassa, voidaan approksimoida säteilyvaaratilanteissa syntyvien radioaktiivisia aineita sisältävien aerosolihiukkasten käytöstä vastaavissa olosuhteissa.

Ydinvoimalaonnettomuudessa tai maan pinnalla suoritettavan ydinaseräjättyksen yhteydessä syntyvässä päästöpilvessä on lähellä tapahtumapaikkaa myös karkeita hiukkasia, joiden halkaisija on $> 1\ \mu\text{m}$. Karkeat hiukkaset laskeutuvat maan vetovoiman vaikutuksesta nopeasti maahan lähilaskeumana. Varautumistoimenpiteet myös rajoittavat sisäilmaan tihkuvien aerosolihiukkasten kokojakaamaa. Useissa

kaupallisissa siirrettävissä ilmanpuhdistimissa on myös erillinen esisuodatin suurten hiukkasten keräämiseen.

Mittauskampanjan tuloksista nähdään, että tutkitut kaupalliset siirrettävät ilmanpuhdistimet keräävät tehokkaasti radonin kiinnittyneitä hajoamistuotteita sisäilmasta. Saatujen tulosten perusteella voidaan arvioida, että ilmanpuhdistimet keräävät tehokkaasti myös säteilyvaaratilanteissa syntyviä saman kokoluokan radioaktiivisia aineita sisältäviä aerosolihiukkasia. Tämän kokoluokan aerosolihiukkaset kuuluvat akkumulaatiomoodiin, mikä on dominoiva hiukkaskoko säteilyvaaratilanteissa. Toisin kuin koetilanteessa, jossa radonin kiinnittyneitä hajoamistuotteita syntyi jatkuvasti lisää sisäilmassa, säteilyvaaratilanteen aikana sisälle suojauduttaessa saman kokoluokan radioaktiivisia aineita sisältäviä aerosolihiukkasia ei muodostu vastaavalla tavalla lisää huonetilassa. Oletetaan, että ilmanpuhdistimien suodatusnopeus on suuri suhteessa puhdistettavaan tilaan ja nopeuteen, jolla radioaktiivisia aineita sisältäviä aerosolihiukkasia tihkuu sisäilmaan. Tästä seuraa, että säteilyvaaratilanteissa ilmanpuhdistimilla saavutettaisiin vähintään yhtä merkittävä vaikutus akkumulaatiomoodin radioaktiivisia aineita sisältävien aerosolihiukkasten aktiivisuuspitoisuuteen, kuin radonin kiinnittyneiden hajoamistuotteiden tapauksessa.

Ilmanpuhdistimien toiminnalla ei ollut huomattavaa vaikutusta kiinnittymättömien hajoamistuotteiden tai radonin aktiivisuuspitoisuuksiin mittausten aikana. Tulosten perusteella voidaan olettaa, että tutkitut ilmanpuhdistimet eivät myöskään keräisi säteilyvaaratilanteissa vapautuvia radioaktiivisia jalokaasuja, kuten ksenonia ja kryptonin, tai ultrahienoihin aerosolihiukkasiin sitoutuneita radioaktiivisia aineita. Hengityksen välityksellä aiheutuvan sisäisen annoksen kannalta jalokaasuilla on kuitenkin pieni merkitys, koska ne tarttuvat heikosti hengityselimistöön pinoille ja palaavat huoneilmaan uloshengityksen yhteydessä. Radioaktiivisia aineita sisältäviä ultrahienoja aerosolihiukkasia kirjallisuuden perusteella päästöpilvessä ei ole merkittävästi, koska ne muun muassa koaguloituvat herkästi suuremmiksi hiukkasiksi.

Ilmanpuhdistimien toiminnan vaikutusta hengityksen välityksellä saatavaan efektiiviseen säteilyannokseen sisälle suojautumisen yhteydessä voidaan tarkastella kaavan 7 avulla. Tarkastellaan esimerkiksi radionuklidia ^{137}Cs sisältäviä akkumulaatiomoodin aerosolihiukkasia. Jos oletetaan konservatiivisesti, että kaikki henkilön hengittämät radionuklidia ^{137}Cs sisältävät aerosolihiukkaset kiinnittyvät hengityselimistöön pinoille, tällöin saanto I on suoraan verrannollinen radionuklidia ^{137}Cs sisältävien aerosolihiukkasten aktiivisuuspitoisuuteen huonetilassa. Tällöin myös ra-

dionuklidia ^{137}Cs sisältävien aerosolihiukkasten hengityksen välityksellä aiheuttama efektiivinen säteilyannos on suoraan verrannollinen kyseisten aerosolihiukkasten aktiivisuuspitoisuuteen. Esimerkiksi aktiivisuuspitoisuuden aleneminen kertaluokalla vastaisi myös hengityksen kautta saatavan efektiivisen säteilyannoksen alenemistä kertaluokalla. Kaupallisten siirrettävien ilmanpuhdistimien voidaan täten olettaa vähentävän tehokkaasti hengityksen välityksellä kehoon pääsevistä radioaktiivisista akkumulaatiomoodiin kuuluvista aerosolihiukkasista saatavaa sisäistä efektiivistä annosta.

8 Johtopäätökset

Tässä pro gradu -tutkielmassa suoritettiin esitutkimus kaupallisten siirrettävien ilmanpuhdistimien hyödyntämisestä säteilyvaaratilanteessa sisälle suojautumisen yhteydessä. Tutkimuksen tavoitteena oli tutkia ilmanpuhdistimien kykyä vähentää radioaktiivisia aineita sisältävien aerosolihiukkasten aktiivisuuspitoisuutta sisäilmassa ja sitä kautta vähentää niistä hengityksen kautta aiheutuvaa sisäistä säteilyannosta. Tutkielman teoriaosassa käsiteltiin säteilyvaaratilanteissa syntyviä radioaktiivisia aineita sisältäviä aerosolihiukkasia, radonia ja radonin hajoamistuotteita, sekä työn kannalta merkittäviä ilmanpuhdistusteknologioita. Työn kokeellisessa osiossa tutkittiin kahden kaupallisen siirrettävän ilmanpuhdistimen, Electrolux EAP300 ja Elixair E400, kykyä kerätä radonin lyhytikäisiä hajoamistuotteita sisäilmasta.

Radonin kiinnittyneiden hajoamistuotteiden todettiin simuloivan varsin hyvin säteilyvaaratilanteissa syntyviä radioaktiivisia aineita sisältäviä aerosolihiukkasia, jotka kuuluvat akkumulaatiomoodiin. Tutkitut ilmanpuhdistimet keräsivät tehokkaasti radonin kiinnittyneitä hajoamistuotteita, joiden hajoamistuotepitoisuus EEC_a putosi kertaluokalla 100 minuutissa Electrolux EAP300-ilmanpuhdistimella tehdyissä mittauksissa ja 160 minuutissa mittauksessa 2, jossa käytettiin Elixair E400-ilmanpuhdistinta. Koska kaupalliset siirrettävät ilmanpuhdistimet laskivat radonin kiinnittyneiden hajoamistuotteiden hajoamistuotepitoisuutta sisäilmassa, voidaan niiden arvioida laskevan tehokkaasti myös sisälle suojauduttaessa sisäilmaan tihkuvien saman kokoluokan radioaktiivisia aineita sisältävien aerosolihiukkasten aktiivisuuspitoisuuksia. Aktiivisuuspitoisuuden laskeminen vähentää karkeasti samassa suhteessa myös hengityksen kautta saatavaa efektiivistä säteilyannosta.

Tutkitut ilmanpuhdistimet eivät mittauskampanjan tulosten perusteella keränneet radonkaasua tai radonin kiinnittymättömiä hajoamistuotteita huoneilmasta. Tämän perusteella tutkitut ilmanpuhdistimet eivät myöskään kerää säteilyvaaratilanteissa tehtävän sisälle suojautumisen yhteydessä radioaktiivisia aineita sisältäviä ultrahienoja aerosolihiukkasia tai radioaktiivisia jalokaasuja.

Tutkielman tulosten ja havaintojen perusteella on aiheellista suorittaa jatkotutkimuksia liittyen kaupallisten siirrettävien ilmanpuhdistimien hyödyntämiseen sisälle

suojauduttaessa hengitysilman kautta saatavan sisäisen annoksen vähentämiseksi. Jatkotutkimukset tulisi suorittaa talviaikaan, jolloin radonpitoisuus on luonnollisesti korkeampi ja mittausaikojen tulisi olla pidemmät. Jatkotutkimuksissa olisi myös aiheellista tutkia laajemmin ja yksityiskohtaisemmin erilaisia ilmanpuhdistimia, kuten sellaisia, joissa on hyvin tehokas aktiivihiilisuodatin. Tehdyissä mittauksissa seurattiin myös vain yhtä ilmanpuhdistimiin kertynyttä radionuklidia, ^{214}Pb , ja sen käyttäytymistä. Valmiustilanteessa tulisi huomioida kaikki kerätyt radioisotooppit määrittäessä turvallista oleskeluetäisyyttä ilmanpuhdistimesta sisälle suojautumisen aikana, sekä ohjeistettaessa suodattimien asianmukaisesta ja turvallisesta kierrättämisestä säteilyvaaratilanteen päätyttyä.

Lähteet

- [1] Stuklex. *Suojelutoimet säteilyvaaratilanteessa, 20.12.2022*. URL: <https://www.stuklex.fi/fi/ohje/VAL1>. (Viitattu 18.10.2023).
- [2] S. Yanchao ym. ”Study on the effect of air purifier for reducing indoor radon exposure”. *Applied Radiation and Isotopes* 173 (2021), s. 109706. ISSN: 0969-8043. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2021.109706>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969804321001147>.
- [3] Y. Yasuoka ym. ”Radon mitigation using an air cleaner”. *Journal of Radio-analytical and Nuclear Chemistry* 279 (2009), s. 885–891. ISSN: 1588-2780. DOI: [10.1007/s10967-008-7379-0](https://doi.org/10.1007/s10967-008-7379-0). URL: <https://doi.org/10.1007/s10967-008-7379-0>.
- [4] J. Sandberg ja R. Paltmaa. *Luku 1 Ydin- ja säteilyfysiikan perusteet*. Teoksessa *Säteily ja sen havaitseminen, osa 1 Säteily- ja ydinturvallisuus -kirjasarjassa*. Säteilyturvakeskus, 2002.
- [5] O. Marttila. *Luku 2 Suureet ja yksiköt*. Teoksessa *Säteily ja sen havaitseminen, osa 1 Säteily- ja ydinturvallisuus -kirjasarjassa*. Säteilyturvakeskus, 2002.
- [6] *Suomalaisen keskimääräinen säteilyannos, verkkosivu*. Säteilyturvakeskus. URL: <https://stuk.fi/suomalaisten-keskimaarainen-sateilyannos>. (Viitattu 19.10.2023).
- [7] M. Suomela, T. Rahola ja M. Muikku. *Luku 7 Sisäinen säteily*. Teoksessa *Säteily ympäristössä, osa 2 Säteily- ja ydinturvallisuus -kirjasarjassa*. Säteilyturvakeskus STUK, 2003.
- [8] L. Morawska ja G. Buonanno. ”The physics of particle formation and deposition during breathing.” *Nature Reviews Physics* 3 (2021), s. 300–301. DOI: <https://doi.org/10.1038/s42254-021-00307-4>.
- [9] K. Aakko ja S. Salomaa. *Luku 9 Säteilyvaaratilanteet ja suojautumisen*. Teoksessa *Säteily ympäristössä, osa 2 Säteily- ja ydinturvallisuus -kirjasarjassa*. Säteilyturvakeskus STUK, 2003.

- [10] International Commission on Radiological Protection (ICRP). "Age-dependent Doses to the Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 5 Compilation of Ingestion and Inhalation Coefficients". *ICRP Publication 72* (1997). Ann. ICRP 26 (1).
- [11] T. Valmari ja R. Pöllänen. *Luku 3 Radioaktiiviset aineet ulkoilmassa*. Teoksessa Säteily ympäristössä, osa 2 Säteily- ja ydinturvallisuus -kirjasarjassa. Säteilyturvakeskus, 2003.
- [12] *Radioactive particles in the Environment: Sources, Particle Characterization and Analytical Techniques*. International Atomic Energy Agency (IAEA), 2011. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE_1663_web.pdf. (Viitattu 15.10.2023).
- [13] *The Fukushima Daiichi Accident, technical volume 1/5*. International Atomic Energy Agency (IAEA), 2015. URL: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/AdditionalVolumes/P1710/Pub1710-TV1-Web.pdf>. (Viitattu 18.10.2023).
- [14] K. Eleftheriadis ja A. Ioannidou. *Chapter 4 Radioactive aerosol analysis*. Teoksessa Handbook of Radioactivity Analysis: Vol 2. Academic Press, 2020, s. 263–313. ISBN: 9780128143957.
- [15] *Japan Atomic Energy Agency (JAEA), Nuclear Data Center, verkkosivu*. URL: <https://wwwndc.jaea.go.jp/cgi-bin/FPYfig>. (Viitattu 20.10.2023).
- [16] *The Fukushima Daiichi Accident, technical volume 4/5, Radiological consequences*. International Atomic Energy Agency (IAEA), 2015. URL: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/AdditionalVolumes/P1710/Pub1710-TV4-Web.pdf>. (Viitattu 20.10.2023).
- [17] *National Nuclear Data Center (NNDC), Chart of nuclides (NuDat3), verkkosivu*. URL: <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/>. (Viitattu 20.10.2023).
- [18] E. Kurihara ym. "Particulate plutonium released from the Fukushima Daiichi meltdowns". *Science of The Total Environment* 743 (2020), s. 140539. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140539>.
- [19] A. Chamberlain. *Radioactive Aerosols*. Cambridge Series in Chemical Engineering. Cambridge University Press, 1991. DOI: 10.1017/CB09780511524820.003.

- [20] P. von Schoenberg ym. "Aerosol dynamics and dispersion of radioactive particles". *Atmospheric Chemistry and Physics* 21.6 (2021), s. 5173–5193. DOI: 10.5194/acp-21-5173-2021.
- [21] A. Reineking ym. "Air Activity Concentrations and Particle Size Distributions of the Chernobyl Aerosol". *Radiation Protection Dosimetry* 19.3 (1987), s. 159–163. DOI: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a079935.
- [22] J. Tschiersch ja B. Georgi. "Chernobyl fallout size distribution in Urban areas". *Journal of Aerosol Science* 18.6 (1987), s. 689–692. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(87\)90098-X](https://doi.org/10.1016/0021-8502(87)90098-X).
- [23] E. Kauppinen ym. "Radioactivity size distributions of ambient aerosols in Helsinki, Finland, during May 1986 after Chernobyl accident: preliminary report". *Environmental Science & Technology* 20.12 (1986), s. 1257–1259. DOI: <https://doi.org/10.1021/es00154a011>.
- [24] T. Doi ym. "Anthropogenic radionuclides in the atmosphere observed at Tsukuba: characteristics of the radionuclides derived from Fukushima". *Journal of Environmental Radioactivity* 122 (2013), s. 55–62. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.02.001>.
- [25] Y. Miyamoto, K. Yasuda ja M. Magara. "Size distribution of radioactive particles collected at Tokai, Japan 6 days after the nuclear accident". *Journal of Environmental Radioactivity* 132 (2014), s. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.01.010>.
- [26] G. R. Crocker, J. D. O'Connor ja E. C. Freiling. "Physical and radiochemical properties of fallout particles". *Health Physics* 12 8 (1966), s. 1099–104. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:42239117>.
- [27] N. Kaneyasu ym. "Sulfate Aerosol as a Potential Transport Medium of Radiocesium from the Fukushima Nuclear Accident". *Environmental Science & Technology* 46.11 (2012), s. 5720–5726. DOI: 10.1021/es204667h.
- [28] A. Weltner ym. *Luku 4 Radon sisäilmassa*. Teoksessa Säteily ympäristössä, osa 2 Säteily- ja ydinturvallisuus -kirjasarjassa. Säteilyturvakeskus, 2003.
- [29] M. Yuness ym. "Indoor activity size distribution of the short-lived radon progeny". *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 30 (2016). DOI: 10.1007/s00477-015-1057-x.

- [30] International Commission on Radiological Protection (ICRP). "Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3". *ICRP Publication 137* (2017). Ann. ICRP 46(3/4).
- [31] *Sisäilmäyhdistys ry, Mitä sisäilma on, verkkosivu*. URL: www.sisailmayhdistys.fi/Perustietoa-sisailmasta/Mita-sisailma-on. (Viitattu 10.10.2023).
- [32] *United States Environmental Protection Agency (EPA), Residential Air Cleaners, A Technical Summary*. 2018. URL: <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/air-cleaners-and-air-filters-home>. (Viitattu 18.10.2023).
- [33] Z. Xu ja B. Zhou. *Fundamentals of Air Cleaning Technology and Its Application in Cleanrooms*. Springer Berlin, Heidelberg, 2016. ISBN: 978-3-642-39373-0.
- [34] *Hengitysliitto, Ilmanvaihdon suodattimet, nettisivu*. URL: <https://www.hengitysliitto.fi/kodin-sisailma-ja-kunnossapito/ilmanvaihto/ilmanvaihdon-suodattimet/>. (Viitattu 19.10.2023).
- [35] *Elixair E400-ilmanpuhdistin, käyttöohje*. Saatavilla opinnäytetyön tekijällä.
- [36] T. Sparks ja G. Chase. *Filters and Filtration Handbook*. Elsevier Science, 2008. ISBN: 9780080558042 (E-kirja).
- [37] *Saphymo GmbH, AlphaGUARD Portable Radon Monitor, käyttöohje*. 2014. Saatavilla opinnäytetyön tekijällä.
- [38] Suomen standardisoimisliitto. *SFS-EN ISO 11665-5:2020: Measurement of radioactivity in the environment. Air: radon-222. Part 5: Continuous measurement methods of the activity concentration (ISO 11665-5:2020)*. 2. painos. 2020.
- [39] *Horst Kelm Tracerlab Engineering & Technology, Tracerlab BWLM-PLUS-2S Radon Daughter Monitor, käyttöohje*. 2022. Saatavilla opinnäytetyön tekijällä.
- [40] *Bertin Environics, RanidPro200 Radionuclide Identifier Backpack & Source Location, käyttöohje*. Saatavilla opinnäytetyön tekijällä.
- [41] *Electrolux EAP300-ilmanpuhdistin, käyttöohje*. Saatavilla opinnäytetyön tekijällä.
- [42] *Finlex, Ympäristöministeriön asetus asuin-, majoitus- ja työtiloista 1008/2017, verkkosivu*. 2017. URL: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171008>. (Viitattu 20.9.2023).

- [43] *Ilmatieteen laitos, Sää ja meri / Havaintojen lataus, verkkosivu.* URL: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus>. (Säädädata haettu 20.10.2023).
- [44] J. R. Taylor. *An introduction to error analysis: the study of uncertainties in physical measurements*. 2. painos. Sausalito, California: University Science Book, 1997. ISBN: 0935702423 (sidottu).