

Mika Tuukkanen

RAKENTEIDEN TIIVEYDEN
TARKASTELU
Merkkiainekaasujen käyttäytyminen

Opinnäytetyö
Ympäristötekniologia


Toukokuu 2015




MAMK

University of Applied Sciences

KUVAILULEHTI

	Opinnäytetyön päivämäärä 15.5.2015
Tekijä(t) Mika Tuukkanen	Koulutusohjelma ja suuntautuminen Ympäristötekniologia
Nimeke Rakenteiden tiiveyden tarkastelu; Merkkiaineikaasujen käyttäytyminen	
Tiivistelmä Tässä tutkimuksessa käsitellään yksittäisten rakenteiden, ja niiden liittymien, ilmatiiveyden tarkasteluissa käytettävää merkkiainekoemenetelmää. Tutkimuksen toimeksiantaja on Wise Group Finland Oy, joka on rakennusalan asiantuntijapalveluja tuottava yritys. Tutkimuksessa on etsitty vastauksia kysymyksiin, jotka ovat jääneet aikaisemmissa kehityshankkeissa ja opinnäytetöissä avoimiksi. Kysymykset koskevat merkkiainekokeissa käytettävien kaasujen ominaisuuksia, käyttäytymistä rakenteissa ja tutkittavissa tiloissa sekä mahdollisten ilmapuotojen merkittävyyden tulkitsemista. Tutkimusta varten suoritettiin useita merkkiainekokeita yhteistyössä Wise Group Finland Oy:n asiantuntijoiden kanssa, perehdyttiin tutkimusmenetelmään kirjallisuuskatsauksen avulla sekä suoritettiin haastatteluja menetelmän eri osa-alueisiin liittyville asiantuntijatahoille. Tutkittavat kaasut olivat typpi-vetyseos (H ₂ 5 % + N ₂ 95 %) ja rikkiheksafluoridi (SF ₆). Rakenteiden tiiveystarkasteluilla pyritään löytämään rakenteista sisäilmaan tapahtuvia, hallitsemattomia ilmapuhtauksia. Koska rakenteiden kosteusteknisen toiminnan varmistamiseksi rakennukset tulisi suunnitella alipaineisiksi suhteessa ulkoilmaan, saattaa hallitsemattomien ilmapuhtausten mukana kulkeutua sisäilmaan terveydelle haitallisia epäpuhtauksia. Tutkimuksessa käytettyjä kaasuja voidaan suositella käytettäväksi rakenteiden tiiveystarkasteluissa. Normaali-ilmanpaineessa sekä Suomessa tyypillisesti vallitsevissa lämpötiloissa kumpikin käytetyistä kaasuista on erittäin inertti ja suhteellisen vaaraton. Työsuojellisesti merkittävin kaasujen aiheuttama riski on niiden kyky syrjäyttää happea, joka tulee ottaa huomioon tutkimuksia suunniteltaessa. Merkkiainekokeisiin, ja niistä saatujen tulosten tulkintaan, liittyy oleellisesti rakennustekniikan ohella myös muita tekniikan aloja. Tutkimusmenetelmän hallinta vaatii tutkijalta laajaa ymmärrystä rakenteiden teknisestä toiminnasta sekä mahdollisesti terveyshaittaa aiheuttavien sisäilman epäpuhtauksien kemiallisista ja fysikaalisista ominaisuuksista.	
Asiasanat (avainsanat) Tiiveystarkastelu, merkkiainemittaus, typpi-vetyseos, rikkiheksafluoridi, sisäilma	
Sivumäärä 40	Kieli Suomi
Huomautus (huomautukset liitteistä)	
Ohjaavan opettajan nimi Marjatta Lehesvaara	Opinnäytetyön toimeksiantaja Wise Group Finland Oy

DESCRIPTION

	Date of the bachelor's thesis 15.5.2015
Author(s) Mika Tuukkanen	Degree programme and option Environmental technology
Name of the bachelor's thesis Airtightness measurement of structures; Tracer gas behaviour	
Abstract This study examines the tracer gas method used for finding air leakages from a single building component or from the joints of building components. The study was made for Wise Group Finland Ltd, which is a company that provides expert services for construction industry. The method has been inspected in couple earlier studies, but several questions concerning the behaviour of tracer gasses have remained open. For this study, multiple tracer gas leak tests were conducted in late winter and spring 2015. In addition to practical experimentation, wide range of publications were reviewed and tracer gas method – related experts were consulted. The gasses used in this study were sulfur hexafluoride and standard mix of 5 % hydrogen and 95 % nitrogen. Improving airtightness of structures prevents uncontrolled air flows from carrying impurities through structures to indoor air. These impurities may cause health hazard to the occupants of building. In conclusion, the gasses used in this study can be recommended when using tracer gas method to find air leakages from building components. Both gasses are very inert and stable in normal air pressure and in normal temperature range. Main concern from the occupational safety point of view is that the gasses can displace oxygen and cause asphyxiation. When performing leak detection with tracer gas method, and when interpreting the results, investigator needs to widely understand how different kind of structural elements in building work. Therefore knowledge from various fields of technical science may be needed.	
Subject headings, (keywords) leak detection, tracer gas method, nitrogen-hydrogen, sulfur hexafluoride, indoor air	
Pages 40	Language Finnish
Remarks, notes on appendices	
Tutor Marjatta Lehesvaara	Bachelor's thesis assigned by Wise Group Finland Ltd

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	1
1.1	Tutkimuksen tausta	1
1.2	Tutkimuksen tavoitteet	1
2	MENETELMÄT	2
3	RAKENTEIDEN TIIVEYSTARKASTELU	3
4	MERKKIAINEKOKEET	5
5	MERKKIAINELAITTEET	8
6	SISÄILMAN EPÄPUHTAUDET	10
6.1	Mikrobit	10
6.2	Indikaattorimikrobit	11
6.3	Aktinobakteerit	12
6.4	Haihtuvat orgaaniset yhdisteet	13
6.5	Mykotoksiinit	13
6.6	Radon	13
6.7	Hiukkaset	15
6.8	Terveyshaitoista	16
7	KAASUJEN KÄYTTÄYTYMINEN	17
7.1	Ideaalikaasujen lait	18
7.2	Konvektio, diffuusio sekä noste	21
7.3	Kineettistä kaasuteoriaa	24
7.4	Kaasujen virtaus	25
7.5	Ilma	27
7.6	Rikkiheksafluoridi (SF ₆)	27
7.7	Typpi-vety	29
7.8	Työsuojelu	32
8	VASTAUKSET	32
9	JOHTOPÄÄTÖKSET	36
	LÄHTEET	38

KÄSITTEISTÖÄ

Aineen rakenneosa. Atomi, molekyyli tai ioni.

Avogadron vakio. Amedeo Avogadron vuonna 1811 määrittelemä luku, joka ilmaisee 1 moolin mitä tahansa ainetta sisältävän aineen rakenneosien määrän. Avogadron vakio on $6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

Bio- / aerosoli. Aerosolilla tarkoitetaan kaasumaista väliainetta ja siinä leijailevia kiinteitä tai nestemäisiä hiukkasia. Bioaerosolit ovat biologista alkuperää olevia hiukkasia.

CAS-numero. Chemical Abstract Service on kemikaalien tunnistenumerojärjestelmä, jolla helpotetaan kemikaalien ja yhdisteiden tunnistamista.

CFD. Computational Fluid Dynamics.

Diffuusio. Aineen pitoisuuserosta johtuva molekyylien satunnainen liike, jolloin pitoisuusero pyrkii tasoittumaan pienemmästä pitoisuudesta suurempaan.

GWP-arvo. Global Warming Potential on indeksi, joka kuvaa kaasun vaikutusta ilmaston lämpenemiseen suhteutettuna hiilidioksidin vaikutukseen sadan vuoden ajanjaksolla. Hiilidioksidin GWP on 1.

HTP-arvo. Työpaikan ilman sisältämien epäpuhtauksien haitalliseksi tunnetut pitoisuudet.

Höyrynpaine. Kiinteässä tai nestemäisessä faasissa olevista aineista siirtyy spontaanisti aineen rakenneosia kaasufaasiin. Näiden rakenneosien aiheuttamaa painetta kutsutaan höyrynpaineeksi. Mitä korkeampi aineen höyrynpaine on, sitä voimakkaammin se pyrkii höyrystymään.

Ideaalikaasu. Ideaalikaasu on teoreettinen malli jolla pyritään selittämään reaalikaasujen ominaisuuksia. Tällöin oletetaan että molekyyleillä ei ole vuorovaikutusta keskenään ja molekyylien törmäykset ovat täysin kimmoisia.

Kaasun osapaine. Osapaine määritellään kaasuseoksessa olevan kaasun paineeksi, joka kyseisellä kaasulla olisi jos se täyttäisi yksinään koko kaasuseoksen käyttämän tilavuuden.

Keskimääräinen vapaa matka. Kineettisessä kaasuteoriassa käytetty suure, joka kuvaa kaasumolekyylin kulkemaa matkaa, jonka se voi keskimäärin kulkea ennen törmäystä toiseen molekyyliin.

Kolmipiste. Kolmipisteeksi kutsutaan paine- ja lämpötilaolosuhdetta, jolloin aine on termodynaamisessa tasapainossa. Tällöin aineen on mahdollista esiintyä kaikissa faaseissa (kiinteä, neste sekä kaasu).

Konvektio. Konvektio on lämmön siirtymistä fluideissa virtauksen mukana. Rakenteissa esiintyy vapaata, eli lämpötilaeroista johtuvaa konvektiota sekä pakotettua, paineroista johtuvaa konvektiota.

Kriittinen piste. Kriittinen piste muodostuu aineen kriittisestä lämpötilasta ja kriittisestä paineesta. Tämän pisteen yläpuolella aine esiintyy ainoastaan kaasumaisessa muodossa.

Metabolia. Metabolialla tarkoitetaan aineenvaihduntaa. Aineenvaihdunta on jaettu kahteen eri luokkaan: primaarinen sekä sekundaarinen. Primaarimetabolia on organismin hengissä pysymisen kannalta välttämätöntä (esimerkiksi ravinnon saanti). Sekundaarimetabolian avulla organismi muun muassa taistelee elintilasta muita organismeja vastaan.

Mooli. Mooli (mol) on kemiassa käytetty ainemäärän yksikkö. Yksi mooli mitä tahansa ainetta on massaltaan kyseisen aineen suhteellisen atomimassan tai kaavamassan osoittama arvo grammoina.

NTP. Normal Temperature and Pressure kuvaa olosuhdetta, jolloin ilmanpaine on 101325 Pascalia ja lämpötila 273,15 Kelvin-astetta.

Viskositeetti. Suure, joka kuvaa fluidin kykyä vastustaa virtausta.

Vuotoilmavirtaus. Rakenteen läpi kulkeva ilmavirtaus, joka ei kulje suunniteltujen ilmanvaihtoreittien kautta.

1 JOHDANTO

Merkkiainekokeiden käyttö rakenteiden tiiveyden tarkasteluissa on yleistynyt Suomessa huomattavasti 2000-luvulla. Rakennusteollisuudessa merkkiainekokeilla voidaan tutkia muun muassa mahdollisia rakenteiden tiivistyskorjausta vaativia ilmavuotoja, radonputkiston toimivuutta, hajuhaittojen kulkeutumista, osastointien toimivuutta asbesti- ja mikrobipurkutöissä, vesivuotoja putkistoissa tai pihakansissa sekä aikaisemmin tehdyn tiivistyskorjauksen onnistumista. Rakenteiden tiiveyden tarkasteluissa on huomattavasti muuttujia ja vaikuttavia tekijöitä, ja siihen liittyykin rakennustekniikan ohella olennaisesti myös muita tekniikan aloja. Merkkiainekoemenetelmää on aikaisemmin käytetty prosessiteollisuudessa, mutta rakennusalalla menetelmä sekä siihen liittyvät toimintamallit ovat kohtuullisen tuoreita.

1.1 Tutkimuksen tausta

Wise Group Finland Oy on rakennusalan asiantuntijapalveluja tuottava yritys, jonka päätoimialat ovat rakennesuunnittelu, talotekniikka, rakennuttaminen, korjausrakentaminen ja kansainväliset palvelut. Yrityksen liikevaihto vuodelle 2014 oli 24,8 milj. €. Yrityksessä työskentelee tällä hetkellä yli 300 henkilöä ja yritys on ollut mukana toteuttamassa yli 20 000 merkittävää uudis- ja korjauskohdetta.

Vuoden 2014 aikana Wise Group Finland Oy:n toimesta on toteutettu kaksi kehityshankeetta liittyen merkkiainekokeisiin, tiivistyskorjauksiin sekä tiivistyskorjausten suunnitteluun. Aiheesta on laadittu lähivuosina myös muutamia opinnäytetöitä muiden tahojen toimesta. Merkkiainekokeita käsittelevissä opinnäytetöissä on todettu, että merkkiainekaasujen ominaisuudet, käyttäytyminen, mahdolliset reaktiot rakennusmateriaalien kanssa ja kaasujen liikkeet rakenteissa sekä rakenteiden läpi edellyttävät lähempää tarkastelua.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Tässä tutkimuksessa on etsitty vastauksia Wise Group Finland Oy:ltä saatuihin, merkkiainekokeita koskeviin avoimiin kysymyksiin. Avoimia kysymyksiä ovat muun muassa seuraavat:

- Aikaisemmin tehtyjen opinnäytetöiden yhteydessä on saatu kuulopuheiden tasolla olevaa tietoa kaasujen reaktioista, mutta tietoja ei ole kyetty varmistamaan. Esimerkiksi rikkiheksafluoridin (SF₆) on arveltu reagoivan rappauksen kalkin

kanssa ja typpi-vetykaasun on arveltu suodattuvan erilleen esim. kivivillan ja hiekan vaikutuksesta. Onko olemassa materiaaleja, joiden kohdalla kaasujen käyttö ei olisi mahdollista?

- Muuttuvatko rikkiheksafluoridikaasun ja typpi-vetykaasun ominaisuudet merkkiainemenetelmän kannalta oleellisesti esimerkiksi eri vuodenaikojen lämpötilojen vaikutuksesta ja miten kaasujen ominaisuudet vaikuttavat kaasujen leviämiseen?
- Voidaanko rakenteeseen laskettavan kaasun määrä ja sen leviäminen arvioida laskennallisesti tai simuloimalla? Kuinka suuret raot ja tiiveyden puutteet rakenteissa vaikuttavat sisäilman mikrobiologiseen laatuun?

2 MENETELMÄT

Rakenteiden tiiveystarkasteluihin liittyviin menetelmiin tutustumiseksi, ja niiden ymmärtämiseksi, suoritettiin alkuvuodesta 2015 useita merkkiainekokeita Wise Group Finland Oy:n kuntotutkimuskohteisiin pääkaupunkiseudulla. Kohteissa käytetty merkkiainekoemenetelmä (luku 4) sekä käytetyt kaasunilmaisimet (luku 5) ovat kuvattu tässä tutkimuksessa. Merkkiainekoemenetelmän lisäksi tässä tutkimuksessa on käsitelty sisäilman haitta-aineiden ominaisuuksia (luku 6) sekä kaasujen leviämiseen ja kulkeutumiseen liittyviä teorioita (luku 7), joiden pohjalta on haettu vastauksia luvussa 1.2 esitettyihin kysymyksiin.

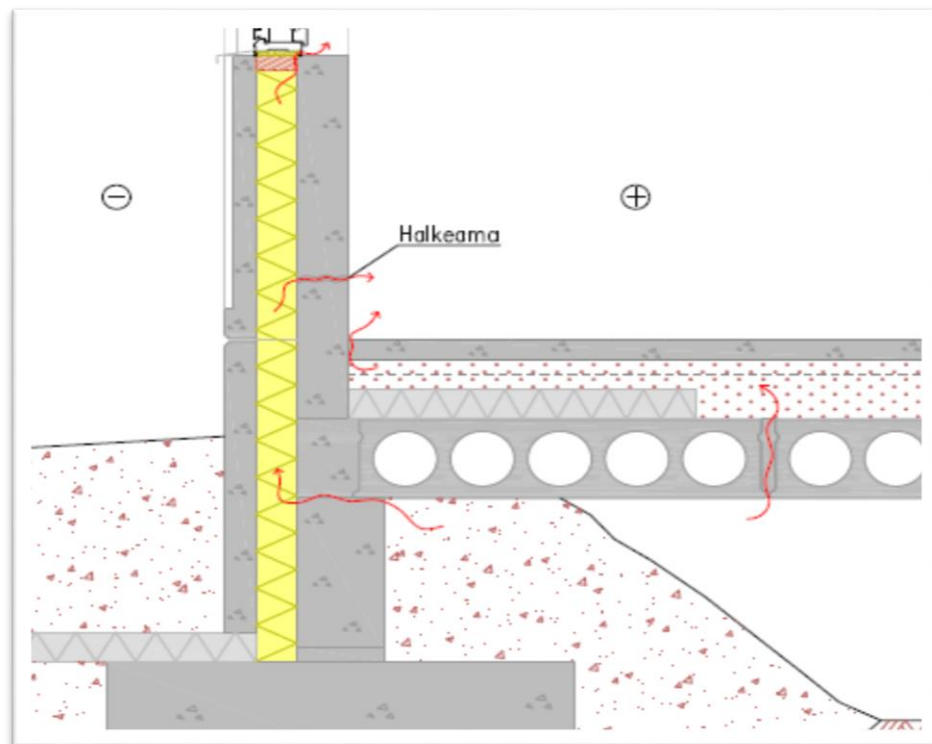
Merkkiainekokeet tehtiin yhteistyössä Wise Group Finland Oy:n tutkijoiden ja asiantuntijoiden kanssa. Yksittäisten kohteiden mittaustulokset eivät ole relevantteja tämän tutkimuksen kannalta. Tehdyillä tutkimuksilla saatiin kuitenkin todettua merkkiainemenetelmän toimivuus tiiveyttä vaativien rakenteiden ilmavuotojen paikallistamisessa. Kyseisistä kohteista on toimitettu tulokset tutkimusten tilaajalle tai vastuussa olevalle tutkijalle.

Aikaisempien kehityshankkeiden ja opinnäytetöiden lisäksi merkkiainekokeista ja niissä käytettävistä kaasuista etsittiin tietoa lukuisista akateemisista tietokannoista ja arkistoista. Lisäksi kevään 2015 aikana suoritettiin sähköposti- ja puhelinhaastatteluja menetelmiin liittyville asiantuntijatahoille, mukaan lukien laitevalmistajat, kaasujen valmistajat / maahantuojat sekä merkkiainekokeita Suomessa ja Euroopassa suorittavat yritykset. Kansainvälisellä tasolla sähköpostihaastattelut jäivät tuloksettomiksi. Muiden haastattelujen perusteella saatu tieto oli erittäin vaihtelevaa, ja omalta osaltaan vahvasti

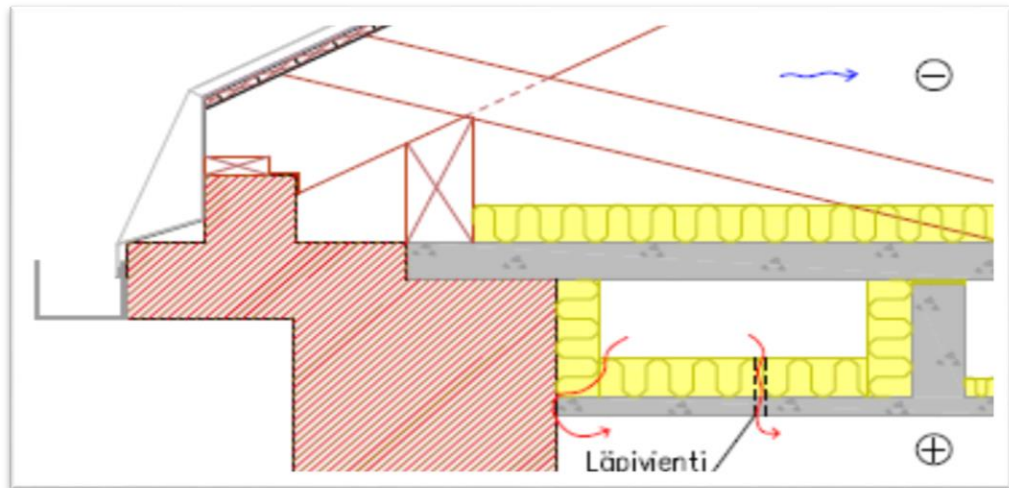
käsitystä aiheen haasteellisuudesta. Näistä haastatteluista saatua lisätietoa on käytetty tutkimuksen tekemiseen ja ohjaukseen.

3 RAKENTEIDEN TIIVEYSTARKASTELU

Rakenteiden tiiveystarkasteluissa selvitetään merkkiainekokein rakenteiden sisällä ja rakenteiden läpi tapahtuvia, mahdollisesti tiivistyskorjauksia vaativia, hallitsemattomia ilmavirtauksia. Tiiveystarkastelut ovat usein osa laajempaa kuntotutkimusta. Rakennuksen vuotoilmareittien kartoittamisella saadaan tietoa mahdollisesti terveyshaittaa aiheuttavien epäpuhtauksien kulkeutumisreiteistä sisäilmaan. Jos rakenteissa esiintyy mikrobiologisia tai kemiallisia epäpuhtauksia, saattaa ilmavuodoilla olla merkittävä vaikutus sisäilman laatuun. Tätä työtä varten tehtyjen tutkimusten perusteella tyypillisiä rakennusten ilmavuotoreittejä ovat muun muassa maanvaraisen alapohjan ja seinän liittymä sekä seinässä olevat läpiviennit, ontelolaattojen liitokset (kuva 1), halkeamat ulkoseinissä (kuva 1), ikkuna-aukkojen puutteelliset tiivistykset (kuva 1) sekä ylä- tai välipohjan ja seinän liittymät (kuva 2). Lisäksi ilmavuotokohtia esiintyy usein sähkö- ja putkistoelementtien läpivienneissä sekä huonetilan sisäpintoihin kiinnitettävien elementtien kiinnityskohdissa.



KUVA 1. Poikkileikkaus ontelolaatan ja ulkoseinän liittymästä (Suvilehto 2015)



KUVA 2. Poikkileikkaus yläpohjan ja ulkoseinän liittymästä (Suvilehto 2015)

Tiivistyskorjauksia on tehty joko yksittäin siirtävänä korjauksena tai varsinaisena korjaustoimenpiteenä peruskorjauksen yhteydessä. Tiivistyskorjauksissa käytettävät materiaalit ovat yleensä diffuusioavoimia, joten ne läpäisevät kaasufaasissa olevia aineita. Tiivistyskorjausten lisäksi sisäilmaongelmaisissa kohteissa käytetään kapselointia, jolloin pyritään estämään epäpuhtauksien kulkeutuminen sisäilmaan sekä diffuusiolla että konvektiolla. (Laine 2014).

Työmaa-aikana merkkiainekokeita voidaan käyttää tiivistyskorjausten laadunvarmistuksessa sekä esimerkiksi haitta-ainepurkutöiden ja homevauriokorjausten edellyttämien osastointien toimivuuden varmistamisessa. Tiiveystarkasteluissa käytetään merkkiainekokeiden lisäksi myös lämpökuvausta ja merkkisavua.

Lämpökuvauksessa mitataan lämpökameran avulla tutkittavan kohteen pintalämpötilajakaumaa kohteen lähettämän infrapunasäteilyn perusteella. Jotta lämpökuvauksella saadaan luotettavia tuloksia rakenteiden ilmapuotokohdista, täytyy kohteessa olla rakenteen ylittävän paine-eron lisäksi riittävä lämpötilaero. Tästä johtuen merkkiainekokeilla saadaan luotettavammin paikallistettua ilmapuotoreittejä esimerkiksi putkikanalista tai eristetilasta sisäilmaan (Sobott 2014).

Merkkisavua tuotetaan merkkisavukynällä tai – ampullilla tutkittavaan tilaan, jonka jälkeen savun liikkumista seurataan visuaalisesti. Merkkisavua käytetään ilmapuotauksen suunnan tutkimiseen esimerkiksi ilmastoinnin pääte-elimissä, rakennuksen ulkovaipan tiiveystutkimuksissa ja työhygieenisissä tarkastuksissa. Rakenteiden tiiveyttä tutkittaessa merkkisavuilla on kuitenkin vaikea luotettavasti hahmottaa ilmapuodon suuruus ja

reitti. Näin ollen merkkiainekokeilla saadaan huomattavasti parempia tuloksia vuotoilmavirtausten tutkimisessa.

4 MERKKIAINEKOKKEET

Merkkiainekokeella tarkoitetaan menetelmää, jossa merkkiainekaasua ja sitä havaitsevaa mittauslaitetta apuna käyttäen etsitään mahdollisia vuotoja tiiveyttä vaativista kohteista. Merkkiainekokeita käytetään rakenteiden tiiveystarkastelun lisäksi vuotojen paikallistamiseen muun muassa kaasu- ja vesijakeluverkostoissa, rakennusten putkistoissa, kaasutäyhteisissä korkeajännitejohdoissa sekä teollisuuslaitosten putkistoissa, pumpuissa ja moottoreissa.

Rakenteiden tiiveyttä tutkittaessa merkkiainekaasu lasketaan tutkittavaan rakenteeseen tehdyn reiän tai tuuletusaukkojen kautta esimerkiksi paineilmapistoolilla, joka voidaan liittää kaasupulloon muun muassa pneumatiikkaletkujen ja –liitoksien avulla. Merkkiainekaasu voidaan myös laskea rakenteeseen useammasta kohdasta yhtä aikaa haarotussarjan avulla. Tässä tutkimuksessa käytetyt kaasut voidaan sekoittaa keskenään tai ”laimentaa” ilmalla ennen rakenteisiin laskemista erillisen välisäiliön avulla (Tarkkanen 2015). Kaasupullot ovat erittäin korkeasti paineistettuja, joten kaasupulloon asennettava paineensäädin on välttämätön. Myös kaasupulloon liitettävä virtausmittari auttaa tutkijaa hahmottamaan rakenteeseen lasketun kaasun määrää, tosin kokenut tutkija pystyy arvioimaan tarvittavan kaasun määrän kokemuspohjaisesti.

Kun kaasu on saatu rakenteeseen, tukitaan kaasunlaskuaukko ja ryhdytään etsimään tutkittavasta tilasta mahdollisia merkkiainekaasua sisäilmaan päästäviä vuotokohtia (kuva 3) kaasunilmaisimella. Mikäli vuotokohtia havaitaan, ne valokuvataan ja merkitään selkeästi esimerkiksi pohjapiirroksen ja rakenteesta piirrettyyn, niin sanottuun naamakuvaan, jolloin todettujen vuotokohtien raportointi ja mahdollinen tiivistyskorjaus helpottuu. Vuotokohdat on suositeltavaa merkitä myös suoraan rakenteeseen, jossa vuotokohta sijaitsee.



KUVA 3. Esimerkki alapohjan ja seinän liittymän vuotoilmavirtauskohdasta (Tuukkanen 2015)

Optimaalisessa mittaustilanteessa kaasu lasketaan rakenteeseen tutkittavan tilan ulkopuolelta, jolloin saadaan ilmavuotokohdat parhaiten esiin (Sobott 2014). Näin saadaan myös minimoitua kaasulaitteistossa olevien, mahdollisesti viallisten liitosten tai osien kautta vuotavan kaasun aiheuttama taustapitoisuuden nousu. Tällöin mittausten tekemiseen, kohteesta riippuen, tarvitaan käytännössä kaksi tutkijaa, toisen ollessa ulkopuolella annostelemassa kaasua ja toisen etsiessä vuotoreittejä tutkittavasta tilasta. Kaikissa tapauksissa, esimerkiksi maanvaraista alapohjaa tutkittaessa kaasun annostelu rakenteen ulkopuolelta ei ole mahdollista. Tällöin on oleellisen tärkeää varmistaa kaasulaitteiston sekä kaasunlaskuaukon tiiviys kaasunilmaisimella. Kaasunlaskuaukko voidaan tiivistää esimerkiksi joustavalla, kaasua läpäisemättömällä massalla (kuva 4).



KUVA 4. Tiivistetty kaasunlaskuaukko lattiassa (Tuukkanen 2015)

Tehtäessä merkkiainekokeita, tulee paine-eromittauksella varmistaa tutkittavan tilan alipaineisuus suhteessa ulkoilmaan tai muihin, rakenteiden rajaamiin tiloihin. Näin saadaan varmistettua haluttu ilmavirtausten suunta. Mikäli tutkittava tila on ylipaineinen, voidaan tila alipaineistaa tutkimuksen ajaksi esimerkiksi koneellisesti tai joissain tapauksissa ilmanvaihtoa säätämällä. Myös tilaan, johon kaasua lasketaan, voidaan koneellisesti luoda hetkellinen ylipaine verrattuna tutkittavaan tilaan. Tällöin saadaan varmistettua ilmavirtauksen suunta kaasunlaskutilasta tutkittavaan tilaan sekä kaasun leviäminen esimerkiksi putkitunnelissa (kuva 5).



KUVA 5. Esimerkki puhaltimen sijoittelusta ja tiivistyksestä (Tuukkanen 2015)

Kun merkkiainekokeita käytetään tiivistyskorjausten laadunvarmistuksessa, suositellaan että tutkittava tila on 10 – 15 Pa alipaineinen rakenteen yli verrattuna tilaan, johon kaasua lasketaan (Sobott 2014, 58).

Suomessa on mitattu yli 50 Pa paine-eroja rakenteen yli sisätilan ollessa alipaineinen. Varsinaisia tiiveystarkasteluja tehtäessä tutkittava tila voidaan alipaineistaa jopa useisiin kymmeneen Pascaleihin. Tällöin saadaan varmuudella kartoitettua kaikki vuotoilmareitit rakenteista. Tosin suurella alipaineistuksella saadaan lähes kaikkiin rakenteisiin ilmavuotoja, jolloin tutkijan on oleellista ymmärtää sekä rakenteiden toimintaperiaatteet että mahdollisten ilmavuotoreittien vaikutus sisäilman laatuun. (Tarkkanen 2015).

Rakennuksessa, ja rakenteiden yli, vallitsevat paine-erot voivat vaihdella suurestikin esimerkiksi tuuliolosuhteiden ja lämpötilaerojen vaikutuksesta. Sisäilman lämmitettäessä sen tiheys pienenee ja noste kasvaa, jolloin lämmin ilma pyrkii nousemaan rakennuksen

yläosaan. Tällöin, verrattuna ulkoilmaan, rakennuksen yläosaan muodostuu ylipaine ja rakennuksen alaosaan alipaine (Hintikka 2013, 10–11). Tätä tapahtumaa kutsutaan savupiippuilmiöksi, joka on sitä voimakkaampi mitä kylmempi ulkoilma on verrattuna sisäilmaan.

Tuulen vaikutus rakennuksen painesuhteisiin riippuu tuulen nopeuden ja suunnan lisäksi rakennuksen muodosta. Liikkuva ilmamassa aiheuttaa tuulen puoleiseen rakenteeseen ylipaineen ja tuulen suunnasta katsottuna sivu- ja takarakenteisiin alipaineen. Mikäli rakennuksen epätiivelyskohdat sijaitsevat tuulenpuolella, aiheutuu rakennuksen sisäpuolelle ylipaine. Jos taas merkittävimmät ilmavuotoreitit sijaitsevat rakennuksen toisella puolella suhteessa tuulen suuntaan, aiheutuu rakennuksen sisäpuolelle alipaine. (Sisäilmayhdistys 2008a).

Lämpötilaeroista johtuvat paine-erot ovat yleensä pienempiä mutta pitkäaikaisempia kuin tuulesta johtuvat, joten niillä on vaikutusta rakennuksen kosteustekniseen toimintaan. Merkkiainekokeiden kannalta tuulen aiheuttamilla, hetkellisesti suurillakin, paineroilla voi olla merkittävä vaikutus ilmavirtausten suuntiin rakenteissa. Tällöin ei voida aukottomasti varmistua siitä, että merkkiainekaasut kulkeutuvat mahdollisten epätiivelyskohtien läpi sisäilmaan, jolloin kaikkien ilmavuotoreittien havaitseminen ei ole välttämättä mahdollista.

5 MERKKIAINELAITTEET

Tätä tutkimusta varten tehdyissä merkkiainekokeissa käytettiin kaasuina typpi-vetyseosta (5 % H_2 + 95 % N_2) ja rikkiheksafluoridia (SF_6). Muita merkkiainekokeissa käytettäviä kaasuja ovat muun muassa helium ja hiilidioksidi. Kaasunilmaisimina käytettiin Dräger MSI Sensit 2 – ilmaisinta rikkiheksafluoridille sekä Trotec T3000 – laitetta varustettuna TS 800 SDI - ilmaisimella typpi-vetyseokselle. Muita merkkiainetutkimuksissa käytössä olevia kaasunilmaisimia ovat esimerkiksi Inficon Sensistor XRS 9012 typpi-vetyseokselle ja Innova 1412 rikkiheksafluoridille (Hintikka 2013).

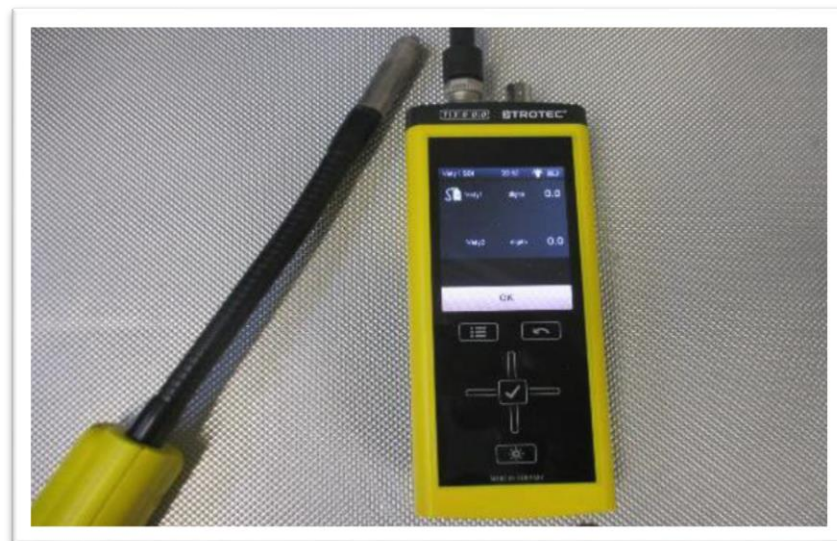
Dräger MSI Sensit 2 (kuva 6) on paristokäyttöinen kaasunilmaisin, jolla voidaan tunnistaa rikkiheksafluoridin lisäksi myös muita kylmäaineena käytettäviä kaasuja, muun muassa CFC- ja HFC-yhdisteitä. Laite tunnistaa eri kaasut ilman erillistä kalibrointia ja sen herkkyys on helposti säädettävissä manuaalisesti. Sen sensori perustuu CPI-

tunnistukseen (engl. Conductive Polymer Ionisation), joten laite ei ime varsinaista ilmanäytettä, vaan kaasuntunnistus perustuu kaasumolekyyliden sähkönjohtavuuteen. Laite ei ilmaise kaasupitoisuutta numeerisesti vaan audiovisuaalisella ilmoituksella, joka voimistuu kaasun konsentraation noustessa. Laite kykenee tunnistamaan kaasujen pitoisuudet välillä 0 – 885 ppm, vasteajan ollessa alle 1 sekunnin. (Dräger 2015).



KUVA 6. Dräger MSI Sensit 2 - kaasunilmaisim (Sobott 2014a)

Trotec T3000 (kuva 7) on akkukäyttöinen, multifunktionaalinen mittalaite jolla voidaan eri sensoreita käyttäen mitata esimerkiksi ilman kosteutta, lämpötiloja tai ilman virtauksia (Trotec 2015, 28–30).



KUVA 7. Trotec T3000 – laite sekä TS 800 SDI – sensori (Sobott 2014a)

Laitteeseen liitettävä TS 800 SDI - anturi on tarkoitettu vetykaasupitoisuuden mittaamiseen. Anturi tunnistaa vetykaasupitoisuuden alle 1 ppm:n tarkkuudella välillä 0 – 1000 ppm. Anturissa on puolijohdesensori, jota suojaa ruostumattomasta teräksestä valmistettu, sintrattu filteri. Anturi ilmoittaa vetytuloisuuden nousun äänimerkillä sekä välittää tiedon T3000-laitteeseen, joka antaa vetykaasupitoisuudesta numeerisen tuloksen 0,1 ppm:n tarkkuudella. Laitteistoon kuuluu myös keskusyksikkö, johon mittalaite sekä anturi kytketään. Keskusyksikössä on virtalähteen lisäksi 6-portainen herkkyyden säätö sekä nollaustoiminto, jonka avulla voidaan ottaa huomioon mitattavassa tilassa tapahtuva vedyn taustapitoisuuden nousu (Trotec 2015, 70 – 71).

6 SISÄILMAN EPÄPUHTAUDET

Sisäilmalla tarkoitetaan rakenteiden rajaamaa, sisätiloissa hengitettävää ilmaa, joka normaalian ilman aineosien lisäksi saattaa sisältää terveydelle haitallisia hiukkasmaisia ja kaasumaisia epäpuhtauksia. Sisäilmasto puolestaan käsittää hiukkasmaisten ja kaasumaisien epäpuhtauksien lisäksi myös fysikaalisten tekijöiden, kuten muun muassa lämpötilan, melun, kosteuden, säteilyn, ilmanvaihdon sekä valaistuksen vaikutuksen sisäilman terveellisyyteen (Sisäilmayhdistys 2008b). Sisäilman epäpuhtauksille on annettu ohjearvoja muun muassa Sosiaali- ja terveysministeriön julkaisemissa asumisterveysohjeessa (2003:1) sekä HTP-arvot 2012 – julkaisussa.

6.1 Mikrobit

Erilaisia mikro-organismeja eli mikrobeja on maapallolla lukematon määrä. Niiden vaatimat kasvuolosuhteet vaihtelevat huomattavasti eri mikrobilajien välillä. Monet mikrobeista ovat sairauksia aiheuttavia ja haitallisia, mutta osa mikrobeista on ihmiselle hyödyllisiä ja jopa elintärkeitä (Solunetti 2006). Tässä tutkimuksessa keskitytään rakenteissa esiintyviin mikrobilajeihin. Mikroobeiksi luokitellaan muun muassa bakteerit, hiivat sekä homeet. Edellä mainittuja mikrobeja esiintyy joka puolella ihmisen elinympäristöä. Mikrobien itiöitä leijailee ilmassa (luku 6.7), josta ne laskeutuvat muiden hiukkasten mukana esimerkiksi rakenteiden pinnoille. Mikrobit vaativat kasvaakseen vettä, happea, ravintoa sekä oikeanlaisen lämpötilan.

Rakennuksessa esiintyvät kosteusvauriot saattavat luoda mikrobikasvustolle otolliset kasvuolosuhteet. Suuri osa mikrobeista kasvaa rakenteissa vallitsevissa lämpötiloissa, joten ainoastaan rakenteissa, tai niiden pinnoilla, oleva vapaan veden määrä rajoittaa

mikrobien kasvua. Vapaan veden määrä eli vesiaktiivisuus kuvaa rakenteiden sisältämän, mikrobien käytössä olevan veden määrää verrattuna rakenteiden kokonaisvesipitoisuuteen. Käytännössä kaikki materiaalit sisältävät vettä. Vesi saattaa kuitenkin olla sitoutuneena esimerkiksi rakenteisiin tai vedessä oleviin kemikaaleihin, jolloin se ei ole mikrobien käytettävissä. Vesiaktiivisuus ilmoitetaan asteikolla 0 – 1, jossa arvo 1 tarkoittaa sitä, että kaikki vesi on mikrobien käytettävissä. Aktinobakteerit (luku 6.3) kykenevät kasvamaan vesiaktiivisuuden ylittäessä arvon 0,65. Suurin osa hiivoista ja homeista kykenee kasvamaan vesiaktiivisuuden noustessa alueelle 0,75 – 0,85. Sen sijaan niin sanotut indikaattorimikrobit (luku 6.2) viihtyvät parhaiten vasta vesiaktiivisuuden ollessa > 0,95. (Indooraid 2015a).

6.2 Indikaattorimikrobit

Kosteusvaurioindikaattori on mikrobi, jota ei yleensä tavata terveessä, vaurioitumattomassa rakennuksessa ja jonka esiintyminen rakennuksesta otetussa näytteessä viittaa siihen, että rakenteessa on tai on ollut kosteusvaurio. Indikaattorimikrobeina pidetään myös ns. tavanomaisia mikrobeja jos niitä esiintyy suurina pitoisuuksina näytteissä. (Sisäilmayhdistys 2008c).

Kosteusvaurioita indikoivista mikrobeista on laadittu erilaisia listoja eri tahojen, esimerkiksi eri laboratorioiden, toimesta. Mikrobien luokittelu perustuu kuitenkin usein niiden kasvuominaisuuksiin tai – olosuhteisiin, ei niiden terveysvaikutuksiin. Listoja päivitetään silloin tällöin, mutta kaikki yleisimmät listat perustuvat ns. Baarnin listaan, joka on tehty vuoden 1992 tiedon perusteella. Baarnin listan mukaan mikrobit jaetaan kolmeen eri luokkaan:

- Runsaasti kosteutta vaativat (RH > 90 - 95 %).
- Kohtalaista kosteutta vaativat (RH 85 - 90 %).
- Suhteellisen kuivassa viihtyvät mikrobit (RH < 85 %).

TAULUKKO 1. Kosteusvaurioindikaattorimikrobit (Sisäilmayhdistys 2008c)

Absidia	Chrysonilia	Rhinoclatiella
Acremonium	Chrysosporium	Rhizopus
Aspergillus flavus	Engyodontium	Rhodotorula

Aspergillus fumigatus	Eurotium	Scopulariopsis
Aspergillus ochraceus	Fusarium	Sporobolomyces
Aspergillus penicillioides	Exophiala	Sphaeropsidales
Aspergillus sydowii	Geomyces	Stachybotrys
Aspergillus terreus	Memnoniella	Streptomyces
Aspergillus versicolor	Mucor	Trichoderma
Aureobasidium	Oidiodendron	Tritirachium
basidiomykeetit	Paecilomyces	Ulocladium
Botrytis	Phialophara	Wallemia
Chaetomium	Phoma	

Rakenteissa olevia mikrobivaurioita tutkiessa on syytä pohtia, onko käytössä oleva käsite ”indikaattorimikrobi” hyödyllinen ja käyttökelpoinen vai aiheuttaako jatkuvasti muuttuva lista em. mikrobeista enemmän hämmennystä kuin hyötyä. Se, aiheuttaako sairastumisen ja herkistymisen indikaattorimikrobi vai joku muu kosteusvaurioituneessa rakennuksessa kasvava mikrobi, on terveyden kannalta yhdentekevää. Kosteus ja siihen liittyvä mikrobivaurio on korjattava joka tapauksessa. (Putus 2014, 124).

6.3 Aktinobakteerit

Aktinobakteereja kutsutaan joskus myös aktinomykeeteiksi tai sädesieniksi. Aktinobakteerit ovat maaperäbakteereita, jotka muodostavat itiöitä ja rihmastoja. Näin ollen ne muistuttavat kasvutavaltaan sieniä. Aktinobakteerit viihtyvät runsaassa kosteudessa ja ne luokitellaankin kosteusvaurioindikaattoreiksi (luku 4.2). Maatalousympäristössä saattaa ulkoa ja tuotantotiloista kulkeutua aktinobakteereita sisäilmaan esimerkiksi vaatteiden mukana, joten tällaisissa ympäristöissä aktinobakteerien esiintymistä ei voida pitää varmana merkinä kosteusvauriosta (Sosiaali- ja terveysministeriö 2003, 78). Kaupunkiympäristössä aktinobakteereja ei pitäisi esiintyä lainkaan rakennusten si-

säilmassa. Mikäli aktinobakteerien esiintyminen liittyy todettuun kosteusvaurioon, niiden voidaan todeta aiheuttavan terveyshaittaa pitoisuudesta riippumatta (Indooraid 2015b).

6.4 Haihtuvat orgaaniset yhdisteet

Sisäilmassa esiintyviä kaasumaisia epäpuhtauksia kutsutaan yleisnimityksellä VOC (engl. Volatile Organic Compounds) eli haihtuvat orgaaniset yhdisteet, joilla on luonnollisia sekä ihmisen aiheuttamia lähteitä. Yhdisteet ovat pienimolekyylisiä, huonosti veteen liukenevia ja korkean höyrynpaineen omaavia, joten ne haihtuvat ilmaan helposti. Yhdisteitä syntyy sekä teollisuuden sivutuotteina että mikrobien metabolia- eli aineenvaihduntatuotteina. Mikrobien tuottamia yhdisteitä kutsutaan yleisnimityksellä MVOC (engl. Microbial Volatile Organic Compounds). Mikrobit tuottavat yhdisteitä primaari- sekä sekundaarimetabolisesti. Mikrobien aineenvaihduntatuotteina syntyy hiilipohjaisia molekyyliä: mm. alkoholeja, aldehydejä, amineja, ketoneja, terpeeneitä sekä aromaattisia ja kloorattuja hiilivetyjä. Useilla em. yhdisteillä on matala hajukynnyks, joten ne ovat helppoja huomata aistinvaraisesti. (Santo-Pietro 2006).

6.5 Mykotoksiinit

Mykotoksiinit ovat mikrosienten sekundäärimetabolisesti tuottamia myrkkyyä. Tällä hetkellä ei pystytä varmasti sanomaan millä tavoin mykotoksiinit leviävät mikrobeista. Mykotoksiineja voi esiintyä mikrobin kasvualustassa, itiöissä tai rihmastoissa. Useimmat mykotoksiinit eivät ole yhtä helposti haihtuvia kuin VOC:t, joten ne kulkeutuvat elimistöön lähinnä partikkelien mukana. Kosteus- ja homevaurioon liittyvä mykotoksiinien haitallisuuden arviointi on usein vaikeaa, sillä mahdollisesti mykotoksiineja tuottavien mikrobien toksisuus riippuu muiden mikrobien läsnäolosta, kasvuolosuhteista ja – alustasta sekä lämpötilasta. Esimerkiksi rakennuksessa toksiineja tuottava mikrobi voi osoittautua laboratorio-olosuhteissa toksiineja tuottamattomaksi tai toisinpäin. Kosteusvaurioituneessa rakennuksessa mykotoksiineille altistuminen voi tapahtua ruoansulatuskanavan, ihon tai hengityselimistön kautta. (Putus 2014, 84–88).

6.6 Radon

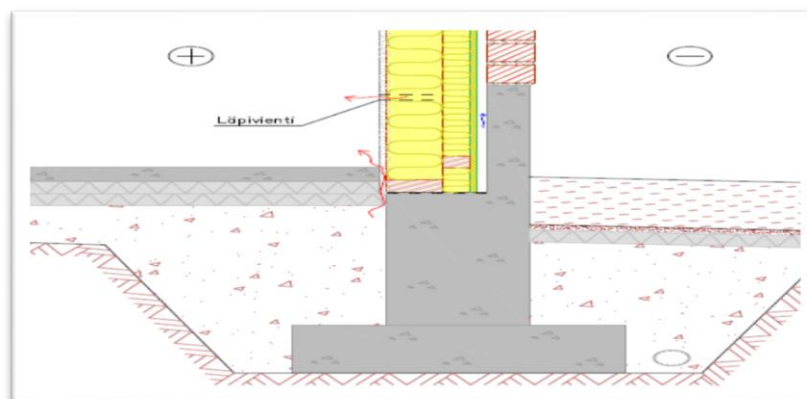
Ionisoivaa säteilyä lähettävät radioaktiiviset aineet kuuluvat osana ihmiseen ja hänen elinympäristöönsä. Luonnon taustasäteily aiheuttaa suurimman osan säteilyaltistuksesta, jonka suurin yksittäinen tuottaja on huoneilman radon hajoamistuotteineen. Sen arvioidaan aiheuttavan Suomessa n. 300 keuhkosyöpää vuosittain (Säteilyturvakeskus

2015). Luonnon radioaktiiviset aineet kehossa, kosminen säteily sekä ulkoinen säteily rakennusten ja maaperän radioaktiivisista aineista aiheuttavat keskimääräisestä vuotuisesta säteilyannoksesta noin kolmanneksen (Säteilyturvakeskus 2003, 112–120).

Radon on sisäilmassa esiintyvä, hajuton, mauton ja näkymätön radioaktiivinen kaasu. Radonia syntyy kallio- ja maaperässä radioaktiivisen uraanin toriumin hajoessa lukuisien vaiheiden kautta stabiiliksi, ei-aktiiviseksi lyijyksi. Radioaktiivisuuden yksikkö on becquerel (Bq), joka tarkoittaa yhden atomin hajoamista sekunnissa. Sisäilman radonpitoisuus ilmoitetaan becquereleinä kuutiometrissä ilmaa. Sisäilman suuri radonpitoisuus johtuu maaperästä sisätiloihin tulevasta, radonpitoisesta ilmavirtauksesta. Suomalaisissa asunnoissa keskimääräinen sisäilman radonpitoisuus on 120 becquerelia kuutiometrissä ilmaa (Bq/m³). Suomen keskiarvo on maailman suurimpia. Sen aiheuttaa kylmä ilmastomme, rakennusten perustamistapa ja tiiviys sekä paljon uraania sisältävä maankamara ja hyvin ilmaa läpäisevä rakennusmaa. Radon sisäilmassa aiheuttaa suomalaisille noin puolet vuotuisesta efektiivisestä säteilyannoksesta, keskimäärin 2 millisievertiä. (Säteilyturvakeskus 2003, 112).

Radonin kulkeutumiseen rakennuksen alta rakennuksen sisäilmaan on monia reittejä, muun muassa:

- maanvaraisen lattialaatan ja sokkelin välinen kutistumarako (kuva 8)
- alapohjalaatan ja kantavien väliseinien liitoskohdat
- kantavat väliseinät, jotka läpäisevät alapohjarakenteen
- lattialaatan halkeamat
- kellarin maalattia
- lattialaatan läpiviennit
- takan ja lattian saumat tai takkarakenteet



KUVA 8. Poikkileikkaus alapohjan ja ulkoseinän liittymästä (Suvilehto 2015)

Radonkaasu ei itsessään aiheuta keuhkosityöpävaaraa vaan vaara aiheutuu radonin lyhytikäisistä hajoamistuotteista. Radonkaasu sekä ilmassa leijuvat hajoamistuotteet kulkeutuvat keuhkoihin hengitysilman mukana, jolloin hajoamistuotteet aiheuttavat säteilyannoksen tarttuessaan keuhkoputkistoon ja – rakkuloihin. Radonin ja keuhkosityövän välistä yhteyttä on selvitetty ainakin epidemiologisesti ja eläinkokein. Asuinympäristössä radonista aiheutuva keuhkosityöpäriski on vaikea tutkittava, sillä todella suuret pitoisuudet ovat suhteellisen harvinaisia. Keuhkosityöpätapauksissa radonin osuutta on vaikea saada näkyviin, sillä kymmenienkin vuosien takainen altistuminen on arvioitava tämän hetkisen radonaltistumisen perusteella. (Säteilyturvakeskus 2003, 118–120).

Sosiaali- ja terveysministeriön päätös asuntojen huoneilman radonpitoisuudesta määrittää, että huoneilman radonpitoisuuden vuosikeskiarvo ei saa ylittää arvoa 400 Bq/m³. Uudisrakentamisessa asunto tulee suunnitella ja toteuttaa niin, että radonpitoisuuden vuosikeskiarvo ei ylitä arvoa 200 Bq/m³ (STM 994/1992). Edellä mainittuja arvoja voidaan soveltaa myös muihin tiloihin. (Sosiaali- ja terveysministeriö 2003, 27–28).

6.7 Hiukkaset

Sisäilmassa leijailee erilaisista päästölähteistä peräisin olevia mikroskooppisia hiukkasia eli aerosoleja. Sisäilman hiukkaset voidaan jakaa kolmeen luokkaan: kokonaisleijumaan, hengitettäviin hiukkasiin ja pienhiukkasiin. Kokonaisleijuma pitää sisällään kaikki ilmassa leijailevat hiukkaset, mukaan lukien pölyn. Hengitettävät hiukkaset ovat karkeita, aerodynaamiselta halkaisijaltaan alle 10 µm kokoisia ja pienhiukkaset ovat hienoja, aerodynaamiselta halkaisijaltaan alle 2,5 µm kokoisia hiukkasia (Pönkä 2006, 75). Karkeat hiukkaset syntyvät useimmiten esimerkiksi mekaanisen hankauksen seurauksena, kun taas hienot hiukkaset muodostuvat tiivistymällä kaasuista. Biologista alkuperää olevat hiukkaset, eli bioaerosolit, ovat peräisin orgaanisesta lähteestä. Bioaerosoleihin lasketaan muun muassa mikrobit ja niiden itiöt sekä eläimistä ja kasveista peräisin olevat allergeenit (Hinds 1999, 394).

Bioaerosolit ovat erittäin pienikokoisia (taulukko 2) partikkeleita, joten ne leijailevat väliaineena toimivan kaasun, eli ilman mukana ajoittain pitkiäkin aikoja.

TAULUKKO 2. Bioaerosolien partikkelikokoja

Virukset	0,02 – 0,3 µm
Bakteerit	0,3 – 10 µm
Sienien itiöt	0,5 – 30 µm

Siitepöly	10 – 100 µm
-----------	-------------

1800-luvun alkupuolella Robert Brown huomasi, että mikroskooppiset hiukkaset värisevät kelluessaan fluidissa. Tätä värähtelevää liikettä kutsutaan Brownin liikkeeksi. Noin 100 vuotta myöhemmin Albert Einstein osoitti, että hiukkasen värinä johtuu sitä ympäröivän fluidin molekyylien lämpöliikkeen aiheuttamista osumista hiukkaseen. Pienillä, alle 0,1 µm kokoisilla hiukkasilla molekyylien lämpöliike on konvektiota lukuun ottamatta pääasiallinen kulkeutumismekanismi. Lämpöliikkeen vaikutuksesta erittäin pienet hiukkaset kulkeutuvat esimerkiksi keuhkojen mikroskooppisissa putkistoissa. (Hinds 1999, 150).

6.8 Terveyshaitoista

Terveydensuojelulaissa (763/1994) määritellään asuntojen ja muiden oleskelutilojen terveydelliset vaatimukset. Lain 1 §:n mukaan terveyshaitalla tarkoitetaan ihmisessä todettavaa sairautta, muuta terveydenhäiriötä tai sellaisen tekijän tai olosuhteen esiintymistä, joka voi vähentää väestön tai yksilön elinympäristön terveellisyyttä. Lain 26 §:n ja 27 §:n mukaan asunnon ja muun sisätilan sisäilman tulee olla fysikaalisten ja mikrobiologisten olosuhteiden kannalta sellainen, että siitä ei aiheudu terveyshaittaa. Mikäli terveyshaitalle altistavia tekijöitä kuitenkin havaitaan, on toimenpiteisiin haitan ja siihen johtaneiden tekijöiden selvittämiseksi, poistamiseksi tai rajoittamiseksi ryhdyttävä viipymättä.

Terveyshaittana pidetään myös altistumista terveydelle vaaralliselle aineelle tai tekijälle siinä määrin, että sairauden tai sen oireiden syntyminen on mahdollista. Tällainen tilanne saattaa syntyä silloin, kun ihminen asuu tai oleskelee tilassa, jossa hän voi altistua mikrobikasvustosta peräisin oleville soluille tai mikrobien aineenvaihduntatuotteille. (Sosiaali- ja terveysministeriö 2003).

Terveydensuojelulain (763/1994) ja Sosiaali- ja terveysministeriön julkaisujen lisäksi rakennusten terveellisyyttä käsitellään useissa säädöksissä. Näistä keskeisimpiä ovat maankäyttö- ja rakennuslaki (132/1999) sekä työsuojelulainsäädäntö (738/2002 ja 1383/2001). Säädösten lisäksi Ympäristöministeriö ylläpitää Suomen rakennusmääräyskokoelmaa, johon kerätään maankäyttö- ja rakennuslain (132/1999) nojalla annetut rakentamista koskevat säädökset, rakentamismääräykset sekä Ympäristöministeriön ohjeet.

Useimpien kosteusvauriorakennuksille tyypillisten homeiden itiöt ja monet mikrobit ovat kooltaan hyvin pieniä, joten ne leijuvat pitkään ilmassa ja pääsevät limakalvoille, hengitysteihin ja jopa keuhkorakkuloihin asti. Jotkin mikrobit saattavat tuottaa toksineja eli myrkyjä. Mikrobien tuottamat toksinit aiheuttavat silmien, ihon ja hengitysteiden ärsytysoireita. Kosteusvauriorakennuksissa voi olla useita toksineja tuottavia mikrobeja samanaikaisesti, jolloin terveyshaitta syntyy eri toksinien yhteisvaikutuksena. Esimerkiksi *Streptomyces*-bakteereilla ja tietyillä homeilla on kokeellisissa tutkimuksissa havaittu synergistisiä vaikutuksia, eli ne aiheuttavat yhteisvaikutuksillaan suurempaa haittaa kuin kummankaan mikrobin osavaikutusten summa antaisi olettaa (Indooraid 2015b).

Useiden, eri maissa ja erilaisissa ilmasto-olosuhteissa, suoritettujen kliinisten tutkimusten mukaan rakennusten home- ja kosteusvaurioihin liittyville mikrobeille altistuminen lisää riskiä sairastua mm. keuhko-tulehdukseen, allergiseen alveoliittiin (keuhkorakku-latulehdus) sekä krooniseen sivuontelo-tulehdukseen. Tutkimuksissa löydetty toksikologiset todisteet osoittavat, että kosteusvaurioituneista rakennuksista eristetyille mikroorganismeille, mukaan lukien itiöt, metaboliatuotteet ja muut komponentit, altistuminen aiheuttaa äkillisiä, monimuotoisia myrkytysreaktioita. Mikrobikasvustojen tuottamien itiöiden, allergeenien, myko- ja endotoksiinien sekä haihtuvien orgaanisten yhdisteiden aiheuttamia terveyshaittoja ei ole vielä konklusiivisesti tutkittu, mutta liiallinen altistuminen mille tahansa näistä voi aiheuttaa terveyshaittaa. (WHO 2009).

Mikrobivaurioituneista rakenteista sisäilmaan pääsevien yhdisteiden terveyshaittojen minimoimiseksi on oleellista, että kosteus- ja homevauriot korjataan mahdollisimman varhain. Siksi olisi tärkeää, että kosteusvaurioiden syyt ja laajuus selvitetään heti kun vauriot / oireet havaitaan. Sairastumisen alkuvaiheessa edellytykset osoittaa oireiden syy-yhteys rakennuksen kosteusvaurioon ovat parhaat. Selvitystoimenpiteiden viivytely tautiepäilyn alkuvaiheessa vaikeuttaa syy-yhteyden selvittelyä. Takautuva, vuosia sitten ilmenneen taudin etiologinen (syy-seuraus) selvittely on usein mahdotonta. (Majvik II 2007).

7 KAASUJEN KÄYTTÄYTYMINEN

Kaasu on yksi aineen kolmesta olomuodosta nesteen ja kiinteän lisäksi. Aine pysyy kemiallisesti samana olomuodon muuttuessa, ainoastaan aineen fysikaaliset ominaisuudet

muuttuvat. Aineen olomuoto eli faasi määräytyy siitä, kuinka voimakkaasti aineen rakenneosat ovat sitoutuneet toisiinsa. Lämpöliike pyrkii liikuttamaan rakenneosia paikaltaan, kun taas rakenneosien välinen vetovoima pyrkii sitomaan ne toisiinsa. Aineen ollessa kaasumaisessa olomuodossa, aineen rakenneosat ovat täysin erillään toisistaan ja pystyvät liikkumaan vapaasti kaikkiin suuntiin. Kaasumolekyylien törmäily esimerkiksi astian seinämiin aiheuttaa seinään impulssin eli paineen, joka on yhtä suuri kuin molekyylin liikemäärän muutos. Mitkä tahansa kaasut sekoittuvat toisiinsa missä tahansa olosuhteissa, sillä aineen ollessa kaasufaasissa, sen rakenneosat ovat niin etäällä toisistaan, että eri kaasujen rakenneosat voivat jakaantua tasaisesti toistensa lomaan. (Antila ym. 2010, 43–45).

7.1 Ideaalikaasujen lait

Seuraavat lait ja yhtälöt pätevät ainoastaan ideaalikaasuille. Ne antavat kuitenkin hyvän arvion useimpien todellisten kaasujen käyttäytymisestä normaaleissa paine- ja lämpötilaolosuhteissa. Boylen, Gay-Lussacin sekä Charlesin kaasulait käsittelevät kaasun lämpötilan, paineen ja tilavuuden välisiä riippuvuuksia, jolloin oletetaan, että ainemäärä pysyy vakiona. Avogadron laki puolestaan käsittelee kaasun tilavuuden ja ainemäärän välistä riippuvuutta. (Laitinen ym. 1982).

Boylen laki eli isoterminen prosessi

Boylen laki osoittaa, että lämpötilan ollessa vakio, ideaalikaasun paineen ja tilavuuden tulo on vakio. Jos säiliön, jossa on tietty määrä ainetta, tilavuutta pienennetään, suurempi määrä molekyyliä törmää astian seinämiin aikayksikköä kohti kasvattaen säiliön sisäistä painetta. Täten voidaan Boylen laki kirjoittaa kaavan 1 tai 2 mukaisesti

$$p_1V_1 = p_2V_2 \tag{1}$$

tai

$$pV = k_1 = \text{vakio} \tag{2}$$

jossa p = paine (Pa)

V = tilavuus (m³)

k_1 = yhtälön tuottama vakio (J)

Gay-Lussacin laki eli isokoorinen prosessi

Gay-Lussacin laki osoittaa, että tilavuuden ollessa vakio, ideaalikaasun paine on suoraan verrannollinen lämpötilaan. Tämä tarkoittaa sitä, että kaasu laajenee jokaista Celsius-astetta kohti $1/273$ osan siitä tilavuudesta, joka sillä on 0 °C :ssa. Gay-Lussacin laki voidaan kirjoittaa kaavan 3 tai 4 mukaisesti

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad (3)$$

tai

$$\frac{p}{T} = k_2 = \text{vakio} \quad (4)$$

jossa p = paine (Pa)

T = termodynaaminen lämpötila (K)

k_2 = yhtälön tuottama vakio ($\text{N/m}^2 \text{ K}^{-1}$)

Koska molekyylien liikemäärä, eli paine on suorassa yhteydessä lämpötilaan, voidaan todeta lämpötilan olevan molekyylien liike-energiaa ja paineen molekyylien törmäilyä seinämiin.

Charlesin laki eli isobaarinen prosessi

Charlesin laki osoittaa, että paineen ollessa vakio, ideaalikaasun tilavuus on suoraan verrannollinen lämpötilaan. Tämä tarkoittaa sitä, että jos lämpötila kaksinkertaistetaan, myös kaasun tilavuus kaksinkertaistuu edellyttäen, että kaasun paine pysyy vakiona. Charlesin laki voidaan kirjoittaa kaavan 5 tai 6 mukaisesti

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (5)$$

tai

$$\frac{V}{T} = k_3 = \text{vakio} \quad (6)$$

jossa V = tilavuus (m^3)

T = termodynaaminen lämpötila (K)

k_3 = yhtälön tuottama vakio ($\text{m}^3 \text{ K}^{-1}$)

Avogadron laki

Avogadron laki osoittaa, että lämpötilan ja paineen pysyessä samana, kaasun tilavuus on suoraan verrannollinen ainemäärään. Tästä johtuen yhtä suuret tilavuudet eri kaasuja sisältävät saman ainemäärän. Avogadron laki voidaan kirjoittaa kaavan 7 tai 8 mukaisesti

$$\frac{V_1}{n_1} = \frac{V_2}{n_2} \quad (7)$$

tai

$$\frac{V}{n} = k_4 = \text{vakio} \quad (8)$$

jossa V = tilavuus (m^3)
 n = ainemäärä (mol)
 k_4 = yhtälön tuottama vakio ($\text{m}^3 \text{mol}^{-1}$)

Yhdistetty kaasulaki

Yhdistetty kaasulaki saadaan yhdistämällä Boylen, Gay-Lussacin, Charlesin sekä Avogadron lait (kyseessä ei ole varsinaisesti kaavan johtaminen vaan yhdisteleminen). Yhdistetty kaasulaki voidaan kirjoittaa kaavan 9 mukaisesti

$$\frac{p_1 V_1}{T_1 n_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2 n_2} \quad (9)$$

jossa p = paine (Pa)
 V = tilavuus (m^3)
 T = termodynaaminen lämpötila (K)
 n = ainemäärä (mol)

Yleinen kaasun tilanyhtälö

Ideaalikaasujen yleinen tilanyhtälö kertoo ideaalikaasun paineen, tilavuuden ja lämpötilan välisistä vuorovaikutuksista. Tilanyhtälö on huomattu toimivaksi sekä kokeellisesti että teoreettisesti, ja sitä voidaankin soveltaa menestyksekkäästi kaikkiin pienipaineisiin kaasuihin (Hautala ym. 2009, 210). Kaasujen yleinen tilanyhtälö voidaan kirjoittaa kaavan 10 mukaisesti

$$pV = nRT \quad (10)$$

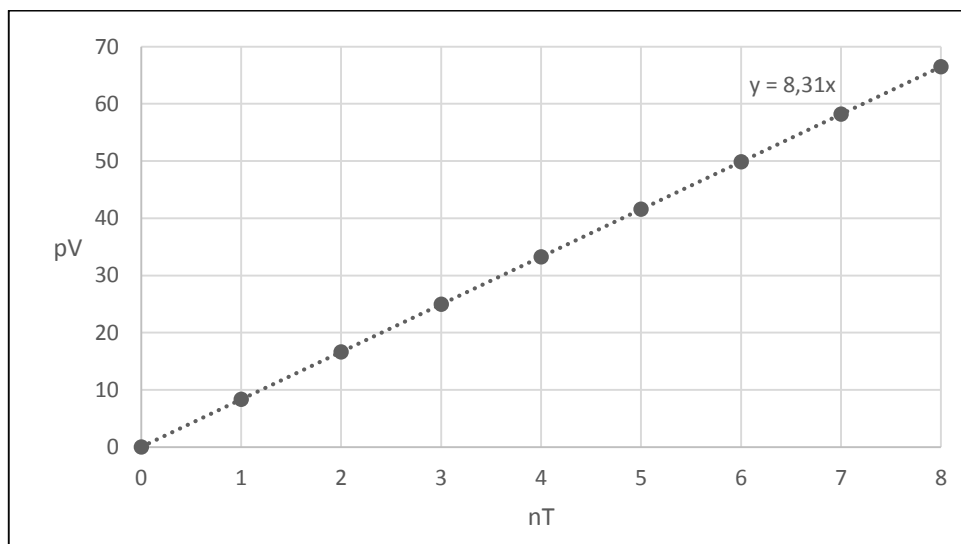
jossa $p = \text{paine (Pa)}$
 $V = \text{tilavuus (m}^3\text{)}$
 $n = \text{ainemäärä (mol)}$
 $R = \text{yleinen kaasuvakio (J mol}^{-1}\text{ K}^{-1}\text{)}$

Yleinen kaasuvakio voidaan laskea käyttämällä tilanyhtälöä, kun tiedetään, että yksi mooli kaasua NTP-olosuhteissa vaatii 22,414 dm³:n tilavuuden (Antila ym. 2010, 43). Yleinen kaasuvakio (R) lasketaan kaavan 11 mukaisesti

$$R = \frac{pV}{nT} = \frac{101325 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \times 0,022414 \text{ m}^3}{1 \text{ mol} \times 273,15 \text{ K}} = 8,314 \text{ J}/(\text{mol K}) \quad (11)$$

jossa $p = \text{paine (Pa)}$
 $V = \text{tilavuus (m}^3\text{)}$
 $n = \text{ainemäärä (mol)}$
 $T = \text{termodynaaminen lämpötila (K)}$

Yleinen kaasujen tilanyhtälö voidaan havainnollistaa myös kaavion avulla (kuva 9). Kun ideaalikaasun tilaa mitataan, kaikki mittaustulokset asettuvat kaavioon suoralle, jonka kulmakerroin on yleinen kaasuvakio.



KUVA 9. Havainnekuva ideaalikaasujen tilanyhtälöstä (Tuukkanen 2015)

7.2 Konvektio, diffuusio sekä noste

Konvektio on lämmön siirtymistä fluideissa virtauksen mukana. Konvektio voidaan jakaa kahteen luokkaan; vapaaseen ja pakotettuun konvektioon. Vapaassa konvektiossa

lämmön siirtyminen aiheuttaa tiheyseroja fluidissa. Tällöin lämpimämpi, eli tiheydeltään pienempi fluidi pyrkii kohoamaan luonnollisen paine-eron aiheuttaman nosteen vaikutuksesta ylös ja kylmempi, eli tiheydeltään suurempi fluidi laskeutuu alaspäin. Pakotetussa konvektiossa paine-ero aiheuttaa fluidien virtausta rakojen läpi. Pakotettua konvektiota hyödynnetään merkkiainekoemenetelmässä, jolloin saadaan fluidit virtaamaan rakenteesta tutkittavan tilan suuntaan.

Ideaalikaasujen seoksessa jokainen seoksen kaasu on riippumaton muista seoksen kaasuista eli ideaalikaasujen yleistä tilanyhtälöä voidaan käyttää jokaisen kaasun kohdalla erikseen. Tätä kutsutaan Daltonin osapainelaki, jonka mukaan kaasuseoksen kokonaispaine on sen osakaasujen paineiden summa. Kaasun osapaine on suoraan verrannollinen sen mooliosuuteen kaasuseoksessa. Daltonin laki joka voidaan esittää kaavan 12 mukaisesti

$$P_{kok} = p_1 + p_2 + \dots + p_n \quad (12)$$

jossa P_{kok} = kaasuseoksen kokonaispaine (Pa)
 p_1, p_2, p_n = osakaasujen paineet (Pa)

Diffuusioksi kutsutaan ilmiötä, jossa luonnolla on yleinen pyrkimys tasoittaa vallitsevat pitoisuus-, paine- sekä lämpötilaerot. Mikäli aineen pitoisuus vaihtelee, pyrkii molekyylien satunnainen liike tasoittamaan tämän pitoisuuseron. Esimerkiksi laskettaessa merkkiainekaasua ilman täyttämään rakenteeseen, pitoisuuseron vaikutuksesta ilma ja merkkiainekaasu lopulta sekoittuvat tasaisesti koko käytettävissä olevalle alueelle. Näin ollen merkkiainekaasun pitoisuus muuttuu normaaliolosuhteissa aina suuremmasta pienempään. Kaasuissa molekyylit etenevät suoraviivaisesti, kunnes ne toiseen molekyyliin törmätessään vaihtavat suuntaa. Aine diffundoituu myös näennäisesti tiiviin materiaalin läpi. Esimerkiksi ehjien rakenteiden rajapinnoilla on aina laminaari fluidikerros, jonka läpi vesihöyryn siirtyminen rakenteeseen on mahdollista ainoastaan diffundoitumalla. Aineen diffundoitumalla siirtymiseen pätee Fickin I laki, joka voidaan kirjoittaa kaavan 13 mukaisesti

$$q_n = -DA \frac{\Delta c}{\Delta x} \quad (13)$$

jossa q_n = siirtyneen aineen määrä aikayksikössä (esim. hiukkasta/sekunti)
 D = diffuusiokerroin (m^2/s)
 A = pinta-ala (m^2)

Δc = pitoisuuden muutos (esim. hiukkasta/m³)

Δx = Aineen kulkema matka (m)

Diffuusiokerroin voidaan laskea keskimääräisen nopeuden ja keskimääräisen vapaan matkan avulla kaavan 14 mukaisesti

$$D = \frac{\pi}{8} \times \lambda \times v_a \quad (14)$$

jossa D = diffuusiokerroin (m²/s)

v_a = molekyylien nopeuksien aritmeettinen keskiarvo (m/s)

λ = keskimääräinen vapaa matka (m)

Diffuusionopeuden vertailu eri kaasujen välillä voidaan tehdä käyttämällä niin sanottua Grahamin lakia, jonka mukaan kaasun diffuusionopeus on käänteisesti verrannollinen kaasun molekyyli­massan neliöjuureen. Laki voidaan kirjoittaa kaavan 15 mukaisesti

$$\frac{G_1}{G_2} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} \quad (15)$$

jossa G_1, G_2 = kaasujen diffuusionopeus (moolia/aikayksikkö)

M_1, M_2 = kaasujen molekyyli­massa (g/mol)

Kun fluidiin upotetaan kappale, aiheuttaa ympäröivä fluidi kappaleeseen hydrostaattista painetta. Tämän paineen kappaleeseen aiheuttamaa voimaa kutsutaan nosteeksi. Nosteen määrittää Arkhimedeen laki, jonka mukaan fluidiin upotettuun kappaleeseen kohdistuva noste on yhtä suuri kuin kappaleen syrjäyttämän fluidin paino. (Hautala ym. 2009, 106–109). Nosteen voima voidaan laskea kaavan 16 mukaisesti

$$F_B = \Delta \rho \times g \times V \quad (16)$$

jossa F_B = nosteen aiheuttama voima (N)

$\Delta \rho$ = fluidien tiheysero (kg/m³)

g = painovoiman kiihtyvyy­ys (9,81 m/s²)

V = tilavuus (m³)

Kaasufaasissa ja nestefaasissa oleva aine käyttäytyvät lähtökohtaisesti samalla tavalla. Esimerkiksi ilmaa, jonka keskimääräinen moolimassa on noin 29 g/mol, raskaampi kaasu voidaan ”kaataa” astiaan, jossa kaasu täyttää astian syrjäyttäen kevyemmän kaasun. Kaasumolekyylien sisältämä lämpö- eli liike-energia on kuitenkin niin suuri, että

kaasumolekyylit törmäilevät sattumanvaraisesti joka suuntaan. Tästä johtuen raskainkin kaasu leviää ajan myötä diffundoitumalla joka puolelle käytettävissä olevaa tilaa.

7.3 Kineettistä kaasuteoriaa

Myös kineettinen kaasuteoria perustuu ideaalikaasujen lakeihin. Kaasun aiheuttama paine, eli molekyylien liike, on suoraan verrannollinen kaasun lämpötilaan. Kaasumolekyylien nopeus taas riippuu kaasumolekyylien massasta. Kaasumolekyylit kimpoilevat toisistaan satunnaisesti saaden ja menettäen liike-energiaa törmäyksissä, joten saman kaasun eri molekyylit liikkuvat eri nopeuksilla. Näin ollen kaasumolekyylien tarkkaa nopeutta on erittäin vaikea määrittää. Kaasumolekyylien nopeuksien keskiarvoja voidaan kuitenkin määrittää laskennallisesti kaavan 17 ja 18 mukaisesti

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3 \times R \times T}{M}} \quad (17)$$

jossa v_{rms} = molekyylien nopeuksien neliöiden keskiarvon neliöjuuri (m/s)

R = yleinen kaasuvakio ($\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$)

T = termodynaaminen lämpötila (K)

M = aineen moolimassa (kg/mol)

tai

$$v_a = \sqrt{\frac{8 \times R \times T}{\pi \times M}} \quad (18)$$

jossa v_a = molekyylien nopeuksien aritmeettinen keskiarvo (m/s)

R = yleinen kaasuvakio ($\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$)

T = termodynaaminen lämpötila (K)

M = aineen moolimassa (kg/mol)

Kaasujen molekyylit kulkevat laskennallisesti erittäin suurilla nopeuksilla. Vaikka esimerkiksi vetymolekyylin laskennallinen nopeus (v_{rms}) 20 °C lämpötilassa on noin 1910 m/s, se ei kuitenkaan päädy niin nopeasti huoneen toiselle puolelle kuin nopeudesta voisi suoraan päätellä. Tämä johtuu siitä, että vetymolekyylit törmäilevät jatkuvasti toisiinsa sekä väliaineena toimivan fluidin molekyyliin. Molekyylin keskimäärin kulkeva matka törmäysten välillä voidaan laskea kaavan 19 mukaisesti

$$\lambda = \frac{R \times T}{\sqrt{2} \times \pi \times d^2 \times N_a \times P} \quad (19)$$

jossa λ = keskimääräinen vapaa matka (m)
 R = yleinen kaasuvakio ($\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$)
 T = termodynaaminen lämpötila (K)
 d = molekyylin kineettinen halkaisija (m)
 N_a = Avogadron vakio (mol^{-1})
 P = paine (Pa)

7.4 Kaasujen virtaus

Rakenteista ilmapuotoa aiheuttavien rakojen muoto vaihtelee huomattavasti riippuen raon aiheutumistavasta (esim. repeämä, halkeama tai esineen läpäisy), joten raon geometrisen muodon määrittäminen on erittäin hankalaa. Aineen virtausmäärään vuotokohdasta vaikuttaa raon geometrisen muodon lisäksi aineen fysikaaliset ominaisuudet, kuten viskositeetti, molekyyli­massa sekä paine-ero. Esimerkiksi samanlaisissa olosuhteissa heliumkaasu kulkeutuu vakio­idun raon läpi 2,7 kertaa ilmaa nopeammin. (Vtechonline 2006).

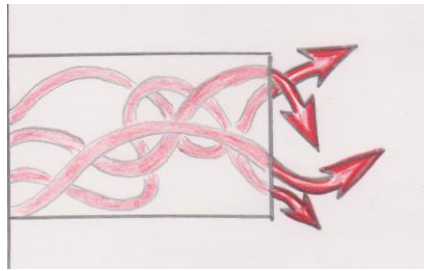
Kaasujen virtaukselle on määritetty kolme eri tyyppiä: turbulenttinen, laminaarinen sekä transitionaalinen. Virtauksen tyyppin määrittää Reynoldsin luku, joka kuvaa fluidien kiihdyttämiseen liittyvien hitausvoimien suhdetta kitkavoimiin. Reynoldsin luvun kuvaama virtaustyyppi pätee kaasujen raosta virtauksen lisäksi myös kaasujen virtaukseen kappaleen, esimerkiksi pienhiukkasen, ympäri. Reynoldsin luku voidaan laskea kaavan 20 mukaisesti

$$Re = \frac{\rho v D}{\eta} = \frac{v D}{\nu} \quad (20)$$

jossa ρ = fluidin tiheys (kg/m^3)
 v = keskimääräinen nopeus (m/s)
 η = fluidin viskositeetti (Pa s)
 ν = kinemaattinen viskositeetti (m^2/s)
 D = esimerkiksi putken halkaisija (m)

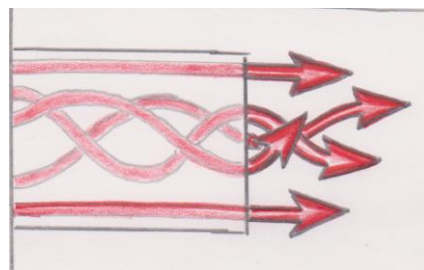
Mikäli Reynoldsin luku < 2100 , on virtaus laminaaria, ja mikäli luku on > 3000 , on virtaus turbulenttia. Mikäli luku on näiden välissä, on virtaus transitionaalinen.

Turbulenttista virtausta (kuva 10) esiintyy yleensä suurien vuotojen ja paine-erojen vaikutuksesta tai virtausaukon halkaisijan ollessa suuri. Tällöin fluidin rakenneosat eivät etene lineaarisesti vaan virtauksessa esiintyy pyörteilyä.



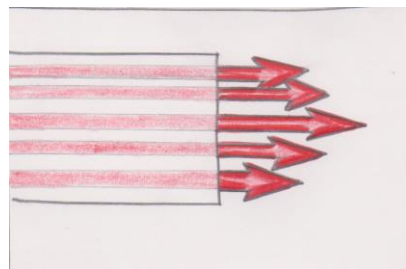
KUVA 10. Havainnekuva turbulentsista virtauksesta (Hakkarainen 2015)

Transitionaalinen virtaus (kuva 11) on yhdistelmä turbulentsista ja laminaarisesta virtauksesta. Tällöin fluidin rakenneosat etenevät virtausalueen rajapinnoilla laminaarisesti ja virtausalueen keskellä turbulentsisti.



KUVA 11. Havainnekuva transitionaalisesta virtauksesta (Hakkarainen 2015)

Laminaarisessa virtauksessa (kuva 12) fluidin rakenneosat etenevät lineaarisesti pitkin virtauskanavaa. Esimerkiksi putkessa, virtausnopeus on sitä suurempi, mitä lähempänä fluidi virtaa putken keskikohtaa, sillä putken seinämän lähellä aineen viskositeetti hidastaa fluidin virtausta.



KUVA 12. Havainnekuva laminaarisesta virtauksesta (Hakkarainen 2015)

Laminaarisesta virtauksesta esiintyy useimmiten pienten paine-erojen vaikutuksesta. Näin ollen merkkiainekokeissa käytettävien kaasujen virtauksia tutkittaessa voidaan olettaa virtauksen olevan laminaarisesta, sillä paine-erot ovat yleensä korkeintaan kymmenien Pascalien luokkaa. Laminaarisen virtauksen laskeminen on lisäksi huomattavasti helpompaa kuin luonteeltaan kaaottisen, turbulentsin virtauksen. (Alicat 2014).

Kapean raon kautta kulkeva laminaarisen virtauksen tilavuusvirta voidaan laskea kaavan 21 mukaan

$$Q = \frac{h^2 A}{12 \eta} \times \frac{\Delta p}{x} \quad (21)$$

jossa h = raon korkeus (m)
 A = raon poikkipinta-ala (m²)
 η = virtaavan fluidin dynaaminen viskositeetti (Pa s)
 Δp = paine-ero (Pa)
 x = raon pituus (m)

7.5 Ilma

Meitä ympäröivä ilma on kaasuseos, joka koostuu useasta kaasusta (taulukko 3). Kaasujen lisäksi ilma sisältää siinä leijailevia hiukkasia, kuten pölyä, itiöitä ja mikrobeja. Ilma sisältää myös vaihtelevissa määrin vettä. Puhdas ilma on hajutonta, mautonta ja väritöntä. Ilman molekyylimassa on 29 g/mol ja ilman tiheys NTP-olosuhteissa on 1,293 kg/m³.

TAULUKKO 3. Kuivan ja hiukkasista vapaan ilman tyypillinen koostumus

<u>Aine</u>	<u>%-osuus</u>
Typpi (N ₂)	78,08
Happi (O ₂)	20,95
Argon (Ar)	0,93
Hiilidioksidi (CO ₂)	0,033
Neon (Ne)	0,0018
Helium (He)	0,00052
Metaani (CH ₄)	0,00002
Krypton (Kr)	0,00011
Vety (N ₂)	0,00005
Typpioksidi (N ₂ O)	0,00005
Ksenon (Xe)	0,0000087

7.6 Rikkiheksafluoridi (SF₆)

Rikkiheksafluoridi on NTP-olosuhteissa hajuton ja väritön kaasu, jonka molekyyli koostuu yhdestä rikkiatomista ja siihen kovalenttisella sidoksella liittyneistä kuudesta

fluoriatomista. Näin ollen rikkiheksafluoridimolekyyli on rakenteeltaan erittäin vahva; sen molekyyli rakenne pysyy vakaana jopa 500 °C:een asti. Se on palamaton eikä se reagoi veden, kloorin tai happojen kanssa. (Electrical4you 2013). Kaupalliseen tarkoitukseen rikkiheksafluoridia valmistetaan antamalla fluorin reagoida rikin kanssa eksotermisessä reaktiossa kaavan 22 mukaisesti



jossa S = rikkimolekyyli
 F₂ = fluorimolekyyli
 SF₆ = rikkiheksafluoridimolekyyli
 1096 kJ = reaktion tuottama lämpömäärä

Kaasun valmistusprosessissa syntyy sivutuotteina pieniä määriä erilaisia rikki-fluoriyhdisteitä, kuten SF₄, SF₂, S₂F₂ ja S₂F₁₀. (Airliquide 2013).

Fysikaaliset ja kemialliset perusominaisuudet:

Rikkiheksafluoridin ominaisuuksia on joiltakin osin tutkittu erittäin vähän tai ominaisuudet eroavat toisistaan lähteistä riippuen. Erot johtuvat siitä, että kyseessä ovat useimmiten kokeellisesti määritellyt suureet, jolloin tuloksiin vaikuttaa koejärjestelyissä vallitsevat olosuhde-erot. Tässä tutkimuksessa käytetyt ominaisuudet on yhdistetty useammasta lähteestä (Airliquide 2013, Pubchem 2015, AGA OY 2013a) löytyneiden tietojen mukaan. Listatut kaasun ominaisuudet pätevät NTP-olosuhteissa, ellei toisin ole mainittu, ja laskennassa olen käyttänyt ideaalikaasujen lakeja.

CAS-numero: 2551–62-4

Molekyyli massa: 146,1 g/mol

Kaasun tiheys: 6,52 kg/m³

Suhteellinen tiheys (ilma = 1): 5,05

Kaasumolekyylin kineettinen halkaisija: $4,9 \times 10^{-10}$ m

Sulamispiste: - 50,8 °C

Kiehumispiste: - 64 °C

Kriittinen lämpötila: 45,5 °C

Kriittinen paine: 37,5 bar

Kolmois piste: -49,4 °C, 2,26 bar

Höyrynpaine (21 °C): 21,5 bar

Dynaaminen viskositeetti: $1,377 \times 10^{-5}$ Pa s

Kinemaattinen viskositeetti: $2.11 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

HTP-arvo (8h): 1000 ppm

HTP-arvo (15 min): 1300 ppm

Rikkiheksafluoridi kuuluu fluorattuihin kasvihuonekaasuihin eli F-kaasuihin, joihin rikkiheksafluoridin lisäksi kuuluvat fluorihilivedyt (HFC-yhdisteet) sekä perfluorihilivedyt (PFC-yhdisteet). Rikkiheksafluoridi on yksi maailman voimakkaimmista kasvihuonekaasuista. Sen GWP-indeksi on 22800 ja sen arvioidaan pysyvän ilmakehässä jopa yli 3000 vuotta. (EU 517/2014). Rikkiheksafluoridin kulkeutumisesta ilmakehään pyritään hillitsemään vuonna 2015 voimaan tulleella, niin sanotulla F-kaasusetuksella (EU 517/2014).

7.7 Typpi-vety

Vielä 1990-luvulla helium oli yleisimmin käytetty kaasu merkkiainekokeissa, vaikka vetykaasun ominaisuudet (aineiden taustapitoisuus ilmakehässä sekä molekyylien nopeus) ovat joiltakin osin huomattavasti paremmin soveltuvia vuotojen paikallistamiseen. Tämä johtui siitä, että vetykaasua ei uskallettu käyttää sen herkän syttyvyyden takia eikä kenttätutkimuksiin soveltuvia vetykaasunilmaisimia ollut saatavissa. Puoli-johdesensoreiden markkinoille tulon myötä kaasunilmaisimista saatiin erittäin herkästi vetyyn reagoivia, kannettavia malleja. Myös vetykaasun syttyminen saatiin ratkaistua sekoittamalla vetykaasu inertin typpikaasun kanssa. Vety muodostaa hapen, tai ilman, kanssa palavan seoksen, kun vedyn konsentraatio on 4 – 75 %. Edellä mainitun konsentraatioalueen päissä vety ei kuitenkaan syty kovinkaan helposti, sen ihanteelliseksi syttymiskonsentraatioksi on ISO 10156 - standardissa määritelty 29 %. Merkkiainekokeissa typpi-vetykaasua käytetään yleisimmin seoksena, joka sisältää 5 % vetyä ja 95 % typpeä, joka on määritelty palamattomaksi kaasuseokseksi normaaleissa olosuhteissa (ISO 10156). Tällöin typpi toimii kuljetus- tai laimennuskaasuna, vetypitoisuuden nousun ollessa mitattava suure ilmavuotoja havainnoitaessa (Block 2006).

Kansainvälisesti typpi-vetykaasua (5 % H_2 + 95 % N_2) käytetään merkkiainekaasuna vuotojen paikallistamiseen monissa kohteissa. Näihin kuuluu rakenteiden tiiviiden tutkimisen lisäksi muun muassa maanalaiset kaasu- ja vesiputkistot, kaasusäiliöt, kylmälaitteet sekä teollisuuden käyttämät, tiiviyttä vaativat laitteistot, kuten pumput. Typpi-vetykaasulla saadaan esiin erittäin pieniä, ainoastaan joitain grammoja / vuosi – kokoluokkaa olevia vuotokohtia (Schoonoverinc 2014).

Typpi-vetyseoksen ominaisuuksia

Sijoittamalla kaavaan 23 typen ja vedyn moolimassat ja käyttämällä kaasujen keskimääräisiä tilavuusprosentteja (5 % H₂ + 95 % N₂) saadaan typpi-vetykaasun massaksi 26,7 g/mol eli sen tiheys NTP-olosuhteissa on 1,191 kg/m³. Näin ollen sen suhteellinen tiheys on 0,92 (ilma=1).

$$M_s = \frac{p_1}{100} \times M_1 + \frac{p_2}{100} \times M_2 \quad (23)$$

jossa M_s = kaasuseoksen moolimassa (g/mol)
 M_1, M_2 = osakaasujen moolimassa (g/mol)
 p_1, p_2 = osakaasujen tilavuusprosentti

Vety

Vety (H) on alkuaineista rakenteeltaan yksinkertaisin. Se on jaksollisen järjestelmän kevin alkuaine ja sen arvellaan olevan maailmankaikkeuden yleisin alkuaine. Ilmakehä sisältää vetyä 0,005 % ja se on massan perusteella tarkasteltuna maankuoren kymmenneksi yleisin alkuaine. NTP-olosuhteissa vety on hajuton ja väritön kaasu. Vetykaasumolekyylä (H₂) koostuu kahdesta vetyatomista, joiden välinen kovalenttinen sidos on suhteellisen voimakas. Tästä johtuen vedyn reaktioihin tarvitaan usein korkea lämpötila tai reaktiota nopeuttava katalyytti. (Antila ym. 2010, 216–217). Vetykaasulle ei ole määritetty Suomessa HTP-arvoja. Vetykaasu ei ole myrkyllistä, mutta suurina pitoisuuksina suljetussa tilassa se voi syrjäyttää riittävästi happea aiheuttaen tukehtumisen (TTL 2014a).

Vedyn fysikaaliset ja kemialliset perusominaisuudet

Listatut kaasun ominaisuudet pätevät NTP-olosuhteissa, ellei toisin ole mainittu, ja laskemisessa olen käyttänyt ideaalikaasujen lakeja.

CAS-numero: 1333-74-0

Molekyylimassa: 2,016 g/mol

Kaasun tiheys: 0,09 kg/m³

Kaasun suhteellinen tiheys (ilma = 1): 0,07

Kaasumolekyylin kineettinen halkaisija: $2,89 \times 10^{-10}$ m

Sulamispiste: -259 °C

Kiehumispiste: -253 °C

Itsesyttymislämpötila: 560 °C
 Kriittinen lämpötila: -240 °C
 Kriittinen paine: 12,96 bar
 Kolmoispiste: -259,2 °C, 0,077 bar
 Höyrynpaine (-243 °C): 8 bar
 Dynaaminen viskositeetti: $8,9 \times 10^{-6}$ Pa s
 Kinemaattinen viskositeetti: $9,9 \times 10^{-5}$ m²/s

Typpi

Typpi (N) on jaksollisen järjestelmän 7. alkuaine. Typpi esiintyy kaksiatomisena molekyylinä (N₂), jonka atomit ovat sitoutuneet toisiinsa kolmoissidoksella. Vahvasta kolmoissidoksesta johtuen typpimolekyyli on normaaliolosuhteissa kemiallisesti erittäin inertti. Typpi on NTP-olosuhteissa hajuton, väritön, palamaton ja myrkytön kaasu. Ilma sisältää typpeä 78 %. Typpikaasulle ei ole Suomessa määritetty HTP-arvoja. Typpikaasun vaarallisuus perustuu sen tukahduttavuuteen. Puhtaan typpikaasun hengittäminen aiheuttaa hapen puutteesta johtuvan välittömän tajuttomuuden ja lähes välittömän kuoleman (TTL 2014b).

Tyypen fysikaaliset ja kemialliset perusominaisuudet

Listatut kaasun ominaisuudet pätevät NTP-olosuhteissa, ellei toisin ole mainittu, ja laskeemisessa olen käyttänyt ideaalikaasujen lakeja.

CAS-numero: 7727-37-9
 Molekyyli massa: 28,013 g/mol
 Kaasun tiheys: 1.25 kg/m³
 Kaasun suhteellinen tiheys (ilma = 1): 0,97
 Kaasumolekyylin kineettinen halkaisija: $3,64 \times 10^{-10}$ m
 Sulamispiste: -210 °C
 Kiehumispiste: -195,8 °C
 Kriittinen lämpötila: -147 °C
 Kriittinen paine: 34 bar
 Kolmoispiste: -210 °C, 0,125 bar
 Höyrynpaine (-157 °C): 20 bar
 Dynaaminen viskositeetti: $1,663 \times 10^{-5}$ Pa s
 Kinemaattinen viskositeetti: $1,33 \times 10^{-5}$ m²/s

7.8 Työsuojelu

Työturvallisuuslain (738/2002) 8 §:n mukaan työnantaja on velvollinen huolehtimaan työntekijöiden työnaikaisesta turvallisuudesta tarpeellisin toimenpitein. Tämä pitää sisällään myös terveydelle vaarallisen tai haitallisen tekijän tai olosuhteen poistamisen tai korvaamisen vähemmän vaarallisella tai haitallisella tekijällä.

Työntekijän velvollisuus on noudattaa työnantajan antamia määräyksiä ja ohjeita sekä omalla toiminnallaan huolehtia niin omasta kuin muidenkin työntekijöiden mahdollisuudesta työskennellä turvallisessa ja terveellisessä työympäristössä. Työntekijä on myös velvollinen käyttämään työnantajan hänelle osoittamia henkilösuojaimia sekä muita työn turvalliseen suorittamiseen tarkoitettuja varusteita. (Työturvallisuuslaki).

Tutkimuksessa käytetyt kaasut ovat happea syrjäyttäviä, joten ne voivat suurina pitoisuuksina vaikuttaa tukahduttavasti. Normaalisti ilma sisältää happea noin 21 %. Hapen puutteen oireita alkaa esiintyä ilman happipitoisuuden laskiessa alle 18 %, jota voidaan pitää raja-arvona ilman raitisilmamaskia työskentelylle (AGA OY 2013b).

Hengitysilman happipitoisuuden laskiessa alkavat hapenpuutteen oireet aiheuttaa merkittävää vaaraa työntekijän turvallisuudelle. Kun happipitoisuus laskee alle 16 %, alkaa ihmisellä esiintyä huimausta, hengenahdistusta sekä huomiokyvyn alenemista. Happipitoisuuden laskiessa alle 13 %, hapen puute aiheuttaa vakavia arviointikyvyn virheitä, kiputuntemuksen alenemista, tunnekokemusten epävakautta sekä mahdollisesti tajunnan menetyksen varsinkin fyysisten ponnistelujen yhteydessä. Alle 10 % happipitoisuuksissa alkaa ihmisellä esiintyä edellä mainittujen oireiden lisäksi pahoinvointia ja oksentelua. Mikäli happipitoisuus laskee alle 6 %, seuraa lähes välitön tajunnan menetyks ja kooma. Altistuminen alle 6 % happipitoisuudelle johtaa kuolemaan. (Sosiaali- ja terveysministeriö 2012).

8 VASTAUKSET

Tässä tutkimuksessa etsittiin vastauksia seuraaviin kysymyksiin:

- Aikaisemmin tehtyjen opinnäytetöiden yhteydessä on saatu kuulopuheiden tasolla olevaa tietoa kaasujen reaktioista, mutta tietoja ei ole kyetty varmistamaan. Esimerkiksi rikkiheksafluoridin on arveltu reagoivan julkisivun rappauksen kalkin kanssa ja typpi-vetykaasun on arveltu suodattuvan erilleen esim. kivivillan

ja hiekan vaikutuksesta, jolloin vety saattaisi saavuttaa leimahdusvaarallisen pitoisuuden. Onko olemassa materiaaleja, joiden kohdalla kaasujen käyttö ei olisi mahdollista?

Vastaus: Sobott (2014b, 11) toteaa tutkimuksessaan, että kalkkilaastilla rapatuissa kohteissa rikin ja kalkin reaktio haittaa rappauksen säilyvyyttä. Rikkiheksafluoridimolekyylissä olevan rikkiatomin reagointi kalkin kanssa vaatisi kuitenkin rikkiheksafluoridimolekyylin hajoamisen muiksi rikin ja fluorin yhdisteiksi.

Rikkiheksafluoridimolekyylin hajoamiseen vaaditaan minimissään 200 – 500 °C lämpötila, riippuen kaasumolekyylin vaikuttavista, muista aineista tai olosuhteista. 200 °C:ssa rikkiheksafluoridimolekyylillä saattaa alkaa hajoamaan esimerkiksi teräksen vaikutuksesta tuottaen myrkyllisiä fluoriyhdisteitä. Noin 400 °C:ssa rikkiheksafluoridi alkaa tuottaa reaktioita puhtaana rikin tai vedyn kanssa. (Toxnet 2014).

Käytännössä rikkiheksafluoridi tarvitsee kosketuksen liekkiin tai esimerkiksi valokaareen hajotukseen. Normaaleissa ilmanpaineissa ja lämpötiloissa rikkiheksafluoridi on erittäin inertti kaasu, joten sitä voidaan käyttää rakenteiden tiiveyden tarkasteluissa ilman pelkoa mahdollisista reaktioista. Rikkiheksafluoridi kuuluu alkuvuodesta 2015 voimaan tullessa, niin sanotussa F-kaasuasetuksessa listattuihin kasvihuonekaasuihin (EU 2014). Asetuksella pyritään vähentämään tai lopettamaan asetuksessa mainittujen kaasujen käyttöä. Rakenteiden tiiveystarkasteluissa rikkiheksafluoridin käyttöä voidaan kuitenkin jatkaa, sillä päästöt ovat hyvin pieniä ja menetelmän toimivuus vaatii rikkiheksafluoridin vapauttamisen ilmaan (Finell 2015).

Typpi on erittäin inertti kaasu, sitä on ilmassa noin 78 % eikä sille tiedetä olevan sopimattomia materiaaleja normaaliolosuhteissa.

Vetykaasun reaktiot vaativat normaaleissa paine-olosuhteissa korkean lämpötilan tai katalyytin. Vetykaasu on erittäin palavaa sen konsentraation ylittäessä noin 7 tilavuusprosenttia ja sen itsesyttymislämpötila on 560 °C. Vety saattaa aiheuttaa joidenkin metallien, esimerkiksi teräksen, haurastumista. Vetymolekyylit ovat niin pieniä, että ne tunkeutuvat metallien sisään nostaen metallien sisäistä painetta, jolloin metalli haurastuu (McGill 2012). Haurastuminen kuitenkin vaatii pitkäaikaista altistumista suhteellisen korkeille vetypitoisuuksille.

Typpi-vetykaasun erottumiselle normaaleissa merkkiainemittausolosuhteissa niin, että vety muodostaisi syttyvän pitoisuuden, en löytänyt tämän tutkimuksen yhteydessä yhtään todistetta, suuntaan tai toiseen. Typpi-vetykaasun erottumisesta on tehty useita tutkimuksia, muun muassa Jung ym. (1999) ja Wang ym. (2005). Näissä tutkimuksissa ja kokeissa on kuitenkin käytetty kaasujen erottamiseen tarkoitettuja erikoiskalvoja, suuria paineita ja useiden satojen celsiusasteiden lämpötiloja, joten niiden tuloksista ei voida vetää johtopäätöksiä rakenteiden tiiviystarkasteluissa käytettävän typpi-vetyseoksen käyttäytymiseen eristemateriaaleissa tai maaperässä. Vaikka typpi-vetykaasuseos jostain syystä suodattuisikin erilleen, on vety erittäin nopeamolekyylinen aine, joten se diffundoituu nopeasti ilmaan ja leviää käytettävissä olevaan tilaan.

Typpi-vetyseosta käytetään maailmanlaajuisesti myös maanalaisten vuotojen paikallistamiseen, sillä se läpäisee maakerroksen tehokkaasti. Kaasun erottumiseen liittyvät ongelmat saadaan mahdollisesti ratkaistua laskemalla kaasua tutkittavaan rakenteeseen tai maaperään riittävästi käyttäen pientä painetta. Tällöin kaasu ei pääse muodostamaan hetkellisesti jopa suurta ylipainetta ahtaaseen ja tiiviiseen tilaan, josta vapautuessaan se voisi väliaikaisesti muodostaa syttyvän konsentraation. Kaasun ”runsaalla” laskemisella rakenteeseen tai maaperään saadaan varmistettua se, että kaasun diffundoituessa kaasu leviää joka puolelle käytettävissä olevaa tilaa konsentraation pysyessä kaasunilmaisimen minimipitoisuuden yläpuolella (Lappi 2015). Mainittakoon, että edellä mainittu metodi perustuu puhtaasti teoreettiseen pohdintaan, ei käytännön kokemukseen. Jatkotutkimukset aiheeseen liittyen ovat tarpeellisia.

- Muuttuvatko rikkiheksafluoridikaasun ja typpi-vetykaasun ominaisuudet merkkiainemenetelmän kannalta oleellisesti esimerkiksi eri vuodenaikojen lämpötilojen vaikutuksesta ja miten kaasujen ominaisuudet vaikuttavat kaasujen leviämiseen?

Rikkiheksafluoridi sekä typpi-vetyseos ovat ominaisuuksiltaan merkkiainekokeisiin soveltuvia jopa Suomessa esiintyvissä ääriolosuhteissa. Edellä mainittujen aineiden kiehumispisteet vaihtelevat rikkiheksafluoridin $-64\text{ }^{\circ}\text{C}$:sta vedyn $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$:een. Aineet omaavat myös korkean höyrynpaineen, joten niillä on vahva pyrkimys höyrystymiseen. Kaasun lämpötila on suorassa suhteessa sen aiheuttamaan paineeseen eli leviämisnopeuteen. Tämä tulee ottaa huomioon, mikäli merkkiainekokeita suoritetaan kovalla pakkasella.

Kun puhdasta kaasua lasketaan rakenteeseen, kaasun kulkeutumiseen vaikuttaa aluksi eniten sen massa suhteessa väliaineeseen eli ilmaan. Ilmaa huomattavasti raskaampi rikkiheksafluoridi siis laskeutuu tilan alaosaan ja leviää vertikaalisesti pintoja pitkin, kun taas hieman ilmaa kevyempi typpi-vetyseos puolestaan kohoaa hieman. Typpiveytyseos sisältää vain 5 % vetyä, joten vedyn vaikutus kaasun kohoamiseen on pieni. Täytyy kuitenkin huomioida, että kaasut eivät varsinaisesti keräydy esimerkiksi painaumaan, sillä kaasun konsentraatio ei normaaliolosuhteissa kasva spontaanisti alkukonsentraatiota korkeammaksi. Välittömästi kaasun laskemisen jälkeen alkaa pitoisuus-erosta johtuva kaasun leviäminen diffundoitumalla joka puolelle käytössä olevaa tilaa. Diffuusio on kuitenkin hitaampaa kuin painovoiman vaikutuksesta tapahtuva kaasun liike. Kaasujen leviämiseen vaikuttaa myös ilmavirtauksien aiheuttama kaasujen sekoittuminen sekä lämpötilasta riippuva kaasujen molekyylinopeus. Kaasu saattaa myös kerätä pieniä määriä kosteutta rakenteiden sisältä, mutta normaaleissa olosuhteissa eivät lämpötila eikä kosteus vaikuta menetelmän kannalta merkittävästi kaasujen käyttäytymiseen.

- Voidaanko rakenteeseen laskettavan kaasun määrä ja sen leviäminen arvioida laskennallisesti tai simuloimalla? Kuinka suuret raot ja tiiveyden puutteet rakenteissa vaikuttavat sisäilman mikrobiologiseen laatuun?

Merkkiainekokeiden tulosten tulkintaan ei voida antaa esimerkiksi numeerisia ppm-arvoja, joilla voitaisiin suoraan osoittaa merkkiainekaasua tutkittavaan tilaan päästävän raon merkittävyys, sillä rakenteessa olevan kaasuseoksen tarkkaa konsentraatiota on erittäin hankala määrittää. Rakenteeseen laskettavan kaasun minimimäärä voidaan arvioida laskemalla rakenteen ilmatilan tilavuus ja kaasunilmaisimen vaatima kaasun konsentraatio. Laskentamenetelmä on kuitenkin erittäin epäluotettava, sillä laskujen tarkka paikkansapitävyys edellyttää sitä, että rakenne on tiivis eikä rakenteessa oleva kaasu pääse leviämään muihin rakenneseisiin, jolloin alkuperäisen rakenteen sisältämän kaasun konsentraatio laskee. Laskentamenetelmä vaatisi lisäksi sitä, että kaasu on levinnyt tasaisesti rakenteen joka osaan.

Fluidien leviämistä voidaan simuloida laskennallisesti CFD-ohjelmilla. Fluidien leviämisen mallintaminen avoimessa systeemissä on erittäin monimutkaista ja aikaa vievää, sillä leviämiseen vaikuttavia muuttujia on paljon.

Kosteusvaurioituneissa rakenteissa tai rakennuksen alla olevassa maaperässä saattaa esiintyä runsas kirjo erilaisia haitta-aineita. Rakenteiden epätiiveyskohtien kautta sisäilmaan päätyvät epäpuhtaudet ja terveydelle haitalliset aineet ovat usein joko kaasumaisia yhdisteitä tai pieniä aerosoleja. Kaasumaisten yhdisteiden voidaan olettaa kulkeutuvan merkkiainekokeissa käytettävien kaasujen kanssa yhtäläisesti. Osa pienimmistä aerosoleista leijailee ilman mukana useita päiviä, osa leijailee ilmassa pysyvästi (Hinds 1999). Bioaerosolit ovat kooltaan 0,02 – 100 µm, joten myös niiden voidaan olettaa kulkeutuvan hyvinkin pienistä raoista, varsinkin esimerkiksi tuulenpuuskien aiheuttamasta paine-erosta johtuvien ilmavirtausten vaikutuksesta.

9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Typpi-vety- ja rikkiheksafluoridikaasu ovat toimivia ja oikein käytettynä turvallisia merkkiaineita rakenteiden tiiveystarkasteluihin. Myös muita kaasuja voidaan käyttää tutkimuksissa. Merkkiaineikaasuja valitessa tulee ottaa huomioon muutamat pääperiaatteet; Kaasujen tulee olla inertejä ainakin normaaleissa tutkimusolosuhteissa eivätkä ne saa aiheuttaa terveydellistä haittaa tai olla syttyviä. Lisäksi kaasujen tulee olla sellaisia, että ne voidaan havaita luotettavasti kannettavalla kaasunilmaisimella ja ne erottuvat ilmakehän normaalisti sisältämien aineiden taustapitoisuuksista.

Työsuojelun kannalta suurimman vaaran aiheuttaa kaasujen kyky syrjäyttää happea, joten tutkimuksia suoritettaessa tulee tutkijan olla perillä hapen puutteen aiheuttamista oireista, jolloin vaaraa aiheuttavaan tilanteeseen voidaan reagoida välittömästi. Varsinkin ahtaita tiloja, esimerkiksi ryömintätilat ja putkitunnelit, tutkittaessa on mahdollinen hapen syrjäytyminen hyvä ottaa huomioon jo tutkimuksia suunniteltaessa.

Merkkiaineikaasu tulee laskea rakenteeseen pienellä paineella, eikä kaasun syöttömekanismin päätä tulisi asettaa kiinni esimerkiksi seinän eristetilassa olevaan eristemateriaaliin. Näin saadaan estettyä kaasun niin sanottu ampuminen suurella nopeudella suoraan rakennusmateriaalin sisään tai rakenteen läpi. Kaasun leviäminen rakenteissa tai maaperässä saadaan varmistettua laskemalla kaasua ”riittävästi” eli niin sanotusti kyllästä-mällä rakenne tai tila merkkiaineikaasulla niin, että merkkiaineikaasun konsentraatio ylittää ilmaisinlaitteen minimitunnistusrajan joka puolella rakennetta. Tämä saadaan varmistettua laskemalla kaasua rakenteeseen useammasta kohdasta ja varmistamalla kaasun kulkeutuminen esimerkiksi keinoitekoisen vuotokohdan avulla. Kaasu saattaa edetä maaperässä tai muussa tiiviissä aineessa huomattavasti hitaammin kuin ilmassa. Kaasun

varsinainen koteloituminen esimerkiksi sorakerrokseen on epätodennäköistä. Lämpö on kaasumolekyylien liikettä, joten kaasun ”pysähtyminen” vaatisi erittäin matalan lämpötilan. Näin ollen kaasua täytyy annostella maaperään runsaasti ja antaa kaasulle aikaa kulkeutua maa-aineksessa.

Merkkiainekokeisiin, ja niistä saatujen tulosten tulkintaan, liittyy oleellisesti rakennustekniikan ohella myös muita tekniikan aloja. Tutkimusmenetelmän hallinta vaatii tutkijalta laajaa ymmärrystä rakenteiden teknisestä toiminnasta sekä mahdollisesti terveyshaittaa aiheuttavien sisäilman epäpuhtauksien kemiallisista ja fysikaalisista ominaisuuksista. Vuotojen suuruuden arviointi on tehtävä jokaisen kohteen olosuhteet huomioiden ottaen, joten vuotojen tulkinta vaatii tutkijalta kokemusta. Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden ja mikrobien aineenvaihduntatuotteiden terveyshaittoja ei ole konklusiivisesti tutkittu, varsinkaan eri yhdisteiden yhteisvaikutuksen osalta. Näin ollen on turvallisinta estää kyseisten haitta-aineiden pääsy sisäilmaan esimerkiksi sisäpuolisella tiivistyskorjauksella.

Radon aiheuttaa tutkitusti terveyshaittaa Suomessa. Maaperän radonpitoisuudessa on merkittäviä alueellisia eroja. Niillä alueilla, joissa radonia esiintyy suurina pitoisuuksina, rakenteiden tiivistyskorjauksilla voidaan vähentää radonin pääsyä sisäilmaan merkittävästi. Merkkiainekokeita voidaan käyttää tehokkaasti radonputkien toimivuuden ja tiiviyden varmistamisessa.

Jatkotutkimuksena tulisi selvittää laskennallisesti ja / tai kokeellisesti merkkiainekaasujen läpäisy- ja leviämiskyky rakenteissa käytetyissä materiaaleissa sekä maaperässä ja rakennusten alla käytetyissä täyteaineissa.

LÄHTEET

AGA OY 2013a. Rikkiheksafluoridin käyttöturvallisuustiedote. WWW-dokumentti. http://www.aga.fi/internet.lg.lg.fin/fi/images/rikkiheksafluoridi634_120177.pdf. Päivitetty 21.1.2013. Luettu 12.3.2015.

AGA OY 2013b. WWW-dokumentti. http://www.aga.fi/fi/safety_health_ren/gas_risks/inert_gas/index.html. Päivitetty 19.9.2013. Luettu 12.4.2015.

Alicat 2014. WWW-dokumentti. <http://www.alicat.com/knowledge/how-it-works/>. Päivitetty 2014. Luettu 12.3.2015.

Airliquide 2013. WWW-dokumentti. <http://encyclopedia.airliquide.com/Encyclopedia.asp?GasID=34>. Päivitetty 2013. Luettu 12.3.2015.

Antila, Anna-Maija ym. 2010. Tekniikan kemia. Helsinki: Edita Prima Oy.

Block, Matthias 2006. Hydrogen as a tracer gas for leak testing. WWW-dokumentti. <http://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/Tu.2.6.1.pd>. Ei päivitystietoja. Luettu 6.4.2015.

Dräger 2015. WWW-dokumentti. <http://pdf.directindustry.com/pdf/drager-safety/drager-msi-sensit-rld-2/20351-150300.html>. Ei päivitystietoja. Luettu 23.3.2015.

Electrical4you 2013. WWW-dokumentti. <http://electrical4u.com/sulfur-hexafluoride-sf6-gas-properties/>. Päivitetty 18.7.2013. Luettu 24.4.2015.

EU 2014. Euroopan neuvoston ja parlamentin asetus 517/2014.

Finel, Nufar 2015. Sähköposti. 3.2.2015 Finel-Tuukkanen. Ylitarkastaja. Suomen ympäristökeskus. Julkaisematon.

Hakkarainen, Anne 2015. Kuvia opinnäytetyöhön. Harjoittelija. Etelä-Savon remontointi- ja kattopalvelut Oy.

Hautala, Mikko – Peltonen, Hannu 2009. Insinöörin fysiikka, osa I. Saarijärvi: OFFSET Oy.

Hinds, William C. 1999. Aerosol Technology – Properties, Behaviour and Measurement of Airborne Particles. New York: John Wiley & Sons Inc.

Hintikka, Tuomas 2013. Tiiveysmittaukset sisäilmastoteknisissä selvitystöissä. Ilma-vootoa osoittavat merkkiainelaitteistot. Opinnäytetyö. Helsinki: Metropolia ammatti- korkeakoulu.

Indooraid 2015a. WWW-dokumentti. http://indooraid.com/?page_id=10. Ei päivitystietoja. Luettu 9.4.2015.

Indooraid 2015b. WWW-dokumentti. http://indooraid.com/?page_id=14. Ei päivitystietoja. Luettu 14.4.2015.

ISO 10156. International Organization for Standardization 10156/2010: Gases and gas mixtures - Determination of fire potential and oxidizing ability for the selection of cylinder valve outlets.

Jung ym. 1999. Hydrogen separation from the H₂/N₂ mixture by using a single and multi-stage inorganic membrane. Korean Journal of Chemical Engineering. Volume 16.

Laine, Katariina 2014. Rakenteiden ilmatiiveyden parantaminen sisäilmakorjauksessa. Opinnäytetyö. Kuopio: Itä-Suomen yliopisto.

Laitinen, Risto – Toivonen, Jukka 1997. Yleinen ja epäorgaaninen kemia. Hämeenlinna: Karisto Oy.

Lappi, Jari 2015. Sähköposti 24.2.2015. Lappi-Tuukkanen. Tekninen asiantuntija. Oy Woikoski Ab. Julkaisematon.

Majvik II – suositus 2007. Suomen lääkärilehti no 7, vsk 62, s. 654-664.

McGill 2014. WWW-dokumentti. <http://www.mcgill.ca/newsroom/channels/news/study-reveals-clues-cause-hydrogen-embrittlement-219051>. Päivitetty 19.11.2012. Luettu 28.4.2015.

Pubchem 2015. WWW-dokumentti. http://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/sulfur_hexafluoride#section=UNII. Päivitetty 11.4.2015. Luettu 12.4.2015.

Putus, Tuula 2014. Home ja terveys; Kosteusvauriohomeiden, hiivojen ja sädesienten esiintyminen ja terveysthaitat. Pori: Suomen Ympäristö- ja terveysalan kustannus Oy.

Pönkä, Antti 2006. Terveystensuojelu. Suomen ympäristöterveys Oy. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.

Santo-Pietro, Karen Abella 2006. WWW-dokumentti. <https://www.emlab.com/s/sampling/env-report-04-2006.html>. Ei päivitystietoja. Luettu 30.3.2015.

Schoonoverinc 2014. WWW-dokumentti. <http://schoonoverinc.com/wp-content/uploads/2014/05/LOKTRACER-TLD-500-O-M-recahrgable-batteries-Manual-1.pdf>. Päivitetty 21.8.2014. Luettu 28.4.2015.

Sisäilmayhdistys 2008a. WWW-dokumentti. <http://www.sisailmayhdistys.fi/terveelliset-tilat-tietojarjestelma/kosteusvauriot/kosteustekninen-toiminta/ilmavirtaukset-rakennuksessa/>. Päivitetty 2008. Luettu 30.3.2015.

Sisäilmayhdistys 2008b. WWW-dokumentti. <http://www.sisailmayhdistys.fi/terveelliset-tilat-tietojarjestelma/sisailmasto/perustietoa/>. Päivitetty 2008. Luettu 12.3.2015.

Sisäilmayhdistys 2008c. WWW-dokumentti. <http://www.sisailmayhdistys.fi/terveelliset-tilat-tietojarjestelma/ongelmien-tutkiminen/mikrobitutkimukset/indikaattorit/>. Päivitetty 2008. Luettu 9.4.2015.

Sobott, Jimmy 2014a. Kuvia opinnäytetyöhön. Kehitysjohtaja. Wise Group Finland Oy.

Sobott, Jimmy 2014b. Tiiveystarkastelut ja tiiveyskorjaukset liike- ja palvelurakennuksiin. Ylempi amk, opinnäytetyö. Helsinki: Metropolia ammattikorkeakoulu.

Solunetti 2006. WWW-dokumentti. <http://www.solunetti.fi/fi/solubiologia/mikrobit/>. Ei päivitystietoja. Luettu 9.4.2015.

Sosiaali- ja terveysministeriö 2003. Asumisterveysohje 2003:1. Asuntojen ja muiden oleskelutilojen fysikaaliset, kemialliset ja mikrobiologiset tekijät.

Sosiaali- ja terveysministeriö 2012:5. Haitalliseksi tunnetut pitoisuudet. Tampere: Juvenes Print – Tampereen yliopistopaino Oy.

Sosiaali- ja terveysministeriö 944/1992. Päätös asuntojen huoneilman radonpitoisuu- den enimmäisarvoista.

Suvilehto, Pekka 2015. Kuvia opinnäytetyöhön. Piirtäjä. Wise Group Finland Oy.

Säteilyturvakeskus 2015. WWW-dokumentti. http://www.stuk.fi/ihminen-ja-sateily/sateilyn_terveysvaikutukset/fi_FI/radonin_terveyshaitta/. Päivitetty 21.1.2015. Luettu 26.3.2015.

Säteilyturvakeskus 2003. Säteily- ja ydinturvallisuus – Säteily ympäristössä. Toimittanut Roy Pöllänen. Hämeenlinna: Karisto Oy.

Tarkkanen, Vesa 2015. Puhelinkeskustelu 7.4.2015 Tarkkanen-Tuukkanen. Toimitusjohtaja. Insinööritoimisto Tarkkanen Oy.

Terveydensuojelulaki. 19.8.1994/763.

Toxnet 2014. WWW-dokumentti. <http://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/search2/f?./temp/~kSBVMD:1>. Päivitetty 5.12.2014. Luettu 28.4.2015.

Trotec 2015. Measurement Catalog Solutions 12, edition 2. WWW-dokumentti. <http://info.trotec.com/trotec-flipviewer-kataloge/en/trt-mekat-wm-en/TRT-MEKAT-WM-EN.html>. Päivitetty 8.1.2015. Luettu 23.3.2015.

TTL 2014a. WWW-dokumentti. <http://www.ttl.fi/ova/vety.html>. Päivitetty 15.8.2014. Luettu 6.4.2015.

TTL 2014b. WWW-dokumentti. <http://www.ttl.fi/ova/typpi.html>. Päivitetty 15.8.2014. Luettu 6.4.2015.

Työturvallisuuslaki. 23.8.2002/738.

Vtechonline. 2006. WWW-dokumentti. <http://www.vtechonline.com/pdf/vtech-leak-detection.pdf/>. Ei päivitystietoja. Luettu 17.3.2015.

Wang ym. 2005. H₂/N₂ gaseous mixture separation in dense Pd/ α -Al₂O₃ hollow fiber membranes: Experimental and simulation studies. Separation and Purification Technology 52/2006.

WHO 2009. World Health Organisation regional office for Europe. WHO guidelines for indoor air quality: dampness and mould. Saksa: Druckpartner Mose