



TERVEYDEN JA  
HYVINVOINNIN LAITOS

Hanna Leppänen  
Matti Peltonen  
Hannu Komulainen  
Anne Hyvärinen

TYÖPAPERI

# Otsonointi sisäympäristössä

## Kirjallisuuskatsaus



Työpaperi 12/2017

# Otsonointi sisäympäristössä

## Kirjallisuuskatsaus

Hanna Leppänen, Matti Peltonen, Hannu Komulainen, Anne Hyvärinen



TERVEYDEN JA  
HYVINVOINNIN LAITOS

© Kirjoittajat ja Terveiden ja hyvinvoinnin laitos

ISBN 978-952-302-837-1 (verkkojulkaisu)

ISSN 2323-363X (verkkojulkaisu)

<http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-302-837-1>

Helsinki, 2017

# Sisältö

Johdanto .....	4
1. Otsoni, sen lähteet ja teollinen tuottaminen.....	5
2. Otsonoinnin teho bakteereihin ja sieniin .....	6
3. Otsonoinnin teho hajuihin sekä vaikutus kemiallisiin epäpuhtauksiin, ..... hiukkasiin, rakennus- ja sisustusmateriaaleihin.....	7
4. Otsonoinnin vaikutus terveyteen ja otsonointikäsitteistä aiheutuvat riskit.....	9
5. Otsonointiin liittyvä viimeaikainen tutkimus .....	11
6. Yritysten haastattelut .....	12
7. Yhteenveto ja johtopäätökset .....	12
Lähteet.....	16
Liite 1. Yhteenveto tutkimuksista, joissa tutkittu otsonoinnin tehokkuutta mikrobeihin. ....	20
Liite 2. Yhteenveto tutkimuksista, joissa tutkittu otsonoinnin vaikutusta kemiallisiin epäpuhtauksiin, rakennus- ja sisustusmateriaaleihin. ....	26



## Johdanto

Otsonointia markkinoidaan turvallisena ja tehokkaana tapana poistaa asunnosta sisäilman epäpuhtauksia, mikrobeja ja hajuja. Tutkittua tietoa otsonoinnin vaikutuksista ja tehokkuudesta on kuitenkin vain vähän. Otsonin terveyshaitoista johtuen erityisesti asiantuntijatahot eivät suosittele otsonointia. Tämän kirjallisuuskatsauksen tavoitteena on selvittää, millainen on sisäympäristöissä käytettävien otsonointikäsittelyjen vaikutus ja teho mikrobikasvuun ja hajuihin sekä mitkä ovat otsonin terveyshaitat ja otsonointiin liittyvät riskit. Lisäksi tavoitteena on selvittää, miten otsonointi vaikuttaa materiaaleihin.

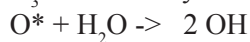
## 1. Otsoni, sen lähteet ja teollinen tuottaminen

Otsoni (O<sub>3</sub>) on väritön, pistävän raikkaan hajuinen ja ärsyttävä yhdiste. Se on reaktiivinen yhdiste, joka reagoi kahdella tavalla: joko suoraan molekylaarisena otsonina tai otsonin hajoamisen yhteydessä syntyvien radikaalien avulla, tärkeimpänä hydroksyyli-radikaali (OH<sup>-</sup>). Otsoni ja radikaalit hapettavat muun muassa ilmassa ja pinnoilla olevia mikrobiologisia, kemiallisia ja hiukkasmaisia epäpuhtauksia muuttaen niiden rakenteita ja ominaisuuksia. Lisäksi reaktioissa voi syntyä uusia yhdisteitä, muun muassa aldehydejä terpeenien pilkkoutuessa ja pienhiukkasia hiilivetyjen hajotessa. Mikrobeissa, kaasumaisissa epäpuhtauksissa ja rakennusmateriaaleissa tapahtuvaa muutosta kuvataan tarkemmin myöhemmin.

Alailmakehän otsonia syntyy ulkoilmassa jatkuvasti typpidioksidin sekä hiilen ja vedyn yhdisteiden (yleisimmin haihtuvien orgaanisten yhdisteiden, VOC) reagoidessa auringonvalon kanssa.



Epästabiilina yhdisteenä otsoni hajoaa hyvin nopeasti, muodostaen OH<sup>-</sup>-radikaalin. Jos OH<sup>-</sup>-radikaali ei reagoi epäpuhtauksien kanssa, hajoaa se lyhyessä ajassa nopeasti takaisin hapeksi.



Ilman otsonipitoisuuksissa pätee vastaavuus  $1 \text{ ppm} = 2110 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Tyypilliset ulkoilman otsonipitoisuudet ovat 20–70  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ja vastaavasti sisäilman otsonipitoisuudet ovat 10–70 % ulkoilmapitoisuuksista (1–50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) (Weschler ym. 1989, McClellan ym. 2009). Sisäilmassa olevasta otsonista noin 20–70 % on peräisin ulkoilmasta (Weschler 2000). Muita tyypillisiä sisäilman otsonilähteitä ovat kopiokoneet, lasertulostimet, ultraviolettilampit sekä ilmanpuhdistimet (Kagi ym. 2007).

Otsonia tuotetaan teollisesti kolmella tavalla: kylmäplasma- ja (dielectric barrier discharge method) koronapurkausmenetelmällä sekä UV-valolla. Kaikkia näitä menetelmiä käytetään kaupallisesti myytävissä otsonointilaitteistoissa. Eniten käytetty menetelmä on koronapurkaus sen otsonin tuoton tehokkuuden vuoksi. Seuraavaksi on kuvattu kukin edellä mainittu tuotantomenetelmä yksityiskohtaisemmin:

- Pulssitettu koronapurkausmenetelmä:

Otsonin tuotto perustuu voimakkaaseen sähkökenttään, jossa osa laitteen läpi kulkevan ilman happimolekyyleistä hajoaa yksiatomisiksi happiatomeiksi, jotka reagoivat kaksimolekyylisen hapen kanssa muodostaen otsonia. Menetelmän avulla pystytään tuottamaan noin 6–8 % otsonipitoisuus läpi kulkevaan ilmaan. Menetelmän haittapuolena on reaktiossa sivutuotteena syntyvät typpioksidit.



– UV-valo:

Menetelmässä käytetään valonlähdetä, joka tuottaa tietyn aallonpituista ultravioletivaloa. UV-valon avulla osa laitteen läpi kulkevan ilman happimolekyyleistä hajoaa yksiatomisiksi happiatomeiksi, jotka reagoivat uudestaan ja muodostavat otsonia. Menetelmän heikkoutena on sen tehottomuus tuottaa otsonia, läpi kulkevan ilman otsonipitoisuus on käsittelyn jälkeen alle 0,5 %. Tässä otsonin tuotantomenetelmässä ei muodostu sekundääriepäpuhtauksia.

– Kylmäplasmamenetelmä:

Kylmäplasmamenetelmässä otsoni tuotetaan johtamalla puhdasta ionisoitua happea kahden eristetyn levyelektrodin väliin. Levyjen välissä osa happimolekyyleistä hajoaa yksiatomisiksi ja reagoi kaksiatomisten happimolekyylien kanssa muodostaen otsonia. Menetelmä on melko uusi ja sen avulla pystytään tuottamaan läpi kulkevan ilman otsonipitoisuudeksi 5–7 %, jopa 20 %.

## 2. Otsonoinnin teho bakteereihin ja sieniin

Otsoni vaikuttaa bakteereihin ja sieniin vaurioittaen niiden pintarakenteiden morfologiaa ja näin ollen tuhoten niitä (Komanapalli & Lau 1998, Thanomsub ym. 2002). Reaktio bakteerien ja sienien kanssa perustuu otsonin kykyyn hapettaa kuorikerroksen fosfolipidejä ja lipoproteiinejä. Komanapalli & Lau 1998 osoittivat, että otsoni reagoi mieluummin proteiinien kuin rasvojen kanssa.

Tutkimusten mukaan ihmiselle turvallisella otsonipitoisuudella ( $<0,05$  ppm =  $< 106 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) ei ole sieni- ja bakteerioorganismeja tuhoavaa vaikutusta. Se voi kuitenkin hidastaa joidenkin mikrobien kasvua (Dyas ym. 1983, Foarde ym. 1997, Bertol ym. 2012, Peitzsch ym. 2012). Otsonipitoisuuden tulisi olla vähintään 5–10 kertaa ihmisille haitalliseksi todettua pitoisuutta suurempi, jotta sillä olisi selkeästi sienien ja bakteerien kasvua hidastavia ja tuhoavia vaikutuksia (Foarde ym. 1997, Khurana 2003, Korzun ym. 2008, Sharma & Hudson 2008, Peitzsch ym. 2012). Laboratorio-olosuhteissa lasipintaisella kasvatusalustalla tehdyissä tutkimuksissa on pystytty osoittamaan otsonilla olevan sieni- ja bakteerioorganismien kasvua hidastava ja organismeja tuhoava vaikutus otsonipitoisuuden ollessa yli 10 ppm (=  $21\ 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Rakennusmateriaalien pinnoilla kasvavilla sieni- ja bakteerioorganismeilla ei vastaavissa pitoisuuksissa ole havaittu kasvua tuhoavaa vaikutusta (Foarde ym. 1997). Tutkimukset osoittavat, että suurelta otsonipitoisuudet (100–1000 ppm) eivät pysty tuhoamaan kaikkia sieni- tai bakteerioorganismeja rakennusmateriaalien pinnalta tai sisältä (Kowalski ym. 1998, Menetrez ym. 2009). On myös huomattava, että tällaisten pitoisuuksien tavoittaminen kenttäolosuhteissa on lähes mahdotonta. Otsonoinnin tehokkuuteen vaikuttaa suuresti, mikä bakteeri- tai sienilaji on kyseessä sekä niiden pitoisuus. Otsonointi ei ole läheskään yhtä tehokasta suurille bakteeri- ja sienipitoisuuksille kuin pienille pitoisuuksille (Thanomsub ym. 2002). Otsonin vaikutuksia sisäilman mikrobiologisiin epäpuhtauksiin, kuten bakteereihin ja sieniin, ei ole pystytty tarkasti osoittamaan (Foarde ym. 1997, Menetrez ym. 2009).

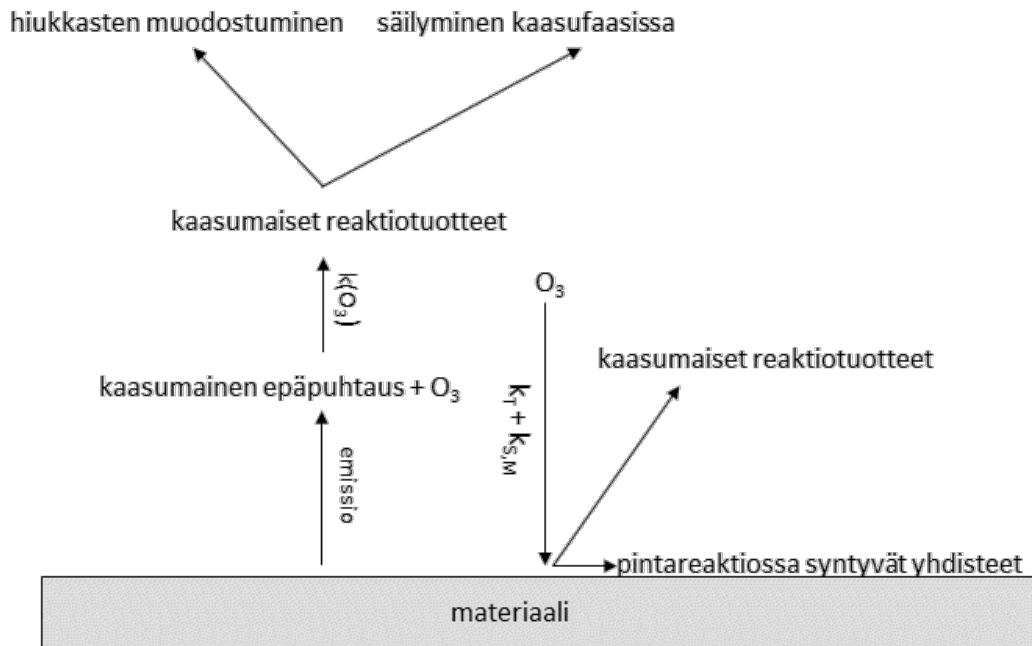
Otsonoinnin tehoon vaikuttavat ilman suhteellinen kosteus (RH), lämpötila, pH, altistus aika ja käytetty kasvatusalusta (Foarde ym. 1997, Aydogan & Gurool 2006, Sharma & Hudson 2008, Menetrez ym. 2009, Huang ym. 2012, Russell ym. 2013). Otsonointi toimii tehokkaammin ilman suhteellisen kosteuden ollessa suurempi (Foarde ym. 1997, Aydogan & Gurool 2006, Menetrez ym. 2009, Huang ym. 2012). Foarde ym. (1997) osoittivat tutkimuksessaan otsonoinnin tehoavan huomattavasti paremmin sieni- ja bakteeriorganismeihin RH:n ollessa 90 % kuin 30 % (90 RH %, 5,8 ppm ja 30 RH %, 9,9 ppm). Myös altistusajan ja otsonipitoisuuden suhde vaikuttaa käsittelyn tehokkuuteen. Tutkimuksissa on voitu osoittaa, että pienemmällä otsonipitoisuudella ja pidemmällä altistusajalla päästään lähes samaan tulokseen kuin lyhyellä altistusajalla ja korkeammalla otsonipitoisuudella (Menetrez ym. 2009).

Tehdyissä tutkimuksissa on ollut useita rajoittavia tekijöitä: käytössä on ollut vain yksi tai korkeintaan kolme otsonointilaitetta, kohdemikrobeina on käytetty vain muutamia mikrobilajeja ja käsittelyajat ovat olleet suhteellisen lyhyitä. Valtaosa tutkimuksista on toteutettu laboratorio-olosuhteissa, joten tietoa otsonoinnin tehokkuudesta käytännön olosuhteissa on niukasti.

Taulukossa 2 on esitetty edellä esitettyjen tutkimusten tutkimusasettelut, käytetyt menetelmät ja otsonipitoisuudet sekä tulokset ja päätelmät.

### 3. Otsonoinnin teho hajuihin sekä vaikutus kemiallisiin epäpuhtauksiin, hiukkasiin, rakennus- ja sisustusmateriaaleihin

Otsonin tiedetään reagoivan rakennus- ja sisustusmateriaalien sekä niiden pinnoilla olevien kemiallisten epäpuhtauksien kanssa. Lisäksi otsoni reagoi sisäilman kemiallisten epäpuhtauksien kanssa (Kuva 1). Reaktiot otsonoinnissa perustuvat hapetusreaktioon, jossa otsonin muodostamat happiradikaalit reagoivat kemiallisten epäpuhtauksien kanssa muodostaen sekundääriepäpuhtauksia ja radikaaleja, kuten aldehydejä, ketoneita, orgaanisia happoja, hydroksyyli- ja nitraattiradikaaleja, primääri- ja sekundääriotsonideja,  $\alpha$ -hydroksiketoneita, ja  $\alpha$ -hydroperoksiedeja (Atkinson 1984, Weschler ym. 1992, Weschler & Shields 1996, Wainman ym. 2000, Atkinson & Arey 2003, Fan 2003, Liu 2004, Fan ym. 2005, Destailats ym. 2006, Poppendieck ym. 2007, Zeng ym. 2013). Syntyneet sekundääriyhdisteet voivat reagoida kaasufaasissa uudestaan tuottaen lisää ärsyttäviä ja syövyttäviä sivutuotteita (Weschler & Shields 1996, Weschler 1997). Sekundääriyhdisteet voivat myös adsorboitua rakennus- ja sisustusmateriaaleihin (Petrick ym. 2011). Otsonin ja kemiallisten epäpuhtauksien reaktioita tapahtuu enemmän materiaalin pinnalla tai materiaalissa olevien epäpuhtauksien kanssa kuin sisäilmassa johtuen suuremmasta adsorptio pinta-alasta (Shu & Morrison 2011). Otsoni poistuu ilmasta muun muassa kiinnittyen eri rakennusmateriaaleihin eri nopeuksilla. Otsonia poistuu ilmasta adsorption kautta sitä tehokkaammin, mitä huokoisemmasta materiaalista on kyse (Weschler 2000). Depositio on nopeinta kalsiumsilikaattilevyihin ja hitainta puulevyihin (Lin ym. 2015). Otsonin poistumiseen vaikuttavat myös epäpuhtauksien pitoisuus, otsonipitoisuus, reaktion termodynamiikka sekä ilmanvaihdon teho (Atkinson 1984). Boeniger (1995) totesi katsauksessaan, että kemiallisten epäpuhtauksien merkittävä vähentäminen sisäilmasta otsonoimalla otsonipitoisuuden ollessa 0,1 ppm (= 211  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) voi kestää kuukausista jopa useaan vuoteen.



Kuva 1. Otsonin ja muiden yhdisteiden väliset reaktiot (Salthammer & Bahadir 2009)

Otsoni reagoi herkimmin hiili–hiili-sidoksista muodostuvien epäpuhtauksien (esimerkiksi hiilivetyjen ja aromaattisten hiilivetyjen, bentseenin, isopreenin, styreenin, terpeenien, tyydyttämättömien rasvahappojen ja niiden esterien) sekä muiden VOC -yhdisteiden kanssa (alifaattiset yhdisteet, alkeenit, typen yhdisteet) (Weschler ym. 1992, Atkinson ym. 1995, Weschler & Shields 1996, Weschler 1997, Weschler & Shields 1999, Wolkoff ym. 1999, Wolkoff ym. 2000, Atkinson & Arey 2003, Nazaroff & Weschler 2004, Destailats ym. 2006, Singer ym. 2006, Weschler 2006, Aoki & Tanabe 2007, Waring & Siegel 2013). Otsonointi ei kuitenkaan pysty hajottamaan kaikkia sisäilman kemiallisia epäpuhtauksia. Noguchi ym. 2009 toteivat tutkimuksessaan, että 1 ppm (= 2110 µg/m<sup>3</sup>) otsonipitoisuudella saatiin tuhottua alifaattisia VOC -yhdisteitä, mutta aromaattiset yhdisteet eivät tässä pitoisuudessa hajonneet juuri lainkaan. Otsonoinnilla ei myöskään pystytä tehokkaasti poistamaan hiilimonoksidia (häkä) (Shaughnessy ym. 1994).

Otsonoinnin teho hajujen poistossa perustuu kemiallisten epäpuhtauksien hajottamiseen. Esimerkiksi tulipalokohteissa otsoni hapettaa aromaattisia hiilivety-yhdisteitä. Reaktiossa aromaattiset hiilivety-yhdisteet hajoavat ja hajoamistuotteina syntyy aldehydejä sekä ultrapieniä hiukkasia (Dunston & Spivak 1996). Morrison (1999) totesi tutkimuksessaan otsonin irrottaneen kokolattiamatoista useita hapettuneita yhdisteitä, kuten aldehydejä ja 2-nonanaalia. Ihmisen hajukynnys näille yhdisteille on hyvin matala (<10 ppt), lisäksi näiden yhdisteiden hajoaminen on hidasta. Poppendieck ym. (2007) mittasivat otsonoinnissa sivutuotteina syntyviä yhdisteitä ja totesivat niiden pysyvän sisäilmassa kuukausia, jopa pidempiä aikoja, pitoisuuksina, jotka ihminen voi haistaa. Tämä aika oli riippuvainen otsonoidusta materiaalista sekä sen pinta-alasta. Tutkituista materiaaleista MDF -levystä vapautuvat yhdisteet pysyivät ilmassa pisin.

Materiaaleja, joihin otsoni voi vaikuttaa haitallisesti, ovat muun muassa betoni, kipsilevy, luonnonkumi, neopreeni, lateksimaali, linoleumi ja puulattiat, kokolattiamatot, vahat ja kiillotusaineet (Weschler ym. 1992, Reiss ym. 1995, Klenø ym. 2001, Morrison 2002). Materiaalien reagoissa otsonin kanssa syntyy uusia terveydelle haitallisia reaktiotuotteita (kuten VOC-yhdisteitä, aldehydejä ja ketoneita), jotka voivat adsorboitua muun muassa muihin sisustus- ja rakennusmateriaaleihin tai reagoida uudelleen (Wolkoff ym. 1999, Wolkoff ym. 2000, Aoki & Tanabe 2007). Lisäksi otsonointi voi johtaa materiaalien vanhenemiseen sekä värien haalistumisen (Weschler 2000).

Otsonoinnilla ei ole todettu olevan merkittävää vaikutusta sisäilmassa olevien hiukkasten poistoon (Weschler 2000). Tämä on todettu johtuvan kolmesta eri syystä: (1) suurin osa ilmassa olevista hiukkasista reagoi otsonin kanssa hyvin hitaasti, reaktio voi viedä kuukausia tai vuosia; (2) otsoni reagoi harvemmin hiukkasten kuin kaasumaisten epäpuhtauksien kanssa; (3) hiukkaset sisältävät miljoonia molekyyliä ja jokaisen molekyylin hajottamiseen tarvitaan otsonin ja molekyylin välinen reaktio (Weschler 2000). Weschler (2000) mukaan alle 5 % pienhiukkasten ja alle 3 % karkeiden hiukkasten rakenteista reagoi otsonipitoisuuden ollessa 0,05–0,1 ppm (106–211 µg/m<sup>3</sup>).

Taulukossa 3 on esitetty kemiallisten epäpuhtauksien, rakennus- ja sisustusmateriaaleihin kohdistettujen tutkimusten tutkimusasettelut, tutkitut materiaalit, otsonipitoisuudet ja vaikutusajaka sekä tulokset ja päätelmät.

#### 4. Otsonoinnin vaikutus terveyteen ja otsonointikäsitteistä aiheutuvat riskit

Otsonin voi haistaa jo suhteellisen alhaisissa pitoisuuksissa: 0,02–0,04 ppm (42,3–84,5 µg/m<sup>3</sup>). Terveyshaittavaikutuksia voi esiintyä jo alle 100 µg/m<sup>3</sup> pitoisuuksissa (WHO 2005), mikä tulee huomioida otsonilta suojautumisessa. Otsonin puoliintumisaika sisätiloissa on melko lyhyt, 7–10 minuuttia (Weschler 2000).

Otsoni kulkeutuu elimistöön pääasiassa hengitysteitä pitkin. Huonosti vesiliukenevana yhdisteenä otsoni ei kiinnity ylempiin hengitysteihin, vaan kulkeutuu alempien hengitysteiden keuhkorakkuloihin asti läpäisten levyepiteelin. Hengitystekniikka vaikuttaa suuresti – suun kautta hengitettäessä otsoni pääsee hengitysteihin tehokkaammin. Tämän vuoksi voimakkaan liikunnan aikana otsonia siirtyy selvästi enemmän keuhkoihin. Myös ikä, sukupuoli, keuhkojen tilavuus ja kudospinta-ala vaikuttavat otsonin siirtymiseen. Siirtyminen keuhkoihin on suurempaa lapsilla ja naisilla (Bush ym. 1996). Otsonin aiheuttamia vaikutuksia on havaittu myös kyynelkanavan epiteelisoluissa henkilöillä, jotka ovat altistuneet ympäristön luonnolliselle otsonin taustapitoisuudelle (Rojas ym. 2000). On todennäköistä, että ihon kautta altistuminen rajoittuu dermiksen (verinahka) ylimpiin kerroksiin eikä otsoni pääse imeytymään sen sisempiin osiin.

Otsonin terveyshaitat perustuvat sen kykyyn hapettaa keuhkosolujen entsyymejä, proteiineja ja rasvahappoja (Mehlman 1987, EPA 2015). Limakalvojen pinnalla oleva nestekerros suojaa

alla olevaa kudosta vaikutuksilta, mutta syntyneet vapaat happiradikaalit ja muut hapetustuotteet reagoivat epiteeli- ja immuunisolujen sekä hermoresptorien kanssa keuhkoissa. Otsoni voi reagoida myös suoraan keuhkoissa olevien rakenteiden kanssa. Otsonista aiheutuvien terveyshaittojen tärkeimpinä mekanismeina pidetään keuhkojen ääreisosien tulehduksia sekä autonomisen hermoston reseptorien muutoksia (Mustafa 1990, Mudway & Kelly 2000, ARB 2005, McClellan ym. 2009, EPA 2015). Nämä aiheuttavat vaurioita hengitysteissä sekä vaikeuttavat hengitetyn ilman ja verenkierron välistä kaasujen vaihtoa ilmeten muun muassa ärsytys- ja astmaoireina (yskä, hengityksen vinkuminen ja hengitysvaikeudet). McClellan ym. (2009) totesivat katsauksessaan otsonin toksisten mekanismien olevan vielä epäselvät akuuteissa terveysoireissa.

Otsonin aiheuttamat terveysvaikutukset voidaan jakaa karkeasti akuutteihin (välittömiin) sekä kroonisiin vaikutuksiin. Akuutit vaikutukset liittyvät suuriin otsonipitoisuuksiin, krooniset vaikutukset toistuvaan/jatkuvaan altistumiseen koholla oleviin otsonipitoisuuksiin. Lyhytaikaisen otsonialtistuksen on havaittu heikentävän keuhkojen toimintaa ja aiheuttavan keuhkojen tulehdusta. Tämä on havaittavissa myös nuorilla aikuisilla, erityisesti rasituksen aikana (esim. urheileminen). Vastaavanlaisia tuloksia on saatu myös tutkimuksissa, joissa lapset altistuvat otsonille kesäleirin aikana urheillessaan. Otsonin on havaittu vaikuttavan lyhytaikaisen altistuksen seurauksena haitallisesti myös sydän- ja verisuonitauteihin, mutta tutkimustietoa tästä on rajoitetusti (WHO 2005). EPA:n (Environmental Protection Agency) raportin mukaan otsonin aiheuttamia akuutteja terveyshaittoja ovat rintakipu, yskä, hengitysvaikeudet ja kurkun ärsytys. Otsoni voi myös pahentaa astman oireita ja heikentää vastustuskykyä (EPA 2013, Sheffield ym. 2015). Pitoisuuden ylittäessä 1 ppm (2110 µg/m<sup>3</sup>) ja altistuksen jatkuessa yli vuorokauden voi otsoni aiheuttaa myös pysyviä silmä- ja hengitystieoireita (Russell ym. 2013).

Toistuvaan otsonialtistumiseen liittyviä kroonisia vaikutuksia ovat astman synty, ateroskleroosi sekä eliniän ennusteen lyheneminen (WHO 2005). Nämä vaikutukset koskevat ensisijaisesti otsonointia tekeviä työntekijöitä, jotka voivat altistua otsonille toistuvasti. Pitkäaikainen altistuminen otsonille suurina pitoisuuksina lisää myös iäkkäiden ihmisten hengitystieperäisiin sairauksiin liittyvää kuolleisuutta.

Otsonin on todettu olevan pienhiukkasten jälkeen seuraavaksi suurin kuolemaa aiheuttava ulkoilman saaste. WHO:n raportin (WHO 2005) mukaan otsonipitoisuuden ollessa 240 µg/m<sup>3</sup> (0,114 ppm) kuolleisuus on lisääntynyt 3–5 %. Pitoisuuden ollessa ohjearvon mukainen 100 µg/m<sup>3</sup> (0,047 ppm) kuolleisuus on lisääntynyt 1–2 % (Taulukko 1).

Otsonista aiheutuva terveydellinen haitta riippuu sen pitoisuudesta, altistuksen kestosta, fyysisen rasituksen voimakkuudesta altistuksen aikana ja altistuvan henkilön terveydentilasta sekä geneettisistä tekijöistä (McClellan ym. 2009, EPA 2015). Haitallisena pidetään lyhytaikaisia suuria pitoisuuksia, kuten myös pitkään jatkuvaa altistusta normaalia korkeammille otsonipitoisuuksille.

Otsonointilaitteita käytettäessä akuutit terveysvaikutukset ovat todennäköisiä. Altistuminen otsonille on lyhytaikaista, mutta pitoisuudet ovat suuria. Jos työntekijät ja asukkaat ovat pois riittävän pitkän varoajan, otsonin aiheuttamia kroonisia terveyshaittoja ei pääse syntymään. Sosiaali- ja terveysministeriö on arvioinut otsonin voivan aiheuttaa haittaa työntekijöiden

terveydelle 0,05 ppm pitoisuutta suuremmilla keskimääräisillä pitoisuuksilla (8 tunnin HTP (haitalliseksi tunnettu pitoisuus)-arvo 0,05ppm = 106 µg/m<sup>3</sup>). Koska oireita saattaa ilmaantua myös hetkellisessä altistuksessa, on otsonille lisäksi asetettu 15 minuutin altistumisen HTP-arvoksi 0,2 ppm (423 µg/m<sup>3</sup>) (Sosiaali- ja terveysministeriö 2014). Taulukossa 1 on esitetty kansainvälisen terveysjärjestö WHO:n antama vastaava ohjearvo otsonialtistukselle (100 µg/m<sup>3</sup>) sekä eri pitoisuuksien aiheuttamat terveysvaikutukset (WHO 2005).

Taulukko 1. WHO:n antama ohjearvo väestön otsonialtistukselle sekä sen aiheuttamille terveysvaikutuksille (WHO 2005).

Päivittäinen maksimi 8 tunnin keskiarvo (µg/m <sup>3</sup> )	Haitalliset terveysvaikutukset
240	– Merkittäviä terveysvaikutuksia herkimmillä ryhmillä.
160 (WHO:n aikaisempi ohjearvo)	– Fysiologisia ja tulehduksellisia reaktioita keuhkoissa terveillä nuorilla aikuisilla, jotka urheilevat (altistus 6,6 tuntia). – Terveysvaikutuksia lapsilla (tutkimukset tehty kesäleireillä, joiden aikana lapset altistuvat ympäristön otsonipitoisuuksille). – Arvioitu 3–5 % lisääntynyt kuolleisuus.
100 (WHO:n ohjearvo)	– Tämä pitoisuus on asetettu otsonipitoisuuden maksimiarvoksi, jotta pystytään turvaamaan väestön terveys. Tätä alhaisemmilla pitoisuuksilla voi kuitenkin esiintyä joitakin terveysvaikutuksia. – 1–2 % lisääntynyt kuolleisuus.

## 5. Otsonointiin liittyvä viimeaikainen tutkimus

Tämän selvityksen kirjallisuushauissa keskityttiin pääasiassa tieteellisiin julkaisuihin, joissa käsiteltiin sisäympäristössä tapahtuvan otsonoinnin vaikutuksia bakteereihin ja sieniin sekä kemiallisiin yhdisteisiin ja hajuihin. Tehtyjen kirjallisuushakujen perusteella huomattiin, että viimeaikaista tutkittua tietoa otsonoinnin vaikutuksista sisäilmassa ja rakennusmateriaaleissa oleviin bakteereihin, sieniin sekä kemiallisiin yhdisteisiin, on niukasti. Viimeisimmät otsonointiin liittyvät tutkimukset ovat perustuneet pitkälti kemiallisten yhdisteiden ja otsonin välisiin reaktioihin, reaktiotuotteisiin (Weisel ym. 2013, Rai ym. 2014, Wang & Waring 2014, Cheng ym. 2015) sekä otsonin ja rakennus- ja sisustusmateriaalien välisiin reaktioihin (Schripp ym. 2012, Gall ym. 2014, Hoang ym. 2014, Corsi ym. 2015). Indoor Air 2016 -seminaarijulkaisussa oli kaikkiaan 19 esitystä, jotka käsitelivät otsonia. Esityksistä suurin osa käsiteli otsonipitoisuuksia sisä- ja ulkoilmassa. Esityksistä neljä tarkasteli otsonin ja kemiallisten yhdisteiden välisiä reaktioita, muuntumista sekä syntyviä sekundääriyhdisteitä. Otsonin terveysvaikutuksia käsitteleviä esityksiä oli vastaava määrä (Indoor Air 2016 Proceedings).

Kirjallisuusselvityksessä selvisi, että sisäilmassa tapahtuvasta otsonoinnista ei ole tehty laajamittaista kenttätutkimusta, jossa olisi selvitetty otsonoinnin toimivuutta sisäilmaongelmaisissa kohteissa.

## 6. Yritysten haastattelut

Haastattelu lähetettiin 30:lle otsonointia tekeväälle tai otsonointilaitteita vuokraavalle yritykselle. Haastatteluun vastasi yhdeksän yritystä. Haastatteluista ilmeni, että yritysten toimintatavat vaihtelevat niin koulutuksen kuin asiakkaille annettavan ennako-ohjeistuksen, muun muassa varoajan suhteen. Haastatelluilla yrityksillä oli käytössä eri valmistajien otsonointilaitteita. Otsonointien määrä vaihteli eri yrityksissä parista kerrasta yli sataan otsonointiin vuodessa. Otsonointia tekeviä työntekijöitä yrityksissä oli 1–3 henkilöä, joiden koulutus vaihteli laitteen toimittajan pitämästä puolen päivän koulutuksesta, useisiin lyhyisiin koulutuksiin tai tarkempaan perehtymiseen aiheesta. Pääsääntöisesti yritykset eivät suositelleet otsonointia tapauksissa, joissa siitä ei ollut erityistä hyötyä kohteessa tai mikäli epäpuhtauslähde (esim. homevaurio) ei oltu poistettu. Jotkin yritykset suosittelivat myös biosideja ja ilmanpuhdistimia. Laitteita vuokraavat yritykset antoivat asiakkaalle sekä kirjallisen että suullisen ohjeistuksen otsonoinnin teknisestä suorittamisesta ja turvallisuudesta. Mikäli yritys teki otsonoinnin itse, annettiin asiakkaalle ohje pysyä poissa tilasta otsonoinnin ajan. Jotkin yritykset ohjeistivat myös poistamaan tilasta huonekasvit, elintarvikkeet ja eläimet ennen otsonointia. Yksi yritys ilmoitti tekevänsä otsonointia ainoastaan tyhjiin tiloihin/asuntoihin. Otsonoitavat tilat merkittiin yleensä ulkopuolelta varoituskyltein ja joissakin tapauksissa myös lukittiin. Valtaosa yrityksistä ilmoitti sulkevansa ilmanvaihdon tai teippaavansa ilmanvaihtokanavien suuaukot, jotta otsonin leviäminen muihin tiloihin pystyttiin estämään. Joissakin tapauksissa tila myös alipaineistettiin. Varoajat otsonoinnin jälkeen vaihtelivat 30 minuutista kahteen tuntiin, jonka aikana tiloja tuuletettiin, joissakin tapauksissa myös puhaltimen avulla. Osa yrityksistä ilmoitti varoajan olevan ”mahdollisimman pitkä”. Valtaosassa yrityksiä oli käytössä ajastin, jolla laite kytkettiin päälle ja sammutettiin ”etänä”, jolloin työntekijän altistusta pystyttiin vähentämään. Haastatteluissa ei tullut ilmi työntekijöiden oireilua.

## 7. Yhteenveto ja johtopäätökset

### *Otsonoinnin teho bakteereihin ja sieniin*

- Tutkimusten mukaan ihmiselle turvallisella otsonipitoisuudella (<0,05 ppm = < 106 µg/m<sup>3</sup>) ei ole sieni- ja bakteeriorganismeja tuhoavaa vaikutusta. Se voi kuitenkin hidastaa joidenkin mikrobien kasvua.
- Otsonipitoisuuden tulisi olla vähintään 5–10 kertaa ihmisille haitalliseksi todettua pitoisuutta suurempi, jotta sillä olisi selkeästi sienien ja bakteerien kasvua hidastavia ja tuhoavia vaikutuksia.
- Laboratorio-olosuhteissa lasipintaisella kasvatusalustalla tehdyissä tutkimuksissa on otsonilla pystytty osoittamaan olevan sieni- ja bakteeriorganismien kasvua hidastava ja organismeja tuhoava vaikutus otsonipitoisuuden ollessa yli 10 ppm (= 21 100 µg/m<sup>3</sup>).

Rakennusmateriaalien pinnoilla kasvavilla sieni- ja bakteeriorganismeilla ei vastaavissa pitoisuuksissa ole havaittu kasvua tuhoavaa vaikutusta.

- Tutkimukset osoittavat, että suurelta otsonipitoisuuksista (100–1000 ppm) eivät pysty tuhoamaan kaikkia sieni- tai bakteeriorganismeja rakennusmateriaalien pinnalta tai sisältä. On myös huomattava, että tällaisten pitoisuuksien tavoittaminen kenttäolosuhteissa on lähes mahdotonta.

#### ***Otsonoinnin teho hajuihin sekä vaikutus kemiallisiin epäpuhtauksiin, hiukkasiin, rakennus- ja sisustusmateriaaleihin***

- Reaktiot otsonoinnissa perustuvat hapetusreaktioon, jossa otsonin muodostamat happiradikaalit reagoivat kemiallisten epäpuhtauksien kanssa, muodostaen sekundääriepäpuhtauksia ja radikaaleja, kuten aldehydejä, ketoneita, orgaanisia happoja, hydroksyyli- ja nitraattiradikaaleja, primääri- ja sekundääriotsonideja,  $\alpha$ -hydroksiketoneja, ja  $\alpha$ -hydroperoksiedeja.
- Syntyneet sekundääriyhdisteet voivat reagoida kaasufaasissa uudestaan tuottaen lisää ärsyttäviä ja syövyttäviä sivutuotteita. Sekundääriyhdisteet voivat myös adsorboitua rakennus- ja sisustusmateriaaleihin.
- Sivutuotteina syntyviä yhdisteitä voi olla sisäilmassa pitkään, kuukausia, jopa pidempiä aikoja pitoisuuksina, jotka ihminen voi haistaa. Tämä aika on riippuvainen otsonoidusta materiaalista sekä sen pinta-alasta.
- Otsoni reagoi herkimmin hiili–hiili-sidoksista muodostuvien epäpuhtauksien (esimerkiksi hiilivetyjen ja aromaattisten hiilivetyjen, bentseenin, isopreenin, styreenin, terpeenien, tyydyttämättömien rasvahappojen ja niiden esterien) sekä muiden VOC -yhdisteiden kanssa (alifaattiset yhdisteet, alkeenit, typen yhdisteet).
- Otsonoinnin teho hajujen poistossa perustuu kemiallisten epäpuhtauksien hajottamiseen. Esimerkiksi tulipalokohteissa otsoni hapettaa aromaattisia hiilivety-yhdisteitä. Reaktiossa aromaattiset hiilivety-yhdisteet hajoavat ja hajoamistuotteina syntyy aldehydejä sekä ultrapieniä hiukkasia.
- Otsonin ja kemiallisten epäpuhtauksien reaktioita tapahtuu enemmän materiaalin pinnalla tai materiaalissa olevien epäpuhtauksien kanssa kuin sisäilmassa johtuen suuremmasta adsorptio pinta-alasta. Otsoni poistuu ilmasta muun muassa kiinnittyen eri rakennusmateriaaleihin eri nopeuksilla. Otsonia poistuu ilmasta adsorption kautta sitä tehokkaammin, mitä huokoisemmasta materiaalista on kyse. Depositio on nopeinta kalsiumsilikaattilevyihin ja hitainta puulevyihin. Otsonin poistumiseen vaikuttavat myös epäpuhtauksien pitoisuus, otsonipitoisuus, reaktion termodynamiikka sekä ilmanvaihdon teho. Kemiallisten epäpuhtauksien merkittävä vähentäminen sisäilmasta otsonoimalla, otsonipitoisuuden ollessa 0,1 ppm (= 211  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), voi kestää kuukausista jopa useaan vuoteen.
- Otsonoinnilla ei ole todettu olevan merkittävää vaikutusta sisäilmassa olevien hiukkasten poistoon johtuen hiukkasten hitaasta reaktiosta otsonin kanssa; reaktio voi viedä kuukausia tai vuosia. Otsoni myös reagoi harvemmin hiukkasten kuin kaasumaisten epäpuhtauksien kanssa. Lisäksi hiukkaset sisältävät miljoonia molekyyliä, ja jokaisen molekyylin hajottamiseen tarvitaan otsonin ja molekyylin välinen reaktio.



- Materiaaleja, joihin otsoni voi vaikuttaa haitallisesti, ovat muun muassa betoni, kipsilevy, luonnonkumi, neopreeni, lateksimaali, linoleumi ja puulattiat, kokolattiamatot, vahat ja kiillotusaineet.
- Otsonointi voi myös johtaa materiaalien vanhenemiseen sekä värien haalistumiseen.
- Materiaalien hajoamisen yhteydessä syntyy uusia terveydelle haitallisia reaktiotuotteita, jotka voivat adsorboitua muun muassa muihin sisustus- ja rakennusmateriaaleihin tai reagoida uudestaan.

#### **Otsonoinnin vaikutus terveyteen ja otsonointikäsitellyistä aiheutuvat riskit**

- Otsonin voi haistaa jo suhteellisen alhaisissa pitoisuuksissa: 0,02 – 0,04 ppm (42,3–84,5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Terveyshaittavaikutuksia voi esiintyä jo alle 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pitoisuuksissa (WHO 2005), mikä tulee huomioida otsonilta suojautumisessa. Otsonin puoliintumisaika sisätiloissa on melko lyhyt, 7–10 minuuttia.
- Sosiaali- ja terveysministeriö on arvioinut otsonin voivan aiheuttavan haittaa työntekijöiden terveydelle 0,05 ppm pitoisuutta suuremmilla keskimääräisillä pitoisuuksilla (8 tunnin HTP-arvo 0,05ppm = 106  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).
- Otsonin terveyshaitat perustuvat sen kykyyn hapettaa keuhkosolujen entsyymejä, proteiineja ja rasvahappoja.
- Otsonin aiheuttamat terveysvaikutukset voidaan jakaa karkeasti akuutteihin (välittömiin) sekä kroonisiin vaikutuksiin. Akuutit vaikutukset liittyvät suuriin otsonipitoisuuksiin, krooniset vaikutukset toistuvaan/jatkuvaan altistumiseen koholla oleviin otsonipitoisuuksiin. Otsonointilaitteita käytettäessä akuutit terveysvaikutukset ovat todennäköisiä. Altistuminen otsonille on lyhytaikaista, mutta pitoisuudet ovat suuria. Jos työntekijät ja asukkaat ovat poissa riittävän pitkän varoajan, otsonin aiheuttamia kroonisia terveyshaittoja ei pääse syntymään.
- Otsonin aiheuttamia akuutteja terveyshaittoja ovat rintakipu, yskä, hengitysvaikeudet ja kurkun ärsytys. Otsoni voi myös pahentaa astman oireita ja heikentää vastustuskykyä. Pitoisuuden ylittäessä 1 ppm (2110  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) ja altistuksen jatkuessa yli vuorokauden voi otsoni aiheuttaa myös pysyviä silmä- ja hengitystieoireita.
- Otsonin kroonisia vaikutuksia ovat astman synty, ateroskleroosi sekä eliniän ennusteen lyheneminen. Pitkäaikainen altistuminen otsonille, suurina pitoisuuksina, lisää myös iäkkäiden ihmisten hengitystieperäisiin sairauksiin liittyvää kuolleisuutta.
- Otsonista aiheutuva terveydellinen haitta riippuu pitoisuudesta, altistuksen kestosta, fyysisen rasituksen voimakkuudesta altistuksen aikana ja altistuvan henkilön terveydentilasta sekä geneettisistä tekijöistä. Haitallisena pidetään lyhytaikaisia suuria pitoisuuksia, kuten myös pitkään jatkuvaa altistusta normaalia korkeammille otsonipitoisuuksille.

## JOHTOPÄÄTÖKSET

- *Suureltaan, ihmiselle haitalliset pitoisuudet eivät tuhoa sieni- ja bakteerikasvua rakennusmateriaalien pinnalta ja sisältä.*
- *Otsonointia ei suositella bakteeri- ja sienikasvustojen ”poistamiseen/tuhoamiseen”*
- *Otsonointi poistaa rakennuksista hajuja perustuen kemiallisten yhdisteiden hajottamiseen.*
- *Otsoni on itsessään haitallista, erityisesti lyhytaikaiset suuret pitoisuudet.*
- *Otsonoinnin sivutuotteina voi syntyä sisäilmaan terveydelle haitallisia pienhiukkasia tai yhdisteitä, jotka voivat myös adsorboitua pintoihin ja rakenteisiin.*
- *Otsonointi voi vaikuttaa haitallisesti pintoihin ja materiaaleihin (betoni, kipsilevy, luonnonkumi, neopreeni, lateksimaali, linoleumi ja puulattiat, kokolattiamatot) ja myös vanhentaa ja haalistaa materiaaleja.*
- *Ottaen huomioon otsonin haitallisuuden ja otsonoinnin johdosta mahdollisesti syntyvät haitalliset sivutuotteet ja niiden vaikutuksen materiaaleihin, otsonointi tulee tehdä niin, että otsonoitava tila on tyhjä ja otsonin leviäminen muihin tiloihin esimerkiksi ilmanvaihdon kautta on estetty. Otsonoitava tila on merkittävä varoituskyltein. Lisäksi on noudatettava riittävää varoaikaa (vähintään 24 h, mielellään 48 h) ennen tiloihin menemistä/tilojen käyttöä. Otsonoinnin jälkeen tilassa tulee tehostaa ilmanvaihtoa ilmassa olevien epäpuhtauksien poistamiseksi ja varoajan jälkeen puhdistaa pinnat pyyhkimällä niille mahdollisesti päätyneiden epäpuhtauksien poistamiseksi.*

## LÄHTEET

- ARB 2005b. Review of the California Ambient Air Quality Standard for Ozone. Vols. 2 and 3. Internet julkaisu. <http://www.arb.ca.gov/research/aaqs/ozone-rs/rev-staff/rev-staff.htm#Summary>
- Aoki, T. & Tanabe, S. 2007, "Generation of sub-micron particles and secondary pollutants from building materials by ozone reaction", *Atmospheric Environment*, vol. 41, no. 15, pp. 3139-3150.
- Atkinson, R. 1984, *Kinetics and mechanisms of the gas-phase reactions of ozone with organic compounds under atmospheric conditions*, American Chemical Society.
- Atkinson, R., Tuazon, E.C. & Aschmann, S.M. 1995, "Products of the Gas-Phase Reactions of O<sub>3</sub> with Alkenes", *Environmental science & technology*, vol. 29, no. 7, pp. 1860-1866.
- Atkinson, R. & Arey, J. 2003, "Atmospheric Degradation of Volatile Organic Compounds", *Chemical reviews*, vol. 103, no. 12, pp. 4605-4638.
- Aydogan, A. & Gurol, M. 2006, "Application of gaseous ozone for inactivation of Bacillus subtilis spores", *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 56, no. 2, pp. 179-185.
- Bertol, C.D., Vieira, K.P., Rossato, L.G. & D'Avila, J.V. 2012, "Microbiological Environmental Monitoring After the Use of Air Purifier Ozone Generator", *Ozone: Science & Engineering*, vol. 34, no. 3, pp. 225-230.
- Boeniger, M.F. 1995, "Use of Ozone Generating Devices to Improve Indoor Air Quality", *American Industrial Hygiene Association Journal*, vol. 56, no. 6, pp. 590-598.
- Bush, M.L., Asplund, P.T., Miles, K.A., Ben-Jebria, A. & Ultman, J.S. 1996 "Longitudinal distribution of ozone absorption in the lung: gender differences and intersubject variability", *Journal of Applied Physiology*, vol. 81, pp. 1651-1657.
- Cheng, Y., Lin, C. & Hsu, S. 2015, "Comparison of conventional and green building materials in respect of VOC emissions and ozone impact on secondary carbonyl emissions", *Building and Environment*, vol. 87, pp. 274-282.
- Corsi, R.L., Gall, E.T. & Siegel, J.A. 2015, "Modeling ozone removal to indoor materials, including the effects of porosity, pore diameter, and thickness", *Environmental science & technology*.
- Destailhats, H., Lunden, M.M., Singer, B.C., Coleman, B.K., Hodgson, A.T., Weschler, C.J. & Nazaroff, W.W. 2006, "Indoor Secondary Pollutants from Household Product Emissions in the Presence of Ozone: A Bench-Scale Chamber Study", *Environmental science & technology*, vol. 40, no. 14, pp. 4421-4428.
- Dunston, N. & Spivak, S. 1996, "A Preliminary Investigation of the Effects of Ozone on Post-Fire Volatile Organic Compounds", *Journal of Applied Fire Science*, vol. 6, no. 3, pp. 231-242.
- Dyas, A., Boughton, B.J. & Das, B.C. 1983, "Ozone killing action against bacterial and fungal species; microbiological testing of a domestic ozone generator", *Journal of clinical pathology*, vol. 36, no. 10, pp. 1102-1104.
- Environmental Protection Agency (EPA). 2015. "Health Effects of Ozone in the General Population", Internet julkaisu. <http://www3.epa.gov/apti/ozonehealth/population.html>
- Environmental Protection Agency (EPA). 2013. "Ozone Generators that are Sold as Air Cleaners: An Assessment of Effectiveness and Health Consequences", Internet julkaisu. <http://www.epa.gov/iaq/pubs/ozonegen.html>.
- Fan, Z. 2003, *Ozone-Initiated Reactions with Mixtures of Volatile Organic Compounds under Simulated Indoor Conditions*, American Chemical Society.
- Fan, Z., Weschler, C.J., Han, I. & Zhang, J. 2005, "Co-formation of hydroperoxides and ultra-fine particles during the reactions of ozone with a complex VOC mixture under simulated indoor conditions", *Atmospheric Environment*, vol. 39, no. 28, pp. 5171-5182.
- Foarde, K.K., Vanosdell, D.W. & Steiber, R.S. 1997, "Investigation of Gas-Phase Ozone as a Potential Biocide", *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 12, no. 8, pp. 535-542.

- Gall, E.T., Corsi, R.L. & Siegel, J.A. 2014, "Impact of Physical Properties on Ozone Removal by Several Porous Materials", *Environmental science & technology*, vol. 48, no. 7, pp. 3682-3690.
- Hoang, C., Nguyen, T., Stanley, D., Persily, A. & Corsi, R.L. 2014, "Effect of ozonation on fungal resistance of bamboo and oak flooring materials", *Building and Environment*, vol. 81, no. 0, pp. 226-233.
- Huang, H.-., Lee, M.-. & Tai, J.-. 2012, "Controlling indoor bioaerosols using a hybrid system of ozone and catalysts", *Aerosol and Air Quality Research*, vol. 12, no. 1, pp. 73-82.
- Hudson, J. & Sharma, M. 2009, "The Practical Application of Ozone Gas as an Anti-fungal (Anti-mold) Agent", *Science and Engineering*, vol. 31, pp. 326-332.
- Huttunen, K., Kauhanen, E., Meklin, T., Vepsäläinen, A., Hirvonen, M.-R., Hyvärinen, A. & Nevalainen, A. 2010, "The effect of ozonation on furniture dust: Microbial content and immunotoxicity *in vitro*", *Science of the Total Environment*, vol. 408, pp. 2305-2311.
- Indoor Air 2016 Proceedings. Saatavilla maksullisena internet osoitteesta: <http://www.isiaq.org/publications.php>.
- Kagi, N., Fujii, S., Horiba, Y., Namiki, N., Ohtani, Y., Emi, H., Tamura, H. & Kim, Y.S. 2007, "Indoor air quality for chemical and ultrafine particle contaminants from printers", *Building and Environment*, vol. 42, no. 5, pp. 1949-1954.
- Kagi, N., Fujii, S., Tamura, H. & Namiki, N. 2008, "Secondary VOC emissions from flooring material surfaces exposed to ozone or UV irradiation" *Building and Environment*, vol. 44, pp. 1199-1205.
- Kammer, R. 2005, "The Microbial Killing Effect of Airborne Ozone" Opinnäytetyö, University of Kalmar.
- Khurana, A. 2003, *Ozone treatment for prevention of microbial growth in air conditioning systems*, University of Florida.
- Klanova, K. & Lajcikova, A. 2006, "Use of Ozone to Reduce Bacteria and Moulds in the Air and on Surfaces" *Indoor and Built Environment*, vol. 15, no. 1, pp. 81-84.
- Klenø, J.G., Clausen, P.A., Weschler, C.J. & Wolkoff, P. 2001, "Determination of ozone removal rates by selected building products using the FLEC emission cell", *Environmental science & technology*, vol. 35, no. 12, pp. 2548-2553.
- Komanapalli, I.R. & Lau, B.H.S. 1998, "Inactivation of bacteriophage k, Escherichia coli, and Candida albicans by ozone", *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 49, no. 6, pp. 766-769.
- Korzun, W., Hall, J. & Sauer, R. 2008, "The effect of ozone on common environmental fungi.", *Clinical laboratory science : journal of the American Society for Medical Technology*, vol. 21, no. 2, pp. 107-111.
- Kowalski, W., Bahnfleth, W. & Whittam, T. 1998, "Bactericidal effects of high airborne ozone concentrations on Escherichia coli and Staphylococcus aureus", *Ozone-Science & Engineering*, vol. 20, no. 3, pp. 205-221.
- Lin, C-C. & Hsu, S-C. 2015, "Deposition velocities and impact of physical properties on ozone removal for building materials", *Atmospheric Environment*, vol. 101, pp. 194-199.
- Liu, X. 2004, *Full-Scale Chamber Investigation and Simulation of Air Freshener Emissions in the Presence of Ozone*, American Chemical Society.
- McClellan, R.O., Frampton, M.W., Koutrakis, P., McDonnell, W.F., Moolgavkar, S., North, D.W., Smith, A.E., Smith, R.L. & Utell, M.J. 2009, "Critical considerations in evaluating scientific evidence of health effects of ambient ozone: a conference report", *Inhalation toxicology*, vol. 21, pp. 1-36.
- Mehlman, M.A. & Borek, C. 1987, "Toxicity and biochemical mechanisms of ozone", *Environmental research*, vol. 42, no. 1, pp. 36-53.
- Menetrez, M.Y., Foarde, K.K., Schwartz, T.D., Dean, T.R. & Betancourt, D.A. 2009, "An Evaluation of the Antimicrobial Effects of Gas-Phase Ozone", *Ozone: Science & Engineering*, vol. 31, no. 4, pp. 316-325.
- Morrison G.C. 2002, *Ozone Interactions with Carpet: Secondary Emissions of Aldehydes*, Environ. Sci. Technol., 2002, 36 (10), pp 2185-2192 edn, American Chemical Society, Environmental Engineering Program, Department of Civil and Environmental Engineering, 633 Davis Hall, University of California, Berkeley, California 94720-1710.

- Morrison, G.C. 1999, *Ozone-surface interactions: investigations of mechanisms, kinetics, mass transport, and implications for indoor air quality*.
- Mudway, I.S. & Kelly, F.J. 2000, "Ozone and the lung: a sensitive issue", *Molecular aspects of medicine*, vol. 21, no. 1-2, pp. 1-48.
- Mustafa, M.G. 1990, "Biochemical basis of ozone toxicity", *Free Radical Biology and Medicine*, vol. 9, no. 3, pp. 245-265.
- Nazaroff, W.W. & Weschler, C.J. 2004, "Cleaning products and air fresheners: exposure to primary and secondary air pollutants", *Atmospheric Environment*, vol. 38, no. 18, pp. 2841-2865.
- Nicolas, M., Ramaldo, O. & Maupetit, F, "Reactions between ozone and building products: Impact on primary and secondary emissions", *Atmospheric Environment*, vol. 41, pp. 3129-3138.
- Noguchi, M., Mizukoshi, A. & Yanagisawa, Y. 2009, "Decreasing method of VOCs emission from building materials using ozonolysis", *9th International Healthy Buildings Conference and Exhibition, HB 2009*, 13 September 2009 through 17 September 2009.
- Peitzsch, M., Bloom, E., Haase, R., Must, A. & Larsson, L. 2012, "Remediation of mould damaged building materials-efficiency of a broad spectrum of treatments", *Journal of Environmental Monitoring*, vol. 14, no. 3, pp. 908-915.
- Patrick, L.M., Sleiman, M., Dubowski, Y., Gundel, L.A. & Destailats, H. 2011, "Tobacco smoke aging in the presence of ozone: A room-sized chamber study", *Atmospheric Environment*, vol. 45, no. 28, pp. 4959-4965.
- Poppendieck, D.G., Hubbard, H.F., Weschler, C.J. & Corsi, R.L. 2007, "Formation and emissions of carbonyls during and following gas-phase ozonation of indoor materials", *Atmospheric Environment*, vol. 41, no. 35, pp. 7614-7626.
- Rai, A., Guo, B., Lin, C., Zhang, J., Pei, J. & Chen, Q. 2014, "Ozone reaction with clothing and its initiated VOC emissions in an environmental chamber", *Indoor air*, vol. 24, no. 1, pp. 49-58.
- Reiss, R., Ryan, P.B., Koutrakis, P. & Tibbetts, S.J. 1995, "Ozone reactive chemistry on interior latex paint", *Environmental science & technology*, vol. 29, no. 8, pp. 1906-1912.
- Rojas, E., Valverde, M., Lopez, M.C., Naufal, I., Sanchez, I., Bizarro, P., Lopez, I., Fortoul, T.I. & Ostrosky-Wegman, P. 2000, "Evaluation of DNA damage in exfoliated tear duct epithelial cells from individuals exposed to air pollution assessed by single cell gel electrophoresis assay", *Mutation Research*, vol. 468, pp. 11-17.
- Russell, A.D., Hugo, W.B. & Ayliffe, G.A.J. 2013, *Principles and Practice of Disinfection, Preservation and Sterilization*, 5<sup>th</sup> Edition, Wiley-Blackwell.
- Salthammer, T. & Bahadir, M. 2009, "Occurrence, Dynamics and Reactions of Organic Pollutants in the Indoor Environment", *Clean Soil, Air, Water*, vol. 37, no. 6, pp. 417-435.
- Schripp, T., Langer, S. & Salthammer, T. 2012, "Interaction of ozone with wooden building products, treated wood samples and exotic wood species", *Atmospheric Environment*, vol. 54, no. 0, pp. 365-372.
- Sharma, M. & Hudson, J.B. 2008, "Ozone gas is an effective and practical antibacterial agent", *American Journal of Infection Control*, vol. 36, no. 8, pp. 559-563.
- Shaugnessy, R., Levetin, E., Blocker, J. & Sublette, K. 1994, "Effectiveness of portable indoor air cleaners: sensory testing results", *Indoor Air*, vol. 4, pp. 179-188.
- Sheffield, P.E., Zhou, J., Shmool, J.L. & Clougherty, J.E. 2015, "Ambient ozone exposure and children's acute asthma in New York City: a case-crossover analysis", *Environmental Health*, vol. 18, no. 14.
- Shu, S. 2011, *Surface Reaction Rate and Probability of Ozone and Alpha-Terpineol on Glass, Polyvinyl Chloride, and Latex Paint Surfaces*, American Chemical Society.
- Singer, B.C., Coleman, B.K., Destailats, H., Hodgson, A.T., Lunden, M.M., Weschler, C.J. & Nazaroff, W.W. 2006, "Indoor secondary pollutants from cleaning product and air freshener use in the presence of ozone", *Atmospheric Environment*, vol. 40, no. 35, pp. 6696-6710.

- Sosiaali- ja terveysministeriö. 2014, HTP-arvot 2014. Haitallisiksi tunnetut pitoisuudet. Helsinki, Sosiaali- ja terveysministeriön julkaisuja 2014:2.
- Thanomsub, B., Anupunpisit, V., Chanphetch, S., Watcharachaipong, T., Poonkhum, R. & Srisukonth, C. 2002, "Effects of ozone treatment on cell growth and ultrastructural changes in bacteria", *The Journal of general and applied microbiology*, vol. 48, no. 4, pp. 193-199.
- Uhde, E. & Salthammer, T. 2007, "Impact of reaction products from building materials and furnishings on indoor air quality - A review of recent advances in indoor chemistry", *Atmospheric Environment*, vol. 41, pp. 3111-3128.
- Wainman, T., Zhang, J., Weschler, C.J. & Liou, P.J. 2000, "Ozone and Limonene in Indoor Air: A Source of Submicron Particle Exposure", *Environmental Health Perspectives*, vol. 108, no. 12, pp. 1139-1145.
- Wang, C. & Waring, M.S. 2014, "Secondary organic aerosol formation initiated from reactions between ozone and surface-sorbed squalene", *Atmospheric Environment*, vol. 84, pp. 222-229.
- Waring, M.S. & Siegel, J.A. 2013, "Indoor secondary organic aerosol formation initiated from reactions between ozone and surface-sorbed d-limonene", *Environmental science & technology*, vol. 47, no. 12, pp. 6341-6348.
- Weisel, C., Weschler, C.J., Mohan, K., Vallarino, J. & Spengler, J.D. 2013, "Ozone and ozone byproducts in the cabins of commercial aircraft", *Environmental science & technology*, vol. 47, no. 9, pp. 4711-4717.
- Weschler, C.J. 2006, "Ozone's impact on public health: contributions from indoor exposures to ozone and products of ozone-initiated chemistry", *Environmental health perspectives*, pp. 1489-1496.
- Weschler, C.J. 2000, "Ozone in Indoor Environments: Concentration and Chemistry", *Indoor air*, vol. 10, no. 4, pp. 269-288.
- Weschler, C.J. & Shields, H.C. 1999, "Indoor ozone/terpene reactions as a source of indoor particles" *Atmospheric Environment*, vol. 33, no. 15, pp. 2301-2312.
- Weschler, C.J. & Shields, H.C. 1997, "Potential reactions among indoor pollutants", *Atmospheric Environment*, vol. 31, no. 21, pp. 3487-3495.
- Weschler, C.J. & Shields, H.C. 1996, "Production of the Hydroxyl Radical in Indoor Air", *Environmental science & technology*, vol. 30, no. 11, pp. 3250-3258.
- Weschler, C.J., Hodgson, A.T. & Wooley, J.D. 1992, "Indoor chemistry: ozone, volatile organic compounds, and carpets", *Environmental science & technology*, vol. 26, no. 12, pp. 2371-2377.
- Weschler, C.J., Shields, H.C. & Naik, D.V. 1989, "Indoor Ozone Exposures", *JAPCA*, vol. 39, no. 12, pp. 1562-1568.
- Wolkoff, P., Clausen, P.A., Wilkins, C.K., Hougaard, K.S. & Nielsen, G.D. 1999, "Formation of strong airway irritants in a model mixture of (+)- $\alpha$ -pinene/ozone", *Atmospheric Environment*, vol. 33, no. 5, pp. 693-698.
- Wolkoff, P., Clausen, P.A., Wilkins, C.K. & Nielsen, G.D. 2000, "Formation of Strong Airway Irritants in Terpene/Ozone Mixtures", *Indoor air*, vol. 10, no. 2, pp. 82-91.
- World Health Organization (WHO). 2005, *Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide*, Air Quality Guidelines, Global Update 2005.
- Zeng, G., Holladay, S., Langlois, D., Zhang, Y. & Liu, Y. 2013, "Kinetics of heterogeneous reaction of ozone with linoleic acid and its dependence on temperature, physical state, RH, and ozone concentration", *The Journal of Physical Chemistry A*, vol. 117, no. 9, pp. 1963-1974.
- Zotti, M., Porro, P., Vizzini, A. & Mariotti, M.G. 2008 "Inactivation of *Aspergillus* spp. by Ozone Treatment" *Science and Engineering*, vol. 30, pp. 423-430.

## Liite 1.

Taulukko 2. Yhteenveto tutkimuksista, joissa tutkittu otsonoinnin tehokkuutta mikrobeihin.

Liite 1, sivu 1/6

Tutkimusasettelu	Menetelmät ja käytetty organismi	Otsonipitoisuus	Tulokset	Päätelmät	Lähdejulkaisu
Tutkimuksen tarkoituksena oli tarkastella yhden itiötä muodostavan ei-patogeenisen bakteerin, <i>Bacillus subtilis</i> , kestävyyttä otsonille.	Otsonointi toteutettiin erillisessä testikammiossa. Alustoina tutkimuksessa käytettiin viittä eri materiaalia; lasi, verho, paperi, vinyyllattiamateriaali, kovapuu.	500–5000 ppm/ ≤ 4 h, RH% 70–95	Tutkimustulokset osoittavat, että otsonointi voi olla erittäin tehokas <i>B. subtilis</i> sp. itiöitä vastaan. 1500 ppm pitoisuus, 4 h vähensi 3 log 90 RH% lasipinnalla olleista itiöistä. Korkeammilla pitoisuuksilla ei havaittu tilastollisesti merkittäviä muutoksia inaktivoitumisessa. Korkeampi suhteellinen kosteus lisäsi inaktivoitumisen tehokkuutta. Rakennusmateriaaleissa kasvaneille <i>B. subtilis</i> organismeille otsonointi ei ollut läheskään yhtä tehokas, 1 log vähentyminen.		Aydogan & Gurof. 2006
Tutkimuksessa oli tarkoitus selvittää otsonointilaitteen tehokkuutta.	Tutkimuksessa kuivatuille levyille siirrettiin tietty määrä eri mikrobilajeja. Levyjä altistettiin neljä tuntia. Otsonoinnin toimivuutta testattiin kahdessa eri ympäristössä, erillisessä kaapissa ja sairaalahuoneessa.	Kaapissa: 0,3–0,9 ppm, 4 h Sairalahuoneessa: 0,001 ppm, 4 tuntia	Kaapissa ollut otsonipitoisuus hidasti tehokkaasti bakteerilajien kasvua ja <i>Aspergillus fumigatus</i> kasvu. <i>Candida albicans</i> oli lähes resistentti tutkimuksessa käytetyille otsonipitoisuuksille. Huoneessa olleilla pitoisuuksilla ei havaittu vaikutusta mikrobeihin ja bakteereihin.	Tutkijoiden mukaan, otsonointi toimii hyvin pienessä tilassa suhteellisen tehokkaasti. Huoneessa otsonointi ei kuitenkaan toiminut alhaisen otsonipitoisuuden johdosta. Tutkimuksen mukaan 1 ppm pitoisuus vähentää useiden lajien kasvua 95 %.	Dyas ym. 1983
Otsonoinnin vaikutus itiötä muodostaviin ja vegetatiivisiin sienilajeihin sekä itiötä muodostaviin bakteereihin.	Tutkimus oli kaksiosainen, ensimmäisessä vaiheessa tutkittiin otsonin tehokkuutta lasipinnalla oleviin organismeihin 30 RH% ja 90 RH% olosuhteissa. Toisessa vaiheessa organismit olivat rakennusmateriaaleissa. Testit tehtiin <i>Rhodoturula glabrum</i> , <i>Penicillium chrysogenum</i> , <i>Penicillium glabrum</i> ja <i>Streptomyces</i> sp. lajeille.	0,5–9,9 ppm 90 RH% ja 2,5–9,9 ppm 30 RH%, kammiossa	Hiivasolut inaktivoituivat 5,5 ppm 90 RH% 3log, 30 RH% inaktivoituminen oli vähäistä. <i>Penicillium chrysogenum</i> ja <i>P. glabrum</i> homeitiöiden inaktivoituminen riippui suurelta osin ilman suhteellisesta kosteudesta. 3-log väheneminen havaittiin 90 RH%:ssa 6,2 ppm, 30 RH% 9,8 ppm. Rakennusmateriaaleissa organismit eivät inaktivoituneet edes 9 ppm pitoisuuksilla 90 RH%.	Tulosten perusteella 6–10 ppm otsoni pitoisuuksilla ei saavuteta pintamateriaalien kontaminaation poistamista. Tällaisten pitoisuuksien saavuttaminen kontaminoituneen pinnan lähellä on haastavaa. Otsonoinnin todettiin toimivan tehokkaammin, kun suhteellinen kosteus on korkeampi.	Foarde ym. 1997

Taulukko 2. Yhteenvedo tutkimuksista, joissa tutkittu otsonoinnin tehokkuutta mikrobeihin.

Liite 1, sivu 2/6

Tutkimusasettelu	Menetelmät ja käytetty organismi	Otsonipitoisuus	Tulokset	Päätelmät	Lähdejulkaisu
Tutkimuksen tarkoituksena oli kehittää uusi jatkuvatoiminen desinfiointijärjestelmä, joka perustuu korkeaan otsonipitoisuuteen. Tutkimuksessa määritetään desinfiointijärjestelmän antiseptista vaikutusta bakteeri- ja sienibioaerosoleihin eri otsonipitoisuuksilla, eri kosteusolosuhteissa ja käsittelykertojen määrillä.	Otsoni tuotettiin tutkimuksessa DBD -plasmareaktorilla. Tutkimukseen valittiin kaksi bakteerilajia sekä kaksi sienilajia. Otsonoinnin vaikutusta lajeihin tutkittiin sekä kammio- että myös kenttämittauksin.	Kammio: 0–175 ppm, 1.5s, 5 s ja 10 s, 30 RH%, 50 RH% ja 70 RH% Kenttämittaukset: 150 ppm, 2 h, 50–55 RH%	Tutkimus osoitti, että korkeilla otsonipitoisuuksilla on hyvä antiseptinen vaikutus kolmelle tutkimuksessa käytetylle bioaerosolilajille; E. coli, C.famata ja P.citrium itiölle. B.subtilis itiöille otsonointi ei ollut niin tehokas. Tutkimuksessa pystyttiin osoittamaan myös, että otsonointi on antiseptisempi solutyypisille bioaerosoleille kuin itiöitä muodostaville bioaerosoleille.	Tulosten perusteella voidaan väittää otsonoinnin olevan tehokas keino bioaerosolien desinfiointiin. Otsonointia voidaankin pitää mahdollisena tapana kontrolloida sisäilman bioaerosoleja.	Huang ym. 2012
Tutkimuksen tarkoituksena oli tarkastella, kuinka hyvin (Viroforce 1000) -otsonointilaite pystyy inaktivoimaan 13 erilaista sienilajia	Näytteet olivat joko vesi- tai kuivafilemeillä ja niitä otsonoitiin kerran tai kahdesti (35 ppm, 20 min), jonka jälkeen mitattiin sienien elävyyttä. Otsonointi suoritettiin testihuoneessa, joka kuvasi tyypillistä toimistoympäristöä.	35 ppm, 20 min kerran tai kahdesti	Otsonointi vähensi sienilajien (13 eri lajia) elävyyttä 3 log10 cfu. Eroa otsonoinnin tehokkuudesta eri kasvatusalustojen (kuiva ja vesifilmi) välillä ei todettu.	Tutkijoiden päätelmä oli, että otsonointi voi olla toimiva työkalu homerakennusten korjauksessa.	Hudson & Sharma 2009
Tutkimuksen tarkoituksena oli kehittää tehokas ja kuljetettava siivoustyökalu, joka on suunnattu kostuneiden ja homevauriossa vaurioituneiden huonekalujen siivoamiseen ja kontaminaation poistamiseksi	Siivoustyökalun tutkimukseen kehitti LK-Kiinteistöpalvelut Oy. Siivoustyökalu koostui ilmatiiviistä tilasta, jossa oli tehokas otsonaattori. Tutkimukseen otettiin huonekaluja 46 kosteusvauriokohteesta (asunnot, koulut, päiväkodit, julkiset rakennukset). Näytepareja, ennen ja jälkeen otsonoinnin, otettiin yhteensä 73 kappaletta. Ilmatiiviissä tilassa otsonipitoisuus oli > 30 ppm. Näytteitä otsonoitiin 5–8 tuntia	> 30 ppm, 5–8 tuntia, ilmatiiviissä tilassa	Elävien mikrobien määrä näytteissä pieneni otsonoinnin johdosta. Alku- ja loppukonsentraatioero oli tilastollisesti merkitsevä. qPCR-menetelmällä mitattuna itiöiden määrä väheni käsittelyn jälkeen, mutta ei tilastollisesti merkitsevästi. Höyrykäsittely yhdessä otsonin kanssa on tehokkaampi tuhoamaan mikrobeja kuin pelkkä otsonointi	Tutkijoiden mukaan tehokas otsonointi vähentää eläviä mikrobeja huonekalusteiden pölystä. Menetelmä ei kuitenkaan poista kaikkea sienikasvustoa pölystä, joissain tapauksissa siivouksen menetelmä saattaa jopa kasvattaa mikrobikonsentraatiota. Menetelmä saattaa myös tuhota käsittelyssä huonekalusteita.	Huttunen ym. 2010



Taulukko 2. Yhteenveto tutkimuksista, joissa tutkittu otsonoinnin tehokkuutta mikrobeihin.

Liite 1, sivu 3/6

Tutkimusasettelu	Menetelmät ja käytetty organismi	Otsonipitoisuus	Tulokset	Päätelmät	Lähdejulkaisu
Selvitys, kuinka tehokas otsonointi on sieni- ja bakteerioorganismien kasvun hidastajana.	Tutkimuksessa tutkittiin otsonointimenetelmän tehoa hidastaa <i>Aspergillus niger</i> -sienilajin, <i>Pseudomonas aeruginosa</i> - ja <i>Staphylococcus aureus</i> -bakteerilajien ja yhden tuntemattoman bakteerin kasvua. Kasvatusalustoina käytettiin agar -kasvatusmaljoja sekä ruostumattomasta teräksestä tehtyjä alustoja. Organismit altistettiin otsonille erillisessä kammiossa.	1. 0,1 ppm, 20 min–päiviä 2. 0,3–1,2 ppm, 90 min–180 min	Tutkimuksessa todettiin, että otsonikäsitely ei tuhoa merkittävästi <i>Aspergillus niger</i> sienilajia 0.1–1,2 ppm pitoisuuksissa. <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Staphylococcus aureus</i> lajeille otsoni oli tehokkaampi (0,3 ppm, 60–180 min, 15–95RH%, eloonjääneet 0–98%) (0,6 ppm, 60–180 min, 15–95RH%, eloonjääneet 0–71%).	Tutkimus osoitti, että otsonipitoisuutta, altistusaikaa ja suhteellista kosteutta kasvattaessa otsonointiteho alkoi kasvaa. Tulokset osoittivat sen, että suhteellisella kosteudella on hyvin suuri merkitys otsonoinnin tehoon. Tulosten mukaan pienempi pitoisuus ja korkea suhteellinen kosteus voi olla tehokkaampi keino tuhota mikro-organismeja kuin korkea otsonipitoisuus ja matala suhteellinen kosteus. Tutkimuksessa ei käytetty rakennus- ja sisustusmateriaaleja kasvatusalustoina.	Kammer 2005
Työn tarkoituksena oli määrittää millaisessa pitoisuudessa, altistuaajassa ja syklillä otsonilla on desinfiiva vaikutus mikrobiologiseen kasvuun.		9 ppm ja >11 ppm	Otsonipitoisuuden ylittäessä 9 ppm, se heikentää mikrobiologista kasvua. Yli 11 ppm kasvu loppuu.		Khurana 2003
Tutkimuksen tarkoituksena oli tutkia, kuinka hyvin otsonointi yhdessä UV -säteilyn kanssa tuhoaa eri mikrobilajeja.	Tutkimuksessa käytettiin useita lajeja ja eri konsentraatioita. Lajit: <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i> , <i>MRSA</i> ja <i>Candida albicans</i> . Lajeja altistettiin 12 tuntia otsonille ja kostuttajalle, UV -säteilylle ja kostuttajalle ja pelkästään kostuttajalle.	0,2 ppm, 12 tuntia	Otsonoinnilla saatiin tuhattua osa lasialustoilla kasvaneista mikro-organismeista (32–88 %).	Otsonointia voidaan suositella käytettäväksi mikro-organismien poistoon suljetussa tilassa tarkasti kohdennettuna rakennus- ja sisustusmateriaaleille.	Klanova & Lajcikova 2006
Tutkimuksen tarkoituksena oli tutkia otsonin vaikutusta kolmeen mikrobilajiin.	Bakteriofagi $\lambda$ , <i>Escherichia coli</i> ja <i>Candida albicans</i> lajeja altistettiin otsonikaasulla.	600 ppm	Bakteriofagi $\lambda$ inaktivoitui täysin 10 minuutissa, kun taas <i>Escherichia coli</i> ja <i>Candida albicans</i> inaktivoituivat vain 40 min $10^4$ ja $10^5$ . Sekoitetussa suspensiossa 5 min Bakteriofagi $\lambda$ tuhoutui 100 %, <i>E.coli</i> pysyi muuttumattomana.	Mikrobien väliset eroavaisuudet johtuvat mahdollisesti mikrobien erilaisesta membraanirakenteesta ja läpäisevyydestä. Tutkimuksen perusteella otsoni reagoi nopeammin proteiinien kuin rasvalipidien kanssa.	Komanapalli & Lau 1998

Taulukko 2. Yhteenveto tutkimuksista, joissa tutkittu otsonoinnin tehokkuutta mikrobeihin.

Liite 1, sivu 4/6

Tutkimusasettelu	Menetelmät ja käytetty organismi	Otsonipitoisuus	Tulokset	Päätelmät	Lähdejulkaisu
Tarkoituksena oli tutkia pystytäänkö otsonin avulla tehokkaasti tuhoamaan tyypillisiä sienilajeja.	Tutkimuksessa käytettiin suspensiota, (Cladosporium spp., Stachybotrys spp., ja Aspergillus niger conidia), joka viljeltiin agarmaljoille.	5,0–12,8 ppm, 4h	Kaikki kolme lajia tuhoutuivat tilastollisesti merkitsevästi. Yksikään laji ei tuhoutunut kokonaan, jokaisesta löytyi elinkykyisiä sieniä, jopa korkeimman otsonialtistuksen maljoilta.	Tutkimuksen perusteella sienien tappamiseksi kohteessa tulee olla lisäksi muita keinoja, jotka tuhoavat sieniä tai altistusajan tulee olla huomattavasti pidempi.	Korzun ym. 2008
Tutkimuksessa testattiin otsonoinnin tappavaa vaikutusta Escherichia coli- ja Staphylococcus aureus-bakteereja vastaan.	Kontaminoidut petrimaljat altistettiin kammiossa 10–480 sekunnin ajan 300–1500 ppm otsonipitoisuudelle.	300–1500 ppm, 10–480 s	Tutkimuksen mukaan 99,99 % molemmat lajit saatiin tapettua.	Tutkijoiden mukaan otsonointi on tehokas menetelmä eri mikrobilajien poistoon ilmasta.	Kowalski ym. 1998
Tutkimuksen tarkoituksena oli altistaa otsonoinnille eri mikro-organismeja, jotka kasvavat erilaisilla materiaaleilla, ja selvittää organismeissa tapahtuvat vaikutukset.	Kasvualustana käytettiin kahta rakennusmateriaalia: kipsilevyä ja lasinpalasta. Tutkimuksessa oli mukana kaksi sieniorganismia sekä kaksi bakteeriorganismia, joita tutkittiin kahdessa eri suhteellisessa kosteudessa.	0, 100, 500, 1000 ppm, 1.5 h, 6 h, 24 h, 20–45 RH% tai 80–95 RH%	Tutkimuksessa pystyttiin osoittamaan, että otsonointi on tehokkaampi lasipinnalla kuin kipsilevyssä. Myös suhteellisella kosteudella on merkitystä organismien tuhoamiseen, korkeampi suhteellinen kosteus on tehokkaampi.	Tutkimuksesta saatujen tulosten perusteella nähdään, että korkeallakaan otsonipitoisuudella ei saada täydellisesti poistettua kaikkia mikro-organismeja. 1000 ppm pitoisuutta on hyvin vaikea saavuttaa, ja lisäksi noissa pitoisuuksissa tapahtuu ei-haluttuja reaktioita muiden materiaalien kanssa. Tutkijoiden mukaan, vaikka tuollainen pitoisuus kentällä saataisiin luotua, niin se ei riittäisi merkitsevästi vähentämään mikro-organismeja.	Menetrez ym. 2009

Taulukko 2. Yhteenveto tutkimuksista, joissa tutkittu otsonoinnin tehokkuutta mikrobeihin.

Liite 1, sivu 5/6

Tutkimusasettelu	Menetelmät ja käytetty organismi	Otsonipitoisuus	Tulokset	Päätelmät	Lähdejulkaisu
Tarkasteltiin useita menetelmiä ja tuotteita homevaurioituneiden rakennusmateriaalien puhdistamiseen. Otsonointi oli yksi menetelmistä.	Tutkimuksessa käytettiin kahta rakennusmateriaalia; kipsilevyä ja mäntypuuta, joita kasteltiin 12 tuntia steriilissä vedessä ja kontaminoitiin <i>Stachybotrys</i> ja <i>Aspergillus versicolor</i> -organismeilla. Kontaminoituja materiaaleja pidettiin 6 viikon ajan huoneenlämmössä, jossa suhteellinen kosteus oli 95 %. Tutkimusasettelussa kontaminoituja materiaaleja käsiteltiin otsonilla 30 minuuttia, jonka jälkeen näytteet analysoitiin ja laskettiin tulokset. Tämän jälkeen näytteiden annettiin kuivaa huoneenlämmössä, suhteellinen kosteus 40 %, kuusi viikkoa ja kostutettiin uudestaan 6 viikkoa. Tämän jälkeen näytteet analysoitiin uudestaan.	15 ppm, 30 min,	Otsonointi vähensi tilastollisesti merkitsevästi osan toksiineista, mutta osaan toksiineista ei ollut vaikutusta. Kuivauksen ja uudelleen kostuttamisen jälkeen toksiinien tuotto kasvoi samaan, mitä se oli ennen käsittelyä.	Tutkimuksen mukaan otsonointimenetelmä ei pysty täydellisesti poistamaan homeita ja mykotoksiineja rakennusmateriaaleista. Yleisesti käsittely oli tehokkaampaa <i>S. chartarum</i> organismille kuin <i>Aspergillus versicolor</i> organismeille.	Peitzsch ym. 2012
Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, kuinka hyvin otsonilaite (Treated Air Systems), jossa on katalyyttinen konvektori sekä kostuttaja, pystyy tuhoamaan 15 erilaista terveydelle merkittävää sienilajia.	Tutkimuksessa käytetyt lajit kuivattiin muovialustalle ja pehmeille pinnoille (kangas, puuvilla, suodatinpaperi) ( $6 + 10^8$ cfu/mL). Näytteitä otsonoitiin laboratoriotesteissä ja simuloituissa kenttämittauksissa 25 ppm pitoisuudella 20 minuutin ajan. Tutkimus toteutettiin sekä laboratoriossa että simuloituissa olosuhteissa (toimistohuone).	25 ppm, 20 min, 90 RH%	Tutkimuksessa käytetyllä otsonipitoisuudella bakteeripesäkkeet vähenivät 3 log <sub>10</sub> . Tulos oli sama laboratoriotesteissä ja simuloituissa kenttäolosuhteissa. Tutkimustulokset olivat yhtenevät pehmeiden pintojen (kankaat, puuvilla, suodatinpaperi) ja muovipintaisten kasvualustojen välillä.	Otsonointi voi olla yksi tapa poistaa kontaminaatioita erilaisista tiloista. Tutkijoiden mukaan otsonoinnilla pystytään tuhoamaan osa bakteereista rakennus- ja sisustusmateriaaleista (verhoista, huonekaluista ja seinäpinnoilta).	Sharma & Hudson 2008

Taulukko 2. Yhteenveto tutkimuksista, joissa tutkittu otsonoinnin tehokkuutta mikrobeihin.

Liite 1, sivu 6/6

Tutkimusasettelu	Menetelmät ja käytetty organismi	Otsonipitoisuus	Tulokset	Päätelmät	Lähdejulkaisu
Gram-positiivisten ja gram-negatiivisten bakteeriviljelmien elävyyttä ja solurakennetta tarkasteltiin ultramikroskooppitasolla, kun viljelmiä oli altistettu otsonille.	Tutkimuksessa käytettiin; E. coli, Salmonella sp., Bacillus subtilis Ja Staphylococcus aureus viljelmiä. Viljelmiä altistettiin otsonille eri aikoja.	0,167 mg/min/L, 0–150 min	Tulosten perusteella bakteerikasvu viljelmissä väheni käsittelyajan mukaan, 30 min käsittelyn jälkeen kasvua ei ollut havaittavissa. Korkeimmissa bakteeripitoisuuksissa otsonikäsittely ei pisimmilläänkään ollut tehokas. Otsonikäsittely tuhosi ja aiheutti epämuodostumia bakteerien solurakenteissa niin gram-positiivisissa, kuin gram-negatiivisissa bakteereissa.	Otsonikäsittelyllä voidaan tuhota bakteeriviljelmiä joiden pitoisuus on alle 10 <sup>5</sup> cfu/ml, sitä suuremmilla pitoisuuksilla otsonoinnilla ei saada tuhottua viljelmiä tarpeeksi tehokkaasti.	Thanomsub ym. 2002
Tutkimuksessa kahta Aspergillus-sienilajia altistettiin otsonointikäsittelylle, tarkoituksena saada lajien kasvua hidastettua tai pysäytettyä.	Käytetyt sienilajit olivat A. flavus ja A. niger. Lajit viljeltiin kolmeen eri erään. 1. erää kasvatettiin kolme päivää ja käsiteltiin otsonilla kaksi kertaa (1. vaihe 3 h käsittely ja 3 pvä kasvatus, 2.vaihe 1 h käsittely ja 3 pvä kasvatus, 3.vaihe lopullisten tulosten lukeminen). 2. erän ensimmäinen käsittely tehtiin 1.erän toisen käsittelyn kanssa samaan aikaan jne. Tarkoituksena oli tarkastella, onko sienilajien iällä merkitystä otsonointikäsittelyn tehokkuuteen ja pystytäänkö kaksivaiheisella käsittelyllä parempiin ja tehokkaampiin tuloksiin.		Tutkimuksen tulokset osoittivat otsonikäsittelyn vaikuttaneen sienilajeihin siten, että ne eivät pystyneet tuottamaan uusia pesäkkeitä. Kahden sienilajin välillä huomattiin eroa otsonikäsittelyn jälkeen, A. flavus sienilaji ei ollut yhtä herkkä otsonille kuin A. niger. Eri-ikäisten organismien välillä ei ollut merkittävää eroa.	Tutkijat pitävät otsonointia edullisena ja suhteellisen tehokkaana menetelmänä sienilajien kasvun hidastamiseen.	Zotti ym. 2008

## Liite 2.

Taulukko 3. Yhteenveto tutkimuksista, joissa tutkittu otsonoinnin vaikutusta kemiallisiin epäpuhtauksiin, rakennus- ja sisustusmateriaaleihin.

Liite 2, sivu 1/6

Tutkimusasettelu	Käytetty organismi	Pitoisuus / altistus aika	Tulokset ja päätelmät	Lähdejulkaisu
Otsonin ja rakennusmateriaalien väliset reaktiot, sekundääriepäpuhtauksien ja hiukkasmateriaalien syntyminen.	Rakennusmateriaalit sisälsivät muun muassa; polystyreenia, luonnonkumia, setripuuta, hopeakuusta ja d-limoneenia.	0,1 ppm / 3–4 h, RH% 30–40	Tulokset osoittivat, että otsonointi lisää huomattavasti pienhiukkasten pitoisuutta, varsinkin materiaaleissa, jotka sisältävät $\alpha$ -pineeniä tai d-limoneenia. Myös lattiovahan ja otsonin välisessä reaktiossa muodostuu pienhiukkasia. Tutkijat totesivat, että otsonointi muuttaa sisäilmaan vaikuttavien tekijöiden kemialla, muodostuu uusia sekundääriepäpuhtauksia.	Aoki & Tanabe 2007
Katsauksessa kerrotaan haihtuvien orgaanisten yhdisteiden hajoamisesta, jossa yhtenä reaktiona on otsonin ja VOC yhdisteiden väliset reaktiot.			Otsoni reagoi haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kanssa siten, että se hajottaa hiili-hiili -sidokset. Tällaisia yhdisteitä ovat muun muassa, karbonyylit, alkeenit ( $\alpha$ -pineeni), $\alpha$ -hydroksiketoni, $\alpha$ -hydroperoksi, ja aromaattiset yhdisteet.	Atkinson & Arey 2003 (review)
Katsauksessa selvitettiin otsonin ja sisäilman epäpuhtauksien välisiä reaktioita.			Tutkijat totesivat, että otsonin kykyyn hajottaa epäpuhtauksia vaikuttaa suurelta osin yhdisteiden kemia sekä otsonipitoisuus. Tutkijoiden mukaan otsonipitoisuuden kasvaessa otsonin kanssa reagoivan yhdisteen puoliintumisaika pienenee. Tehokkaimmin otsoni reagoi alkeenien, aromaattisten yhdisteiden kanssa, johtuen hiili-hiilidoksista. Muiden yhdisteiden kanssa reaktiota ei tarkalleen tiedetä, koska reaktiot ovat hyvin hitaita, jopa vuosia kestäviä.	Atkinson ym. 1984 (review)
Katsauksessa arvioitiin otsonoinnin tehokkuutta sekä otsonin terveysvaikutuksia.			Otsonin tehokkaasta vaikutuksesta poistaa ilman epäpuhtauksia ei ole riittävä näyttöä, varsinkaan matalilla pitoisuuksilla. Tieteelliset tutkimukset ovat pikemminkin osoittaneet, että otsoni ei poista tehokkaasti suurinta osaa sisäilman epäpuhtauksista. Otsoni voi kuitenkin toimia siten, että se peittää alleen "haisevia" epäpuhtauksia. Otsonin terveysvaikutuksista tiedetään, että otsoni aiheuttaa varsinkin hengitystieoireita, ärsytys- ja yleisoireita.	Boeniger 1995 (review)

Taulukko 3. Yhteenveto tutkimuksista, joissa tutkittu otsonoinnin vaikutusta kemiallisiin epäpuhtauksiin, rakennus- ja sisustusmateriaaleihin.

Liite 2, sivu 2/6

Tutkimusasettelu	Käytetty organismi	Pitoisuus / altistus aika	Tulokset ja päätelmät	Lähdejulkaisu
Raportin tärkeimpänä tarkoituksena oli keskittyä otsonialtistuksen terveysriskeihin ja otsonin kykyyn poistaa sisäilmassa olevia orgaanisia epäpuhtauksia.			Katsauksessa todettiin, että otsoni ei matalilla pitoisuuksilla ole tarpeeksi riittävä poistamaan sisäilman epäpuhtauksia. Lisäksi otsoni saattaa peittää hajuhaittoja tuottaen reaktiossa epäpuhtauksien kanssa vähemmän haisevia, mutta terveydelle vaarallisempia sekundääriepäpuhtauksia.	Boeniger 1995 (review)
Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää kotitaloudessa käytössä olevien tuotteiden ja otsonin välisiä reaktioita erillisessä kammiossa, sekä mitä sekundääriepäpuhtauksia reaktioissa syntyy.	Kolme kotitaloudessa yleisesti käytössä olevaa ainetta. Männyn tuoksuinen öljypohjainen puhdistusaine, appelsiini-öljypohjainen rasvanpoistoaine ja tuoksuva ilmanraikastin.	30–250 ppb, 40–60 RH%	Tutkimuksessa havaittiin otsonialtistuksen aikana, että ultrapienien hiukkasten määrä kasvoi räjähdysnomaisesti. Formaldehydin ja muiden aldehydien pitoisuus kasvoi merkittävästi, kuten myös hydroksyyli-radikaalien määrä.	Destailats ym. 2006
Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää mitä primääri- ja sekundääriyhdisteitä syntyy haihtuvien orgaanisten yhdisteiden ja otsonin välisissä reaktioissa. Tutkimuksessa käytettiin tyypillisiä sisäilman VOC-yhdisteitä, joita altistettiin otsonille erillisessä kammiossa. Siten että alussa oli 23 yhdistettä, seuraavaksi seoksessa oli 21 yhdistettä (pois d-limoneeni ja $\alpha$ -pineeni), lopuksi d-limoneenia ja $\alpha$ -pineenia altistettiin otsonille.	23 haihtuvaa orgaanista yhdistettä	40 ppb	Tutkimus osoitti, että tutkimuksessa käytetyllä pitoisuudella otsoni pystyy käynnistämään reaktioita kemiallisten yhdisteiden kanssa, joissa muodostuu hyvin reaktiivisia yhdisteitä (kuten happiradikaaleja) sekä aldehydejä, karboksyylihappoja ja pienihiukkasia.	Fan 2003
Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, mitä kemiallisia yhdisteitä lattiamateriaaleista irtoaa, kun niitä altistetaan otsonille tai erilaisille UV-valolähteille.	Tutkimuksessa käytettiin kahta erilaista puulattiamateriaalia: vähän formaldehydiä emittoivaa lattiamateriaalia sekä luonnonpuuta. Lattiamateriaaleja altistettiin kammiossa, jonne päästettiin otsonikaasua tai sitä lämmitettiin jollakin UV-valonlähteellä.	750 ppb	Otsoni reagoi lattiamateriaalin kanssa, formaldehydi ja asetraldehydi pitoisuudet kasvoivat.	Kagi ym. 2008

Taulukko 3. Yhteenvedo tutkimuksista, joissa tutkittu otsonoinnin vaikutusta kemiallisiin epäpuhtauksiin, rakennus- ja sisustusmateriaaleihin.

Liite 2, sivu 3/6

Tutkimusasettelu	Käytetty organismi	Pitoisuus / altistus aika	Tulokset ja päätelmät	Lähdejulkaisu
Tutkimuksessa arvioitiin otsonin laskeutumisenopeutta (depositio) erilaisiin rakennusmateriaaleihin.	Tutkittiin kahdeksaa rakennusmateriaalia: kalsiumsilikaattilevy, vihreä kalsiumsilikaattilevy, mineraalikuitu-välikatko, vihreä mineraalikuitu-välikatko, kipsilevy, vihreä kipsilevy, puulattia ja vihreä puulattia. Materiaaleja tutkittiin teräskammiossa, johon johdettiin otsonia.	75 ppb ja 8 h	Suurin depositionopeus havaittiin kalsiumsilikaattilevyllä ja pienin puulattiamateriaalilla. Pehmeillä ja huokoisilla materiaaleilla depositionopeus oli suurempi kuin sileillä materiaaleilla. Materiaalin pinta-alalla oli suuri merkitys otsonin poistumisessa.	Lin ym. 2015
Tutkimuksessa selvitettiin männynytuoksuista ilmanraikastimesta syntyvien yhdisteiden ja otsonin välisiä reaktioita.	Männynytuoksuinen ilmanraikastin; (mm. limoneeni, a-pineeni, b-pineeni, bentsyyli alkoholi, bentsaldehydi).	76 ppb/h ja 24 h	Otsonin ja haihtuvien orgaanisten yhdisteiden välisissä reaktioissa syntyi uusia karbonyyliyhdisteitä. Otsonoinnin aikana todettiin myös ultrapienien hiukkasten ja pienhiukkasten muuttuminen ja muodostuminen. Pienhiukkasten muodostuminen on osa VOC:n ja otsonin välistä reaktiota.	Liu 2004
Väitöskirjatyössä esitetään laboratoriossa tehtyjen tutkimusten ja matemaattisten mallien tuloksia otsonin ja pintojen välisistä reaktioista.	Tutkimuksessa lattiamatto- ja putkimateriaaleja altistettiin otsonille.	100 ppb, 20 ja 40 min	Tutkimukset osoittivat, että otsoni irrottaa lattiamatosta aldehydejä; n-nonanaali, ja muita pienempiä aldehydejä. Aldehydit ja varsinkin n-nonanaalit hajoavat hitaasti ja ovat lisäksi helposti haistettavissa. Yhdisteet voivatkin "haista" otsonikäsitelyn jälkeen pitkään, jopa vuosia.	Morrison 1999
Tutkimuksessa pyrittiin selvittämään rakennusmateriaalien kykyä vähentää ilmassa olevaa otsonipitoisuutta. Tutkimuksessa käytettiin 14 uutta ja käyttämätöntä rakennusmateriaalia.	Alkyylimaalilla maalattu polyesteri, linoleum, muovimatto, neljä mattoa (kumi, tekstiili, pvc ja bitumi), polystyreeni kattolevy, maalamaton kipsilevy, kaksi tapettia, ja kolme mäntypuupaneelia.	100–232 ppb, 48 tuntia, 45–55 RH%	Rakennusmateriaalit vähensivät ilman otsonipitoisuutta huomattavasti (mäntypaneelit 80 %, kipsilevy 70 %, matot 50–70 %, lattiamateriaalit 25–40 %, ja maalit 8 %). Tutkimuksessa todettiin myös, että otsonipitoisuuden vähentyminen on yhteydessä sekundääriemissioiden ja useiden aldehydipitoisuuksien kasvuun, pääasiassa formaldehydin, asetialdehydin, bentsaldehydin ja C <sub>5</sub> -C <sub>10</sub> -aldehydien.	Nicolas ym. 2006

Taulukko 3. Yhteenvedo tutkimuksista, joissa tutkittu otsonoinnin vaikutusta kemiallisiin epäpuhtauksiin, rakennus- ja sisustusmateriaaleihin.

Liite 2, sivu 4/6

Tutkimusasettelu	Käytetty organismi	Pitoisuus / altistus aika	Tulokset ja päätelmät	Lähdejulkaisu
Tutkimuksessa oli tarkoitus testata eri rakennusmateriaaleja erittäin korkeissa otsonipitoisuuksissa ja selvittää, mitä hiiliyhdisteitä materiaalit emittoivat.	24 eri rakennusmateriaalia altistettiin 1000 ppm otsonipitoisuudelle erillisessä kammiossa. Tutkimukseen oli valittu 15 karbonyyliä ja lisäksi mitattiin kokonais-BOBP- massa. Materiaaleja altistettiin 16 tuntia ja niiden annettiin tasaantua 20 tuntia.	1000 ppm, 16 h	Lattia- ja seinämateriaalien BOBP vaihteli 1–20 mg/m <sup>2</sup> , suurin osa karbonyyleista oli pieniä (C <sub>1</sub> –C <sub>4</sub> ). Puupohjaiset materiaalit; BOBP 20–100 mg/m <sup>2</sup> ja raskaampia karbonyyleja (C <sub>5</sub> –C <sub>9</sub> ). Suurimmat BOBP massapitoisuudet emittoituivat paperista, väliseinistä, MDF ja huonekaluista.	Poppendieck ym. 2007
Katsauksessa käydään läpi rakennus- ja sisustusmateriaalien emissioiden vaikutusta sisäympäristöön.			Tutkimuksissa on todettu, että otsonin ja hiili-hiili -sidoksia sisältävät yhdisteet hajoavat otsonin kanssa reagoiessa, muodostaen haitallisia sekundääriyhdisteitä (muun muassa aldehydejä).	Uhde & Salthammer 2006 (review)
Tutkimuksessa selvitettiin otsonin ja d-limoneenin reaktiota ja sekä siinä mahdollisesti syntyviä sekundääriaerosoleja.	Kaksi kammiota sisäkkäin, joista sisemmässä, joka kuvasi sisäympäristöä, ilmanvaihto alle 1 vaihto/tunti ja ulommassa 45 vaihtoa/tunti. Sisempään kammioon injektointiin d-limoneenia. Otsonia injektointiin sisempään kammioon ja hiukkaspitoisuutta seurattiin hiukkaslaskurilla.	60–100 ppb	Otsonin ja d-limoneenin reagoiessa voi syntyä merkittäviä määriä sekundääriyhdisteitä sisäympäristöissä.	Wainman ym. 2000



Taulukko 3. Yhteenveto tutkimuksista, joissa tutkittu otsonoinnin vaikutusta kemiallisiin epäpuhtauksiin, rakennus- ja sisustusmateriaaleihin.

Liite 2, sivu 5/6

Tutkimusasettelu	Käytetty organismi	Pitoisuus / altistus aika	Tulokset ja päätelmät	Lähdejulkaisu
Tutkimuksessa selvitettiin otsonin ja valittujen terpeenien välisien reaktioiden vaikutuksia pienhiukkaspitoisuuksiin ja -kokojakamaan. Tutkimus oli kaksiosainen; ensimmäisessä osassa otsonin ja valittujen terpeenien välisiä reaktioita selvitettiin siten, että yhteen toimistohuoneeseen asetettiin tunnettu otsonipitoisuus ja valittuja terpeenejä, toinen toimistohuone toimi kontrollina, johon ei lisätty otsonia. Toisessa osassa, d-limoneeniä lisättiin vain yhteen huoneeseen, huoneissa normaalit sisä-ulko -siirtymän otsonipitoisuudet, kontrollihuoneeseen ei lisätty d-limoneenia.	Ensimmäisessä osassa käytettiin valittuja terpeenejä (joko d-limoneeni, $\alpha$ -terpineeni, tai terpeenipohjaista puhdistusainetta ( $\alpha$ -pineeni)). Toiseen osaan valittiin käytettäväksi d-limoneenia.	O <sub>3</sub> : 330 ppb, 2–7 päivää,	Tulosten perusteella voidaan sanoa, että otsoni/terpeeni -reaktiot kasvattavat sisäilmassa olevien pienhiukkasten määrää. Ensimmäisessä vaiheessa todettiin, että valituista terpeeneistä d-limoneeni muodostaa eniten uusia 0.1–0.2 $\mu$ m hiukkasia. Vaiheessa 1 todettiin otsonoinnin lisäävän huoneessa pienhiukkasten muodostumista 20-kertaisesti. Toisen vaiheen tutkimuksessa saatiin selville, että huoneeseen johon lisättiin d-limoneenia, muodostui 0.1–0.2 $\mu$ m hiukkasia 10-kertaisesti enemmän kuin huoneeseen, johon ei lisätty d-limoneenia.	Weschler & Shields 1999
Tutkimuksessa neljä eri materiaalia sisältävää kokolattiamattoa asetettiin teräksisiin kammioihin ja niitä altistettiin otsonille. Ennen ja jälkeen käsittelyn kammioista mitattiin haihtuvien orgaanisten yhdisteiden pitoisuudet.		28–44 ppb	Otsonoinnilla pystyttiin vähentämään muun muassa 4-PCH, styreenin, 4-VCH yhdisteiden pitoisuuksia, mutta samalla se lisäsi formaldehydin ja C <sub>5</sub> -C <sub>10</sub> aldehydi yhdisteiden pitoisuuksia.	Weschler ym. 1992
Katsauksessa käsitellään hydroksyyliiradikaalien muodostumista sisäilmassa.			Otsoni hajottaa hiili-hiili -sidoksiset yhdisteet (kuten alkeenit), synnyttäen hydroksyyliiradikaaleja.	Weschler & Shields 1996 (review)

Taulukko 3. Yhteenveto tutkimuksista, joissa tutkittu otsonoinnin vaikutusta kemiallisiin epäpuhtauksiin, rakennus- ja sisustusmateriaaleihin.

Liite 2, sivu 6/6

Tutkimusasettelu	Käytetty organismi	Pitoisuus / altistusaika	Tulokset ja päätelmät	Lähdejulkaisu
Katsauksessa on tarkoitus tuoda esille mitkä tekijät vaikuttavat sisäilman otsonipitoisuuteen ja otsonin reagoimiseen sisäilman epäpuhtauksien kanssa.			Tutkimukset ovat osoittaneet, että sisäilman otsonipitoisuuteen vaikuttaa suurelta osin ulko-sisäsiirtymä (sisäilman otsonipitoisuudesta 30–70 % tulee ulkoa). Lisäksi sisäilman otsonipitoisuutta kasvattavat sisälähteet, kuten kopiokoneet, ilmanpuhdistimet jne. Tutkimusten avulla on saatu selville myös se, että otsoni ei vaikuta pelkästään suoraan ihmisiin ja materiaaleihin, vaan myös sillä on merkittävä rooli sisäilman kemiassa. Sisäilman epäpuhtauksien ja otsonin väliset reaktiot synnyttävät uusia sekundäriepäpuhtauksia (radikaalit, pienhiukkaset yms.), jotka voivat olla haitallisempia kuin alkuperäiset epäpuhtaudet. Otsonoinnilla ei ole merkittävää vaikutusta sisäilmassa olevien hiukkasten poistoon johtuen siitä, että (1) suurin osa ilmassa olevista hiukkasista reagoi otsonin kanssa hyvin hitaasti, reaktio voi viedä kuukausia tai vuosia; (2) otsoni reagoi harvemmin hiukkasten kanssa kuin kaasumaisten epäpuhtauksien kanssa; (3) hiukkaset sisältävät miljoonia molekyyliä, jokaisen molekyylin hajottamiseen tarvitaan otsonin ja molekyylin välinen reaktio.	Weschler 2000 (review)
Tarkoituksena oli tuottaa kokeellista tutkimustietoa otsonin ja terpeenien yhteisvaikutusta hengitysteitä ärsyttävänä tekijänä. Tutkimuksessa tutkittiin otsonin ja terpeenien yhteisvaikutusta hengitystehyteen ASTM tekemässä biotestissä.	Tutkimuksessa käytettiin yleisiä sisäilmassa olevia terpeeneja ((+)- $\alpha$ -pineeni, R-(+)-limoneeni, isopreeni) ja otsonia.	O3 4–6 ppm, 10–30 RH%	Tutkimukset osoittivat, että otsoni ja tietty terpeeni yhdessä heikentävät hengitystehyttä 30–50 % (isopreeni ja otsoni 50 %, $\alpha$ -pineeni ja otsoni 30 %). Lisäksi tutkimukset osoittivat, että terpeenien ja otsonin välisessä reaktiossa tapahtuu rakennemuutoksia yhdisteissä. Tutkijoiden mukaan olisi erityisen tärkeää kiinnittää huomiota tyydyttymättömien VOC:n emissioihin, johtuen otsonista. Myös otsonia tuottaviin laitteisiin tulisi kiinnittää huomiota.	Wolkoff ym. 2000