

## Puu- ja savipohjaisten rakennusmateriaalien ominaisuuksia ja sisäilmaemissioiden on-line havaintoja

Mirja Salkinoja-Salonen<sup>1,3</sup>, Salla Venäläinen<sup>2</sup>, Timo Hokkanen, Vesa T. Korhonen<sup>3</sup>, Arto Visala<sup>3</sup>, Panu Harmo<sup>3</sup> ja Juha Vinha<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Helsingin yliopisto, kemian laitos

<sup>2</sup> Helsingin yliopisto, maaperä- ja ympäristötieteen yksikkö

<sup>3</sup> Aalto-yliopisto, sähkötekniikan ja automaation laitos

<sup>4</sup> Tampereen yliopisto, rakennustekniikka, rakennusfysiikka

### Tiivistelmä

Ecosafe on ympäristöministeriön, yritysten ja yliopistojen yhteishanke ja tutkii kotimaista savetettua kutteria eristeenä ja savea esimerkiksi seinärappauksena 2100-luvun olosuhteisiin soveltuvassa rakentamisessa. Tavoitteena on kehittää teollistettavia tuotteita, jotka ovat hiiliviisaita ja kosteusturvallisia sekä täyttävät lämpö- ja äänieristyksen, paloturvallisuuden ja uutena mittarina mikrobiturvallisuuden vaatimukset.

Lämpöeristeisiin kohdistuu sisä- ja ulkoilman lämpötila- ja kosteusolosuhteiden vaihtelusta johtuvaa rasitusta. Eristeisiin voi muodostua ns. *aox*-homeita, jotka emittoivat sisäilmaan ihmiselle haitallisia *tVOC*-päästöjä, jotka liikkuvat kaasuina tai vesihöyryn mukana ilmaitse esim. keuhkoihin. *Aox*-homeet sietävät homeiden kasvua rajoittavia biosideja kuten booria. Lisäksi materiaalien rikki voi pelkistyä bakteerien toimesta terveydelle haitalliseksi rikkivedyksi [4].

Savetus alensi eristeen suhteellista kosteutta (RH) jopa 6 prosenttiyksikköä. Kutterinlastun päästöjä tutkittiin sekä savilisyksellä että ilman, suljetuissa kammiossa 10 - 30 d ajan. Kammioon kytkettyjen antureiden avulla materiaalien hiilidioksidi- ja *tVOC*-emissioita tarkasteltiin kosteutta varioiden jatkuvatoimisesti.

Mittauksissa havaittiin, että kutterinlastun savettaminen lievästi emäksisillä rautapitoisilla savilla, joiden kalium/natrium-suhde oli korkea, vaimensi kutterinlastun *tVOC*-emissioita muuntaen ne terveydelle haitattomaksi hiilidioksidiksi.

### 1. Johdanto

Rakennusala on vuosikymmeniä tuottanut uusia materiaaleja, joiden sopivuus ihmisen biologiaan on selvinnyt viiveellä. Usein on ihastuttu tiettyyn fysikaaliseen ominaisuuteen, havaiten myöhemmin aineen haitallisuus ihmisen biologiaan ja terveyteen pitkäaikaiskäytössä tai huono vikasietoisuus esimerkiksi kosteuskapasiteetin osalta. Esimerkiksi asbesti, kreosootti, lastulevyn formaldehydit, liimat ja muut lisäaineet toimivat hyvin jonkin fysikaalisen omaisuuden osalta ja ovat rakennustekniikalle ja -taloudelle edullisia. Niitä on myös voitu tuottaa edullisesti teollisuuden sivutuotteena tai erillisessä prosessissa. Niiden haitat ihmisen biologialle ymmärretään nyt paremmin.

Empirian todistusarvo on ohjannut vain vähän teollisuuden materiaalivalinnoissa tai puuttunut, samoin kuin pitkäaikainen kenttätutkimus ja tarkka biologinen/terveysvaikutusten arviointi. Elintarviketuotannosta tuttu materiaalikoostumuksen julkaisupakon puuttuminen rakennusmateriaalituotannosta on myös pitänyt kuluttajat pimennossa rakennustuotteissa

käytetyistä lisäaineista. Tämä on tilanne edelleen; emme tiedä mitä lisäaineita käytetään esimerkiksi betonissa, teollisissa eristeissä ja kipsilevyissä, emmekä kattavasti niiden suoria tai epäsuoria terveysvaikutuksia.

Ecosafe lähtee olettamuksesta, että minimoimalla tuotteissa olevat lisäaineet, minimoidaan myös niihin liittyviä terveysriskejä. Muita tavoitteita ovat elinkaaren matala hiilijalanjälki, materiaalien kierrätettävyys, kosteusturvallisuus ja kotimaisuus. Näin on päädytty puu- ja savipohjaiseen kutteriin ja saveen, joita molempia löytyy Suomen luonnosta runsaasti ja joihin voidaan olettaa ihmisen evoluutiossaan sopeutuneen myös biologisesti.

Onkin siis arvioitava valittujen aineiden soveltuvuus rakentamiseen nykytieteen mittareilla.

Empirian todiste puulla, kutterilla ja savilla jo on; monet yli 100-vuotiaat niistä tehdyt talot ovat edelleen terveitä asua, koettuaan vaihtelevia vuosikymmeniä käytön ja olosuhteiden osalta.

Vikasietoisuus on rakennusmateriaalille vahvuus ja Ecosafe laajentaa tätä käsitettä mikrobien maailmaan. Voidaanko siis puusta ja savesta rakentaa kosteus- ja terveysturvallisesti nykymääräysten mukaisia rakenteita ja rakennuksia esimerkiksi eristepaksuuksia lisäämällä?

## **2. Puu- ja savipohjaisten rakennusmateriaalien ominaisuuksia ja niiden sisäilmapäästöjen online-havainnointi**

Savet ovat hienojakoisia kivennäismaalajeja, joiden fysikaaliset, kemialliset ja mikrobiologiset ominaisuudet vaihtelevat. Ecosafe-hankkeessa selvitetään, miten puupohjaisten eristemateriaalien savetus eli pinnoittaminen savella vaikuttaa niiden mikrobitoimintaan ja mikrobien tuottamien haitallisten aineiden emissioihin. Aihetta ei ole aiemmin tutkittu.

Mikrobit dominoivat elämää maapallolla. Niitä on aina ja kaikkialla ja niiden massa on yhtä suuri kuin kasvien ja eläinten yhteensä. Materiaalit ja olosuhteet määrittävät millaisia mikrobeja rakennukseen muodostuu. Yleisesti voidaan sanoa, että ihminen tarvitsee monipuolisia runsaita mikrobeja (esimerkiksi suoliston bakteerikanta), mutta osa mikrobeista voi tuottaa ihmiselle haitallisia *tVOC*-päästöjä, jotka hengitysteihin päästyään voivat vaurioittaa ihmisen immuunipuolustusta ja neurologiaa [3]. Siksi niiden tutkiminen osana rakennusbiologiaa on tärkeää.

Ecosafe yhdistää rakennusfysiikan ja mikrobiologian terveellisen rakentamisen edistämiseksi.

### **2.1 Savien ja kutterinlastun fysikaalis-kemiallisten ominaisuuksien karakterisointi**

Ominaisuuksiltaan erityyppisten savien voidaan olettaa vaikuttavan eri tavoin esim. savetetun purueristeen ominaisuuksiin. Savetetun purueristeen ominaisuuksiin vaikuttavat mm. saveksen ( $\Theta < 0,002$  mm hiukkaset) osuus saviaineksesta, saven kemiallinen koostumus sekä saven negatiivinen sähkövaraus ja erittäin suuri ominaispinta-ala (jopa  $500 \text{ m}^2 / 1\text{g}$  savea, ulko- ja sisäpinnat yhteensä), jotka indikoivat ravinteille ja niitä hyödyntäville mikrobeille tarjolla olevien hiukkaspintojen määrää.

Tutkittavien savien ja kutterinlastujen kemialliset koostumukset ja ravinnepitoisuudet määritettiin mikroaaltoavusteisella märkäpolttomenetelmällä [1]. Alkuaineiden (Ca, Mg, K, Na, P, S) pitoisuudet mitattiin liuosfaasista ICP-OES:lla. Savien negatiivista nettovarausta kuvaava kationinvaihtokapasiteetti (KVK) määritettiin uuttamalla näytteitä 1 M  $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ -liuoksella (pH 7) ja mittaamalla liuosfaasista K-, Na-, Ca- ja Mg-pitoisuudet ICP-OES:lla. Vaihtuva

happamuus määritettiin titraamalla uutteen 0,02 M NaOH:lla. Savien ominaispinta-ala määritettiin vesihöyryn adsorption ja ns. BET-yhtälön avulla [2].

Ecosafe hakee toimivia mittareita mikrobitoiminnaltaan hyvien savien valintaan sekä rakennusfysiikan osalta hyödyntää savien muita ominaisuuksia, mm. kosteus- paloturvallisuutta.

### 2.1.1 Materiaaleista mitattuja ominaisuuksia

Taulukossa 1a on esitetty tutkittujen kutterinlastujen ja savien alkuainepitoisuudet (mg/kg).

*Taulukko 1a. Kutterinlastuista (Puu 201 ja 205), savetetusta kutterista (202: 201 savettuna) ja savimateriaaleista (Savet 101, 102, 103 ja 104) määritettyjen alkuaineiden pitoisuudet (mg/kg)*

	<b>K</b>	<b>Na</b>	<b>K/Na</b>	<b>Ca</b>	<b>Mg</b>	<b>S</b>	<b>P</b>	<b>B</b>	<b>Fe</b>	<b>Al</b>	<b>Mn</b>	<b>Zn</b>
<b>Puu 201</b>	590	121	4,9	466	187	89	61	8	4	7	97	27
<b>Puu 202</b>	2055	176	11,7	1711	3662	105	226	63	13790	9675	227	53
<b>Puu 205</b>	395	28	13,9	701	152	93	21	7	3	0	11	17
<b>Savi 101</b>	6798	541	12,6	5032	12050	179	565	164	50956	34311	545	127
<b>Savi 102</b>	9005	646	13,9	5122	13956	131	627	159	48157	34964	514	120
<b>Savi 103</b>	6768	929	7,3	3076	9744	550	627	123	35063	24878	352	98
<b>Savi 104</b>	11057	1183	9,3	6440	14797	675	635	189	55173	42907	445	133

Taulukossa 1b on esitetty savien ja kutterilastun fysikaalisia ominaisuuksia.

*Taulukko 1b. Tutkittavien savien (Savet 101, 102, 103 ja 104) ja kutterilastun (Puu 205) fysikaalisia ominaisuuksia*

<b>Tutkittu näyte</b>	<b>pH</b>	<b>Sähkönjohtokyky EC mS/cm</b>	<b>KVK cmol(+)/kg</b>	<b>Ominaispinta-ala m<sup>2</sup>/g</b>
<b>Puu 205</b>	4			
<b>Savi 101</b>	7,1	0,07	27,2	86
<b>Savi 102</b>	7,5	0,06	20,7	59
<b>Savi 103</b>	6,6	1,50	10,5	34
<b>Savi 104</b>	7,6	0,87	26,9	78

Savet 101 ja 102 ovat teollisesti Suomesta saatavia, vähärikkisiä tuotteita. Savien karakterisointi on melko nopea ja edullinen tutkimus, millä voi olla suuri käytännön merkitys rakentamispäätösten kannalta.

Kammiomittauksissa matalan rikki- ja korkean kalium/natrium-suhteen saville saatiin hyviä tuloksia *tVOC*-päästöjen vähentämisessä. Käytännössä tämä tarkoitti sitä, että materiaalissa esiintyneen *aox*-tyyppisen homeen haitalliset *tVOC*-päästöt loppuivat, kun siihen lisättiin kyseisenlaista savea. Tällä voi olla suuri merkitys rakennuksen terveellisyyden kannalta, sillä *tVOC*-päästöille on STM:nkin määrittelemä yläraja (400 ppb).

## 2.2 Materiaalien kammio mittaukset ja mikrobiologia

Aalto yliopistolla on kehitetty on-line anturitekniikka ihmiselle mahdollisesti haitallisia päästöjä aiheuttavien materiaalien tunnistamiseksi. Mikrobin sisäilmaan tuottamia kaasua ja aerosolisolipäästöjä tutkittiin kammioon kytketyillä *tVOC*- ja *CO<sub>2</sub>-on-line* antureilla; 1 havainto/min, 1440 havaintoa/vrk. Jatkuvatoimiset anturit tuottavat tietoa tutkimuskammioiden suhteellisesta kosteudesta (RH%), hiilidioksidipitoisuudesta (*CO<sub>2</sub>*), lämpötilasta, kammioilman happipitoisuudesta (*O<sub>2</sub>* vol%), *tVOC*-pitoisuudesta (ppb) ja rikkipitoisten kaasujen (*H<sub>2</sub>S*, ppm) pitoisuudesta.

Näillä laitteilla löydetään kaiken kokoiset orgaaniset aineenvaihduntatuotteet (*tVOC*), myös suuret yli 400 g/mol, toisin kuin esimerkiksi virallinen STM:n menetelmä, joka rajaa mittaukset alle 220 g/mol kokosiin molekyyliin. Kuitenkin ihmiselle haitallisista sisäilma *tVOC*-päästöistä pääosa on molekyylikooltaan yli 400 g/mol.

Ecosafen tavoite on kutteripurujen savetuksen ja savirappauksen avulla minimoida materiaaliperäiset haittapäästöt käyttämällä oikeanlaisia savilaatuja. Tällaiset savet voivat soveltaa käytettäväksi kosteuskapasiteetiltaan hyvissä materiaaleissa, jotka ovat yhteensopivia ihmisen biologian kanssa, tavoitteena sisäilman laadun parantaminen.

### 2.2.1 *Aox*-tyypin homeista

*tVOC*-päästöjen tuottajamikrobin *aox*-ominaisuus (alternatiivinen oksidaasi), on tyypillinen mm. ihmisiä ja viljelykasveja sairastuttaville homeille. Nämä mikrobit ovat immuuneja homeenestokemikaaleille (biosidit, mm. boori) ja voivat näin saada kilpailuedun muilta, ihmiselle vähemmän haitallisilta mikrobeilta tietyissä rakennusmateriaaleissa ja tietyissä olosuhteissa.

*Aox*-mikrobin aineenvaihduntatuotteet (*tVOC*) voi olla ihmiselle haitallisia sisäilmassa, mistä on aiemmissa tutkimuksissa löydetty jo viitteitä [5,6,7]. Näille päästöille on tyypillistä suuri molekyylipaino, rasvaliukoisuus ja korkea höyrystymislämpö, minkä takia niiden ei ole ajateltu kaasuuntuvan huonelämmöissä eikä siten joutuvan keuhkoihimme. Kuitenkin ne voivat kulkeutua sisäilmaan ja hengitysteihin vesihöyryn mukana [8], kuten Covid-19 virusten yhteydessä on dramaattisesti opittu. Vesihöyry on siis tehokas kuljetin, myös haihtumattomille aineille. Hengitysteissä ei ole suoja- tai turvamekanismeja epäpuhtauksille toisin kuin ruuansulatuskanavassa, joten pienetkin pitoisuudet aiheuttavat haittoja.

Rikkivetyä syntyy mm. viemäreistä ja tietyissä materiaaleissa oleva rikki (*CaSO<sub>4</sub>*/kipsi, jossa on n. 20% rikkiä ja ammonium-sulfaatti/palonsuoja-aine) voi mikrobin toimesta muuntua rikkivedyksi. Rikkivety on itsessään todettu ihmiselle haitalliseksi aineeksi (mm. yhteys Alzheimer ja Parkinsonin tauteihin [3]). Muista monista materiaalien lisäaineista ei yleensä saada tietoa.

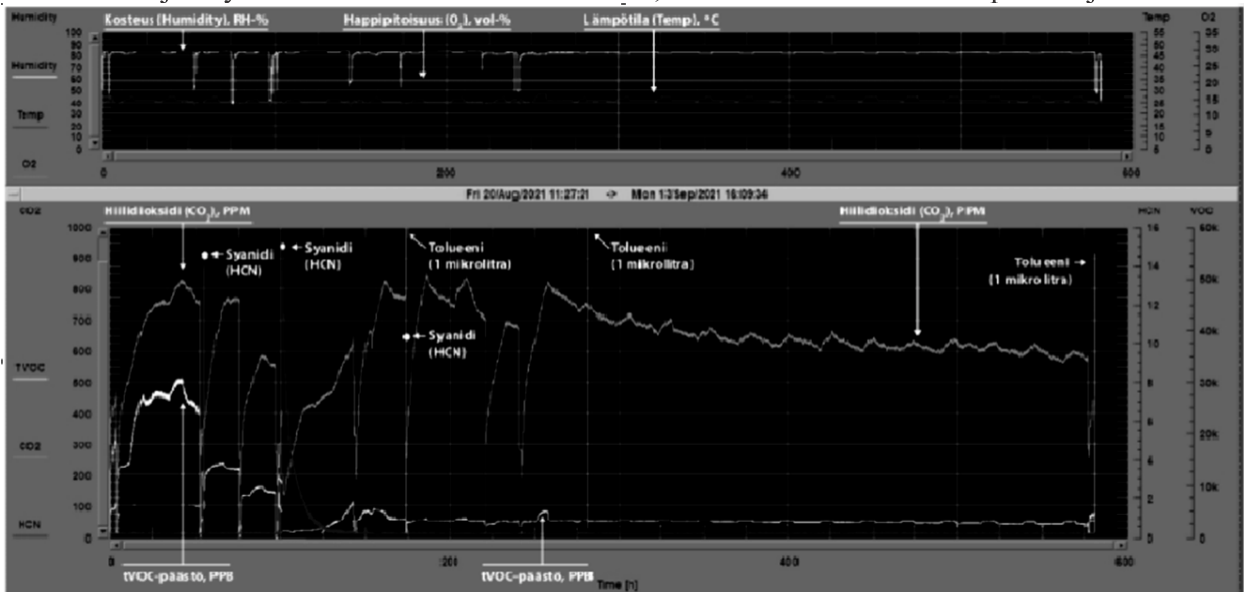
*Aox*-homeille elintilakilpailua muita mikrobeja vastaan edesauttavat biosidien käyttö rakennusmateriaaleissa (boori-yhdisteet, kationiset tensidit) ja rikkivety, erityisen kuivat ja kylmät olosuhteet sekä happipula ja korkea *CO<sub>2</sub>*-pitoisuus materiaalissa. Jos *aox*-homeille etua antavia tekijöitä ei ole, ne kasvavat muita homeita hitaammin eivätkä valtaa materiaalia; esimerkiksi luonnonmateriaaleissa, joissa ei ole biosideja tai muita kemiallisia lisäaineita.

## 2.2.2 Materiaaleista mitattuja tuloksia ( 2021/syyskuu -tilanne )

Kammionmittaukset toteutettiin kuvan 1 mukaisesti Aalto yliopistossa kehitetyllä anturimittauslaitteistolla, kammion koon ollessa 1 ltr ja näytemäärä noin 10-40grammaa.

Kuva 1 esittää sisäilmapäästöjä savetetusta puusta, jossa *tVOC* ei ollut *aox*-tyypin homeiden tuottamaa, sillä syanidilisäys pysäytti *tVOC*-päästöt (alakuva, alin käyrä). *Aox*-tyypin homeet tunnistaa siitä, että ne sietävät syanidia. Syanidilisäys siis tehtiin *aox*-homeiden tunnistamiseksi.

1 litran kammiossa 10g kutteria (puu 205) ja 30g savea (savi 104) kostutettiin tislattulla vedellä (6ml). Käyrissä näkyvät pudotukset osoittavat kammioiden tuuletusten (30 min/kerta) vaikutuksen ja käyrän nousu uudelleen osoittaa sen, että mikrobin tuottamat päästöt jatkuivat.



Kuva 1. Kuukauden ajan mitattu kerran minuutissa savetetusta kutterista, yli 40 000 mittausta. Yläkuva: RH%, happipitoisuus ja lämpötila. Alempi kuva *tVOC*-päästöt(ppb), CO<sub>2</sub> (ppm) altistaen materiaali syanidille (1mg) ja rikkivedylle mikrobin *aox*-ominaisuuden tunnistamiseksi. *tVOC* on kalibroitu toluenilla (1 mikro-ltr).

Kammionmittauksilla havaittiin, että emäksiset, rautapitoiset savet, joissa kalium/natrium-suhde on korkea, sopivat *tVOC* päästöisten sisätilamateriaalien *aox*-homeiden vaimentajiksi. Tietyt savilajit ylläpitävät alternatiivisten *aox* -tyyppisten homeiden tuottamien *tVOC* yhdisteiden biohajoamista hiilidioksidiksi (CO<sub>2</sub>). Tästä on hyötyä ihmisen biologialle turvallisten ja vikasietoisten materiaalien valmistuksessa.

Johtopäätöksenä tässä vaiheessa on, että savettamalla materiaaleja ja välttämällä biosidisia kemikaaleja, voidaan parantaa materiaaliemissioiden pysymistä ihmiselle haitattomina myös kosteuden noustessa esimerkiksi rakenneaurioiden yhteydessä tai syksyllä sekä talvikautena, jolloin sisäilman ja eristeen kosteus ja lämpötila voivat myös pudota erittäin alas. Yhdistettynä saven kosteustekniisiin ominaisuuksiin mikrobiologian tulokset tukevat saven käyttöä rakentamisessa eristeiden yhteydessä.

Ecosafe-hankkeen muut tutkimukset tuovat lisätietoa mm. savirapatun seinän toimivuudesta kosteuden tasaajana, palonsuojana ja äänieristeenä.

### 2.3 Mikrobitutkimuksen jatko Ecosafe -hankkeessa

Kammioiden ilmasta kerättyjä näytteitä analysoidaan myös kemiallisesti ja mahdollisesti toksikologisesti. Savetettua kutterinlastua ja joitakin verrokkimateriaaleja tutkitaan lisäksi hallituissa olosuhteissa olosuhdekammioissa, joissa tunnistetaan niissä esiintyvät mikrobilajit tarkasti DNA-määrityksen avulla. Tutkimuksissa selvitetään myös mikrobilajien mahdolliset *aox*-geenit. (Jyväskylän yliopisto, Bio- ja ympäristötieteiden laitos). Materiaaleista löydettyjen *aox*-mikrobien lajinimien perusteella on mahdollista tehdä johtopäätöksiä niiden terveysvaikutuksista.

Tutkimusta ja sen tuloksia on tarkoitus esitellä erikseen kutsuttavalle asiantuntijaryhmälle.

### 3. Yhteenveto

Ecosafe tutkii tieteellisesti savetetun kutterilastun sopivuutta rakennusfysiikan ja mikrobiologian kannalta eristeeksi ja saven toimivuutta seinäpinnoitteeksi. Molemmat materiaalit ovat Suomen luonnosta sellaisenaan jo löytyviä tai nykyisen teollisuuden sivutuotteina syntyviä sekä täydellisesti luonnonkiertoon sopivia ja vähähiilisiä elinkaarensa osalta. Ensimmäiset tulokset ovat lupaavia. Savetettuna kutterilastun kosteusturvallisuus paranee merkittävästi.

Tietyt savilaadut edistävät materiaaleissa esiintyvien *tVOC*-päästöjen mineralisoitumista  $\text{CO}_2$ :ksi, joka on helposti tuulettuva kaasu. Saven rautapitoisuus, emäksisyys ja korkea kalium/natrium-suhde korreloivat positiivisten vaikutusten kanssa. *tVOC*-päästöjen haitallisuutta voidaan mitata anturitekniikalla, joka löytää sekä kaasut että vesihöyryn mukana kulkeutuvat suuri molekyyliset aerosolit (ml. *aox*-homeiden *tVOC*-yhdisteet).

Erityisen kuivat, kylmät ja vähähappiset olosuhteet ja rikkivety ja biosidit kuten boori-kemikaalit edesauttavat haitallisten *tVOC*-päästöjen syntymistä antamalla niitä tuottaville, sitkeille *aox*-homeille kilpailuetua. Rikkivetyä voi syntyä myös mikrobien toimesta, mikäli materiaalissa on itsessään rikkiä, esimerkiksi kipsilevyssä.

Lopuksi: tekijät kiittävät rakennusfysiikkaa, ympäristöministeriötä ja rakennusalan toimijoita pääsemisestä mukaan hiiliviisaaseen ja terveelliseen rakentamiseen tähtäävään tutkimukseen.

#### Lähdeluettelo

- [1] U.S. EPA. 2007. Method 3051A (SW-846): Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Oils. Revision 1. Washington DC.
- [2] Brunauer, G., Emmet, B.H. & Teller, E. 1938. Adsorption of gases in multimolecular layers. J. Am. Chem. Soc. 60: 309–319.
- [3] Pushchina EV, Marinina K.S. & Myasoyedov S.D. 2020 (katsaus). Hydrogen sulfide and pathophysiology of the CNS. Neurophysiology 52:308-321.
- [4] Harmo P. (6 muuta) Visala A. & Salkinoja-Salonen M 2017. Mikrobitien tuottamat haitalliset rikkidisteet sisäilmassa. uusi on-line sovellettava mittaustekniikka. SIY raportti (Sisäilmayhdistys), 2017, sivut 233-237.
- [5] Castagnoli E.(4 muuta), Salonen H. ja Kurnitski J. 2018. Indoor Trichoderma strains emitting peptaibols in guttation droplets. J. Appl. Microbiol. doi 10.1111/jam.13920
- [6] Andersson MA, (3 muuta) Kurnitski J., Salonen H., 2021. Melinacidin-producing *Agrostalagmus luteoalbus*, a major constituent of mixed mycobiota contaminating insulation material in an outdoor wall. Pathogens 2021, 10, 843. <https://doi.org/10.3390/pathogens 10070843>.
- [7] Andersson M.A.(4 muuta),Kurnitski J., Salonen H. 2020. Bioreactivity, guttation and agents influencing surface tension of water emitted by actively growing indoor mould isolates. Microorganisms 2020, 8, 1940: <https://doi.org/10.3390/microorganisms 8121940>.
- [8] Mannerström M., Toimela T., Ahoniemi J., Makiou A-S., Heinonen T. 2020. Cytotoxicity of water samples condensed from indoor air: an indicator of poor indoor air quality. Applied in vitro Toxicology, Vol. 6, No. 4. DOI: 10.1089/aivt 2020.0017