



TUTKIMUSKESKUS WANDER

Kokoomajulkaisu 2024

Tutkimuskeskus WANDER

Kokoomajulkaisu 2024

Toim. Martti Latva & Cimmo Nurmi

Satakunnan ammattikorkeakoulu

Pori 2024

Satakunnan ammattikorkeakoulu | Satakunta University of Applied Sciences
Sarja D, Muut julkaisut 3/2024
ISSN 2323-8372 | ISBN 978-951-633-408-3 (PDF)

© Satakunnan ammattikorkeakoulu ja tekijät

Julkaisija:
Satakunnan ammattikorkeakoulu
PL 1001, 28101 PORI
www.samk.fi

Graafinen suunnittelu: SAMK Viestintä /Jatta Lehtonen
Taitto: SAMK Viestintä / Petra O'Rourke
Kansikuva: Valokuvaaja Veera Korhonen

Sisältö

| | |
|--|-----------|
| Esipuhe | 6 |
| Tartuntojen ehkäisy sisäympäristössä | 8 |
| Noora Salonen | |
| Sisätilan hygieni arjessa | 16 |
| Riika Mäkinen | |
| Sisäympäristön hygienian huomioiminen osana laivanrakennusta – Rakennetulla ympäristöllä voidaan vähentää infektioiden leviämistä myös aluksilla..... | 25 |
| Sari Repka | |
| Antimikrobiset pinnat infektioidentorjunnan tukena..... | 31 |
| Merja Ahonen | |
| Valoon perustuvat ratkaisut sisäympäristön antimikrobisissa sovelluksissa..... | 38 |
| Martti Latva | |
| Ilmanlaatuanturit osana sisäilma- ja hygieniatutkimusta..... | 56 |
| Kalle Salonen | |
| Tutkimusympäristö Tutkimuskeskus WANDERin osaamisen kerryttäjänä..... | 62 |
| Aino Pelto-Huikko | |
| Nanokuplat, ja niiden synty, stabiilius ja ominaisuudet | 68 |
| Jussi Tamminen | |
| Legiolert apuna legionellan havaitsemisessa | 79 |
| Elle-Maria Peltomäki | |
| Aistinarvio elintarviketuotannossa..... | 84 |
| Meija Kivisaari | |

Esipuhe

Tutkimuskeskus WANDER perustettiin Prizztech Oy:n yhteyteen virallisesti vuonna 2005 nimellä Vesi-Instituutti. Itse toiminta alkoi kuitenkin jo paljon aiemmin eli vuonna 1999, jolloin satakuntalaiset vesialan yritykset näkivät tarpeelliseksi osallistua yhteisen eurooppalaiseen juomaveden kanssa kosketuksissa olevien rakennustuotteiden tuotehyväksyntäjärjestelmän pystyttämiseen sekä olennaisesti siihen liittyvien standardien laatimiseen yhteistyössä VTT:n kanssa. Nyt 25 vuoden jälkeen ollaan vihdoinkin siinä tilanteessa, että Euroopan komissio on antanut lopulliset materiaalihyväksyntään liittyvät täytäntöönpanosäädökset ja delegoidut asetukset tammikuussa 2024. Uudet säännökset on tarkoitus saada voimaan vuoden 2026 alussa. Kansalliset hyväksyntäjärjestelmät ovat voimassa siirtymäajan, johon saatiin Suomen ja Ruotsin toimesta siirtymäaikaa 2032 asti. Suomessa muutokset koskevat erityisesti juomavesijärjestelmien komponenteissa käytettäviä sinkinkadonkestäviä messinkilaatuja.

Veden laatu, joka muodostuu kemiallisista ja mikrobiologisista tekijöistä, on ollut Tutkimuskeskus WANDERin toiminnassa olennaisena kulmakivenä ja WANDER on osallistunut mm. juomavedenkäsittelyssä käytettävien kemikaalien eurooppalaiseen standardisointiin vuodesta 2009 lähtien. Kymmenen vuotta sitten WANDERin siirtyessä Prizztechistä Satakunnan ammattikorkeakouluun, toiminta laajeni vedestä, vesijärjestelmistä ja vedenkäsittelystä käsittämään laajemmin sisäympäristön terveellisyyteen vaikuttavia tekijöitä, eli veden lisäksi kosketuspintoja ja sisäilmaa. Näin ollen WANDERin tutkimus kattaa myös sisäympäristön ratkaisut, joilla voidaan vähentää erilaisia ihmisille välittyviä tartuntoja. Nyt voidaankin yli neljä vuotta sitten alkaneen COVID-19-pandemian jälkeen todeta, että WANDERin tutkimuksen laajentaminen oli erittäin hyvin suunnattua ja ajoitettua. Helppoa on myös ennustaa, että kyseinen epidemia ei tule jäämään viimeiseksi.

WANDERin tutkimuksessa erittäin olennainen tekijä on yhteistyö yritysten kanssa. Vuosien aikana yhteistyötä on tehty monenlaisten yritysten kanssa pienistä startup-yrityksistä isoihin kansainvälisiin megaluokan yrityksiin. Vaikka tutkimus sisältää osaltaan perustutkimusta, niin pääpaino on kuitenkin soveltavassa tutkimuksessa. Globaalisti veteen ja antimikrobisiin ratkaisuihin liittyvä tutkimus on tällä hetkellä erittäin voimakasta. WANDERin kannalta erinomainen asia on, että olemme mukana kansainvälisissä alan yritysten ja yliopistojen muodostamissa tutkimusverkostoissa,

kuten huippututkimusta tukevasta EU:n Horisontti Eurooppa -ohjelmasta rahoitetussa STOP-projektissa (Surface Transfer of Pathogens).

WANDERin tutkimuksen kehittymisen kannalta keskeistä on alan uusien tutkimusaiheiden jatkuva tarkastelu ja seulonta. Esimerkkinä tästä toimii veteen erilaisilla tekniikoilla tuotetut nanokokoluokan kaasukuplat, joille potentiaalisia käyttösovelluksia löytyy huomattava määrä. Olennaisen osan WANDERin toiminnan tulevaisuudesta muodostaa kokeellinen tutkimus sekä omat korkeatasoiset tutkimusjulkaisut, mikä luonnollisesti edellyttää oikeanlaista tutkimusrahoitusta ja resursseja.

Huolimatta siitä, että WANDERin tutkimus on kansainvälistä ja kansallista, niin myös maakunnallinen näkökulma ja etu on aina mukana. Erityisesti satakuntalainen tutkimusyhteistyö Pyhäjärvi-Instituutin, Satafoodin ja Prizztechin kanssa on avainasemassa maakunnan kehityksen kannalta. Erinomaista tutkimusyhteistyötä on näiden organisaatioiden kesken tehty jo useissa projekteissa ja tavoitteena on saavuttaa yhdessä laajempi vaikuttavuus ja osaamispohja, jota koko Satakunnan alue ja erityisesti sen elintarviketuotanto pystyisi vielä entistä paremmin hyödyntämään. Lisäksi tutkimusyhteistyötä on aika ajoin tehty myös Turun ja Tampereen yliopistojen Porin yksikköjen kanssa.

Myös tutkimuksen näkökulmasta 2020-luku on täynnä haasteita ja mahdollisuuksia, mutta WANDERin laaja osaamispohja ja jatkuva oman osaamisen kehittäminen, tarvittavat rekrytoinnit sekä yhteistyö muiden toimijoiden kanssa ovat ne avaintekijät, joilla tuloksia ja vaikuttavuutta tullaan saamaan aikaan myös jatkossa. Tämä kokoomajulkaisu on läpileikkaus WANDERin käynnissä olevista rakennetun sisäympäristön terveellisyyden kannalta olennaisista tutkimuksista koskien vettä ja vesijärjestelmiä, kosketuspintoja sekä sisäilmaa.

Martti Latva

Tutkimuspäällikkö

Tutkimuskeskus WANDER, Satakunnan ammattikorkeakoulu

Tartuntojen ehkäisy sisäympäristössä

Noora Salonen, TkT, asiantuntija, noora.salonen@samk.fi

Viime vuosina infektioiden ehkäisy sisäympäristössä on noussut hyvin ajankohtaiseksi aiheeksi. COVID-19 pandemia osoitti, että erilaisten tartuntatautien leviämiseen ei olla varauduttu riittävästi. Eläimistä ihmisiin tarttuvien virusten pelätään jatkuvasti aiheuttavan uusia pandemioita. Lisäksi antibioottiresistentit mikrobikannat ovat ilmaantuneet jäädäkseen ja aiheuttavat paljon huolta terveydenhuollossa. Myös ”perinteisemmät” taudinaiheuttajat ovat säännöllisesti otsikoissa, kuten *Legionella*, joka on sitkeä ja ei-toivottu vieras rakennusten vesijärjestelmissä.

Koska useimmat ihmiset viettävät suurimman osan ajastaan sisätiloissa, on rakennetun ympäristön osuus infektioiden leviämisessä ja toisaalta torjunnassa merkittävä. Infektiot voivat tarttua suoraan ihmisestä toiseen esimerkiksi kosketuksen kautta tai pisaratartuntana. Mahdollisuus vaikuttaa näihin tartuntamuotoihin rakennetussa ympäristössä liittyy lähinnä riittäviin tiloihin ja henkilöliikenteen ohjailuun, joiden avulla voidaan mahdollistaa tarpeelliset etäisyydet epidemiatilanteessa. Kuitenkin monet mikrobit voivat levitä myös epäsuorasti esimerkiksi kosketuspintojen, hengitysilman ja vesijärjestelmien välityksellä, jolloin rakennetun ympäristön vaikutus infektioiden leviämiseen korostuu.

Julkiset rakennukset, joissa liikkuu paljon ihmisiä, kuten kauppakeskukset, julkisen liikenteen terminaalit, harrastuspaikat, koulut, päiväkodit, hoitokodit ja toimistot ovat tiloja, joissa monet tartuntataudit leviävät helposti. Näiden rakennusten suunnittelussa ja toteuttamisessa olisi tärkeää ottaa huomioon infektioiden ehkäisyn näkökulma. Tiloista, joissa on kiinnitetty erityishuomiota infektioiden ehkäisyyn, voidaan puhua **hygieenisinä sisäympäristöinä**. Tutkimuskeskus WANDER on jo vuosia kehittänyt hygieenisen rakentamisen konseptia, jossa huomioidaan rakennuksen koko elinkaari sekä sisäympäristön hygienian kannalta tärkeät osatekijät [1]. Hygieenisillä sisäympäristöillä voidaan parhaimmillaan luoda **terveellisempiä ja turvallisempia rakennuksia**, mistä hyötyvät sekä yksilöt että yhteiskunta.

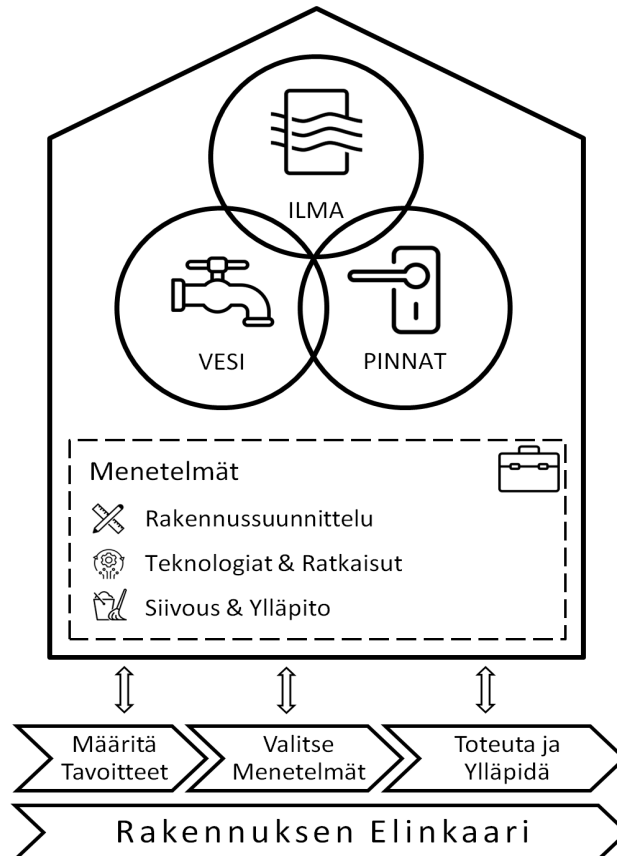
Hygieenisen rakentamisen konsepti

Sisäympäristön hygieniatason parantamiseksi on saatavilla monenlaisia ratkaisuja, kuten esimerkiksi antimikrobiset pinnat. Tuomalla yksittäisiä ratkaisuja rakennettuun ympäristöön voidaan kuitenkin lisätä vain hyvin rajallisesti rakennuksen valmiutta infektioiden ehkäisyyn. **Rakennuksen hygieniatason merkittävä nostaminen edellyttää kokonaisvaltaisempaa konseptuaalista lähestymistapaa.**

Hygieeninen sisäympäristö muodostuu parhaimmillaan moniammatillisen yhteistyön kautta, jota toteutetaan **rakennuksen elinkaaren kaikissa vaiheissa**. Rakennuksen elinkaari käsittää sen suunnittelun, rakentamisen sekä käytön ja ylläpidon. Tavoiteltava hygieniataso on hyvä päättää jo rakennuksen suunnitteluvaiheessa. Täysin mikrobivapaaseen ympäristöön ei ole tarkoituksenmukaista pyrkiä, vaan tavoitteet asetetaan rakennuksen käyttötarkoituksen mukaan. On suositeltavaa, että prosessissa on mukana ainakin yksi asiantuntija, joka ymmärtää hygieenisen rakentamisen perusteet ja pystyy valvomaan tavoitteiden toteutumista [1].

Hygieenisen rakentamisen konsepti on esitelty **kuvassa 1**. Yksinkertaistettuna **menetelmät hygieenisen sisäympäristön luomiseen ovat rakennussuunnittelu, antimikrobiset ratkaisut ja teknologiat, sekä siivous ja ylläpito** [2]. Näiden avulla voidaan vaikuttaa infektioiden torjuntaan rakennetussa ympäristössä. Esimerkiksi rakennussuunnittelussa infektioiden ehkäisyä voidaan edistää pyrkimällä yksinkertaisiin ja helposti siivottaviin rakenteisiin ja tiloihin, jotka mahdollistavat riittävät turvavälit tarvittaessa. Lisäksi ”puhtaat” ja ”likaiset” alueet on hyvä erottaa toisistaan ja ihmisvirtojen kulku pyritään tekemään mahdollisimman sujuvaksi.

Sisäympäristö voidaan karkeasti jakaa kolmeen osa-alueeseen, joihin hygieenisen rakentamisen menetelmiä tulisi kohdentaa. Nämä osa-alueet ovat **sisätilojen pinnat, sisäilma sekä rakennuksen vesijärjestelmät** [2]. Seuraavassa käsitellään lyhyesti näihin osa-alueisiin liittyviä toimia, joilla voidaan parantaa rakennuksen hygieniatasoa.



Kuva 1. Hygieenisen rakentamisen konsepti. Sisäympäristön hygieniaa voidaan parantaa rakennussuunnittelun, erilaisten antimikrobisten teknologioiden sekä siivouksen ja ylläpidon avulla. Tavoiteltava hygieniataso on tärkeää päättää jo rakennuksen suunnitteluvaiheessa. Hygieenisen sisäympäristön ylläpitäminen vaatii toimia koko rakennuksen elinkaaren ajan.

Antimikrobiset pinnat

Sisäympäristön pinnoille päätyy mikrobeja eri lähteistä, kuten ihmisistä, eläimistä ja ympäristöstä. Taudinaiheuttajamikrobit pinnoilla ovat usein lähtöisin ihmisistä, joko suoran kosketuksen tai pinnoille laskeutuvien pisaroiden tai aerosolien kautta. Monet **mikrobit voivat säilyttää elävyytensä ja tartuttavuutensa pinnoilla tunneista jopa kuukausiin** [3]. Tämä tekee epäsuorat kosketustartunnat hyvin mahdollisiksi etenkin usein kosketettavien pintojen, kuten ovenkahvojen ja kaiteiden kautta.

Säännöllinen siivous ja tietyissä tilanteissa myös desinfiointi ovat tärkeitä, kun halutaan vähentää likaa ja mikrobeja pinnoilta. Ne eivät kuitenkaan yksinään ole riittäviä estämään pintojen kautta tapahtuvia tartuntoja. Tämä johtuu mm. siitä, että siivous ei aina tavoita kaikkia pintoja eikä välttämättä ole riittävän perinpohjaista. Lisäksi likaantumisen ja siivouksen välissä on usein aikaikkuna, jonka aikana

mikrobien leviämistä pintojen kautta ehtii tapahtua. **Kosketuspintojen hygieniaa voidaan parantaa korvaamalla tavalliset materiaalit antimikrobisilla materiaaleilla, jotka tappavat tai hylkivät mikrobeja.** Antimikrobisten materiaalien käyttöä etenkin usein kosketuilla pinnoilla, kuten kosketusnäytöt, ovenkahvat, kaiteet ja WC-huuhtelupainikkeet, voidaan pitää perusteltuna, sillä se vähentää pintojen kautta tapahtuvien tartuntojen riskiä. Antimikrobinen pinta voi koostua itsessään antimikrobisesta aineesta tai antimikrobinen aine voi olla lisättynä pintamateriaalin joukkoon. Toisaalta antimikrobisia pinnoitteita pystytään lisäämään lähes minkä vain pintamateriaalin päälle esimerkiksi ruiskuttamalla tai erilaisina kalvoina.

Antimikrobiset pinnat tai pinnoitteet voidaan luokitella perustuen mekanismeihin, joilla ne tuhoavat tai hylkivät mikrobeja [4]. Esimerkiksi valon vaikutuksesta aktivoituvat antimikrobiset pinnat sisältävät valoon reagoivaa ainetta, kuten titaanidioksidia. Valon vaikutuksesta tällaisilla pinnoilla syntyy reaktiivisia happiradikaaleja, jotka hajottavat orgaanista materiaalia, mukaan lukien mikrobeja.

Monilla metalleilla on antimikrobisia ominaisuuksia, jotka perustuvat mikrobeille myrkyllisten metalli-ionien vapautumiseen. Esimerkiksi monet mikrobit tuhoutuvat kuparipinnoilla jo muutamissa minuuteissa [5]. Myös hopeaa käytetään yleisesti antimikrobisten pintojen valmistukseen.

Mikrobien inaktivoituminen antimikrobisilla pinnoilla riippuu monesta tekijästä, kuten materiaalista, mikrobeista ja olosuhteista, joten **pintoja valitessa olisi hyvä varmistua niiden tehosta.** Jotkin pintamateriaalit tai pinnoitteet saattavat myös aiheuttaa ympäristökuormaa sekä edistää mahdollisten resistenttien mikrobien rikastumista, minkä vuoksi pinnoitteiden käytön tulisi olla tarkkaan harkittua [6].

Sisäilma

Sisäilma saattaa sisältää taudinaiheuttajamikrobeja, jotka tavallisesti ovat päätyneet ilmaan ihmisten aivastelun, yskimisen tai jopa vain puheen ja hengityksen seurauksena. Isommat pisarat yleensä laskeutuvat pinnoille nopeasti, mutta hyvin pienikoiset pisarat eli niin sanotut aerosolit voivat säilyä ilmassa pidempään. Esimerkiksi **koronaviruksen on todettu pystyvän leijaillemaan aerosoleissa jopa useamman tunnin** [7]. Tällöin **tartunnan voi saada huoneilmaa hengitettäessä,** vaikka infektiota levittävä henkilö ei olisi enää edes paikalla. Heikko ilmanvaihto onkin yhdistetty tiettyjen tautien, kuten COVID-19:n, leviämiseen ilman välityksellä.

Ilmavälitteisten tartuntojen vähentämiseksi on siis kiinnitettävä huomio rakennuksen ilmanvaihtoon [8]. Yksinkertaisimmillaan **tehostettu ilmanvaihto auttaa laimentamaan sisäilman epäpuhtauksia, mikä vähentää tartuntojen leviämisen todennäköisyyttä**. Aina pelkkä ilmanvaihdon tehon kasvattaminen ei kuitenkaan riitä. Erityisiä ilmanvaihtoratkaisuja voidaan käyttää esimerkiksi työpisteiden suojaamiseen tai puhtaiden ja vähemmän puhtaiden alueiden erottamiseen toisistaan. Paine-erojen tulisi olla säädetty siten, että ilma virtaa puhtaammilta alueilta epäpuhtaammille. Fysikaalisilla esteillä, kuten läpinäkyvillä pleksisuojuilla, voidaan ohjailta ilmavirtoja ja esimerkiksi estää asiakkaan ja asiakaspalvelijan välinen suora ilmakontakti.

Mikäli ilman puhdistusta halutaan tehostaa entisestään, voidaan ottaa käyttöön erilaisia sisäilman suodatus- ja desinfiointimenetelmiä [9]. Sisätilaan on mahdollista tuoda jälkikäteen erilaisia ilmaa kierrättäviä ilmanpuhdistimia, joiden puhdistusteho voi perustua esimerkiksi hyvin tehokkaaseen HEPA-suodatukseen tai ilman epäpuhtauksia sähköisesti poistaviin menetelmiin. **Ilmanpuhdistimien on todettu joissakin tutkimuksissa alentavan ilman mikrobipitoisuuksia ja vähentävän tartuntoja** [10]. Puhdistimen valinnan olisi hyvä perustua tietoihin sen kapasiteetista ja turvallisuudesta. Esimerkiksi HEPA-suodattimet eivät vapauta sivutuotteita sisäilmaan, mutta käyttö vaatii paljon energiaa ja ylläpitoa. Toisaalta epäpuhtauksia tuhoavat ilmanpuhdistimet saattavat joissain tapauksissa tuottaa ilmaan pieniä määriä haitallisia aineita, mutta niiden käyttö voi olla edullisempaa ja yksinkertaisempaa.

Vesijärjestelmät

Kosteissa ympäristöissä, kuten rakennusten vesijärjestelmissä, bakteerit muodostavat pinnoille biofilmiä, joka mahdollistaa niiden asettumisen suotuisaan ympäristöön ja suojaa niitä desinfiointiaineilta ja muilta ympäristötekijöiltä. Rakennusten vesijärjestelmät suosivat mikrobikasvua monista syistä, joista mainittakoon ainakin vaihtelevat materiaalit, veden alhaiset desinfiointiainetasot, ajoittain seisova vesi ja suuri kosketuspinta-ala tilavuuteen nähden.

Rakennuksen vesijärjestelmän biofilmit voivat sisältää myös haitallisia mikrobeja, kuten vakavaakin keuhkokuumetta aiheuttavia *Legionella*-bakteereita. Biofilmiä mikrobit voivat siirtyä veteen, esimerkiksi painevaihtelujen vaikutuksesta. Lisäksi bakteerit alkavat lisääntyä vapaasti vedessä olosuhteiden ollessa suotuisat, kuten veden seisossa pidempään. Vesivälitteiset infektiot tarttuvat, kun mikrobipitoinen vesi päätyy kosketuksiin ihmisen kanssa esimerkiksi ihon, ruuansulatuskanavan tai keuhkojen kautta aerosoleja hengitettäessä.

Haitallisten mikrobien perinpohjainen hävittäminen vesijärjestelmästä voi olla vaikeaa, kun niitä kerran on sinne päässyt. Siksi **vesivälitteisten infektioiden torjunta keskittyy pääasiassa mikrobikasvun hillitsemiseen ja veden riittävän mikrobiologisen laadun ylläpitoon** [11]. Tämä onnistuu esimerkiksi **säätämällä** kylmän ja kuumen veden **lämpötiloja** siten, että kylmä vesi pysyy kylmänä ja lämmin vesi riittävän kuumana. Näin lämpötilat eivät ole mikrobikasvulle optimaalisia. Lisäksi **riittävän ja säännöllisen virtauksen ylläpito** on tärkeää. Seisova vesi mahdollistaa mikrobikasvun ja pitkään seisonut vesi voi olla mikrobiologisesti hyvin heikkolaatuista. Tietyissä tilanteissa tehostetut toimet, kuten rakennuksen vesijärjestelmän puhdistus ja desinfiointi voivat olla tarpeen. Putkistojen kunnon ylläpitoon tähtää esimerkiksi magneettinen vedenkäsittely, jonka avulla voidaan vähentää putkistoihin kertyviä saostumia [12].

Rakennuksen vesijärjestelmän sopiva mitoitus ja säännöllinen käyttö vähentävät vesivälitteisten infektioiden riskiä. Myös asennettavilla vesikalusteilla on oma merkityksensä infektioiden ehkäisyssä. Aerosolien muodostumista aiheuttavat kalusteet, kuten suihkupäät, eivät ole infektion torjunnan kannalta suositeltavia.

Kohti hygieenisempää sisäympäristöä

Tutkimuskeskus WANDER on jo 10 vuoden ajan ollut kehittämässä uutta konseptuaalista näkökulmaa sisätilojen hygieniaan [1]. Perimmäisenä ideana on, että **sisäympäristö on huomioitava kokonaisuutena**, jotta rakennuksen valmiutta infektioiden torjuntaan voidaan parantaa. Hygienia tavoitteet tulee lisäksi ottaa huomioon **rakennuksen koko elinkaaren ajan, erityisesti jo suunnitteluvaiheessa**. Toki rakennuksen hygieniaa on mahdollista parantaa myös saneerauksen yhteydessä, mutta ei aivan niin kokonaisvaltaisesti.

Vaikka rakennusala on yleisesti melko tiukasti säädeltyä, silti Suomen rakentamismääräyskokoelmassa ei juurikaan ole ollut ohjeita siitä, miten parantaa julkisten rakennuksen valmiutta infektioiden torjuntaan. Tutkimuskeskus WANDER on tehnyt yhteistyötä Rakennustietosäätiön kanssa, minkä seurauksena on julkaistu **hygieenistä rakentamista käsittelevät RT-kortit** [13, 14, 15]. Näiden tarkoitus on mm. selkeyttää hygieenisen rakentamisen käsite ja tehdä infektioiden torjunta näkyväksi rakennusosalalle. Lisäksi ohjeet auttavat luomaan laadullisia kriteerejä tarjousprosesseja varten sekä havaitsemaan rakentamisprosessin kriittiset kohdat hygieenisen rakentamisen näkökulmasta.

Toisinaan infektioiden torjunnan tavoitteet voivat olla ristiriidassa muiden tavoitteiden, kuten kestävän kehityksen mukaisen rakentamisen kanssa. Esimerkiksi käyttöveden pitäminen tuoreena ja riittävän korkeiden lämpimän veden lämpötilojen ylläpito kuluttavat vettä ja energiaa. Siksi joskus onkin tehtävä kompromisseja, jotta päästään mahdollisimman hyvään lopputulokseen rakennuksen käyttötarkoituksen kannalta.

Antimikrobisten ratkaisujen ja teknologioiden teho pyritään tavallisesti osoittamaan vertaamalla mikrobipitoisuuksia, esimerkiksi antimikrobisella ja tavallisella pinnalla. Koska tutkimusmenetelmät vaihtelevat, ei ole suoraviivaista tehdä vertailuja ja löytää toimivimpia ratkaisuja infektioiden torjuntaan. Lisäksi on vielä tarpeen tutkia näiden vaikutuksia sairastuvuuteen. Myös kokonaisvaltaisen **hygieenisen rakentamisen vaikutukset sairastuvuuteen** on vielä tarpeen selkiyttää. Tämä ei ole aivan yksinkertaista, sillä voidaan olettaa, että hygieenisen rakentamisen hyödyt tulevat parhaiten esiin vasta epidemioiden tai pandemioiden yhteydessä. Tutkimuskeskus WANDER on tarttunut haasteeseen ja tutkii parhaillaan hygieenisten sisäympäristöjen vaikutusta tilojen mikrobikuormaan sekä käyttäjien sairastuvuuteen.

Lähteet

- [1] Salonen N, Mäkinen R, Ahonen M, Mäkitalo T, Pelto-Huikko A, Latva M. 2022. A comprehensive indoor hygiene concept for infection prevention and control within built environments. *Frontiers in Built Environment*. 8:1075009. doi: [10.3389/fbuil.2023.1212920](https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1212920).
- [2] Salonen N, Ahonen M, Sirén, K, Mäkinen R, Anttila V-J, Kivisaari M, Salonen K, Pelto-Huikko A, Latva M. 2023. Methods for infection prevention in the built environment – a mini review. *Frontiers in Built Environment*. 9:1212920. doi: [10.3389/fbuil.2022.1075009](https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.1075009).
- [3] Otter, J. A., Yezli, S., Salkeld, J. A. G., French, G. L. (2013). Evidence that contaminated surfaces contribute to the transmission of hospital pathogens and an overview of strategies to address contaminated surfaces in hospital settings. *Am. J. Infect. Control*. 41, 6-11. doi: [10.1016/j.ajic.2012.12.004](https://doi.org/10.1016/j.ajic.2012.12.004).
- [4] Ahonen, M., Kahru, A., Ivask, A., Kasemets, K., Kõljalg, S., Mantecca, P., et al. (2017). Proactive approach for safe use of antimicrobial coatings in healthcare settings: opinion of the COST Action network AMiCI. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 14, 366. doi: [10.3390/ijerph14040366](https://doi.org/10.3390/ijerph14040366).
- [5] Abraham, J., Dowling, K., Florentine, S. (2021). Can copper products and surfaces reduce the spread of infectious microorganisms and hospital-acquired infections. *Materials*. 14, 3444. doi: [0.3390/ma14133444](https://doi.org/10.3390/ma14133444).
- [6] Mäki A, Salonen N, Kivisaari M, Ahonen M, Latva M. 2023. Microbiota shaping and bioburden monitoring of indoor antimicrobial surfaces. *Frontiers in Built Environment*. 9:1063804.
- [7] van Doremalen, N., Lloyd-Smith, J. O., Munster, V. J. (2020). Aerosol and surface stability of HCoV-19 (SARS-CoV-2) compared to SARS-CoV-1. *N. Engl. J. Med.* 382, 16. doi: [10.1016/2020.03.09.20033217](https://doi.org/10.1016/2020.03.09.20033217).
- [8] Morawska, L., Allen, J., Bahnfleth, W., Bluyssen, P. M., Boerstra, A., Buonanno, G., et al. (2021). A paradigm shift to combat indoor respiratory infection building ventilation systems must get much better. *Science*. 372, 689-691. doi: [10.1126/science.abg2025](https://doi.org/10.1126/science.abg2025).

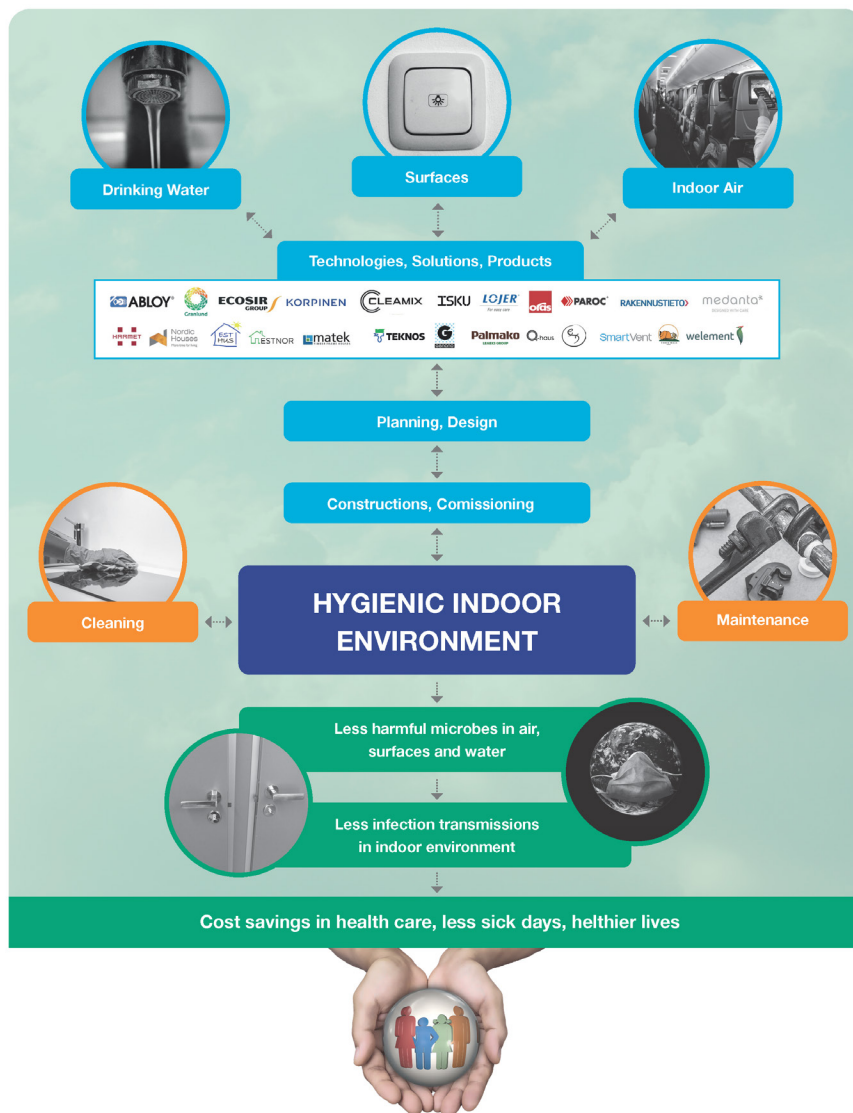
- [9] Blocken, B., van Druenen, T., Ricci, A., Kang, L., van Hooff, T., Qin, P., et al. (2021). Ventilation and air cleaning to limit aerosol particle concentrations in a gym during the COVID-19 pandemic. *Build. Environ.* 193, 107659. [doi: 10.1016/j.buildenv.2021.107659](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107659).
- [10] Arikani, I., Genc, Ö., Uyar, C., Tokur, M. E., Balci, C., Renders, D. P. (2022). Effectiveness of air purifiers in intensive care units: an intervention study. *J. Hosp. Infect.* 120, 14-22. [doi: 10.1016/j.jhin.2021.10.011](https://doi.org/10.1016/j.jhin.2021.10.011).
- [11] Leslie, E., Hinds, J., Hai, F. I. (2021). Causes, factors and control measures of opportunistic premise plumbing pathogens – a critical review. *Appl. Sci.* 11, 1-27. [doi: 10.3390/app11104474](https://doi.org/10.3390/app11104474).
- [12] Latva, M., Inkinen, J., Rämö, J., Kaunisto, T., Mäkinen, R., Ahonen, M., et al. (2016). Studies on the magnetic water treatment in new pilot scale drinking water system and in old existing real-life water system. *J. Water Process Eng.* 9, 215-224. [doi: 10.1016/j.jwpe.2016.01.009](https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2016.01.009).
- [13] Finnish Building Information Foundation RTS sr. (2021). Hygiene in indoor spaces. General principles. RT 103191 en. 1-9. <https://www.rakennustieto.fi/en>.
- [14] Finnish Building Information Foundation RTS sr. (2021). Hygiene in indoor spaces. Spatial planning. RT 103192 en. 1-10. <https://www.rakennustieto.fi/en>.
- [15] Finnish Building Information Foundation RTS sr. (2021). Hygiene in indoor spaces. Cleaning and maintenance. RT 103193 en. 1-11. <https://www.rakennustieto.fi/en>.

Sisätilan hygienia arjessa

Riika Mäkinen, FT, erikoistutkija, riika.makinen@samk.fi

Sisäympäristöjen hyvähygieniakoostuusesta tekijästä. Hygieenisten ja terveellisten sisätilojen perusedellytyksiä ovat puhdas käyttövesijärjestelmä (verkosto ja hanat), sisäilma (ilmanvaihto, rakenteet) ja pinnat (tasot, kaiteet jne.). Erilaisilla rakennuksilla ja käyttäjäryhmillä on omat hygieniatarpeensa ja -haasteensa. Hygieniaratkaisut ja antimikrobiset tuotteet tuovat eniten lisäarvoa tiloissa, joissa on paljon ihmisiä, sekä käyttäjille, joiden vastustuskyky on heikentynyt (vanhukset, sairaat) tai ei ole vielä kehittynyt (lapset).

Tutkimuskeskus WANDERissa on jo pitkään tutkittu ratkaisuja, jotka parantavat juomaveden, sisätilan pintojen ja sisäilman mikrobiologista puhtautta. Sisätilan hygienia on kokonaiskonsepti, jonka avulla torjutaan infektioiden leviämistä rakennetussa ympäristössä. Konseptia on kehitetty jo lähes 10 vuotta. Sisäympäristön hygieniaan liittyvä tutkimusjatkumo on kehittynyt yksittäisten tuotteiden testauksesta kohti konseptin kehittämistä, liiketoimintamahdollisuuksien tunnistamista ja markkinan luomista. Sisätilan hygieniakonseptia on käsitelty laajemmin tämän julkaisun artikkelissa Tartuntojen ehkäisy sisäympäristössä ja julkaistussa tieteellisessä artikkelissa [1]. Kuvassa 1 on esitetty sisätilan hygienian kokonaiskonsepti.



Kuva 1. Sisätilan hygienian kokonaiskonseptin muodostuminen.

Tässä artikkelissa esitellään Tutkimuskeskus WANDERin tekemiä käytännön toimenpiteitä, jotka tuovat sisätilan hygienian lähemmäksi ihmisten arkea sekä pyrkivät lisäämään ihmisten tietoisuutta ja ymmärrystä tarttuvien tautien leviämisestä ja sen ehkäisystä. Artikkelissa kuvattu työ on tehty osana muun muassa seuraavia tutkimuksia: Tekesin rahoittamat Hygtech 1 ja Hygtech 2; Satakuntaliiton rahoittamat HygLi, SIHI ja ARPO; Interreg-rahoitettu IHMEC; OKM:n rahoittama HEAL; ja Horizon Europa -rahoitettu STOP. Tutkimuksista löytyy lisätietoa WANDERin sivuilta: <https://www.wander.fi/projektit/>.

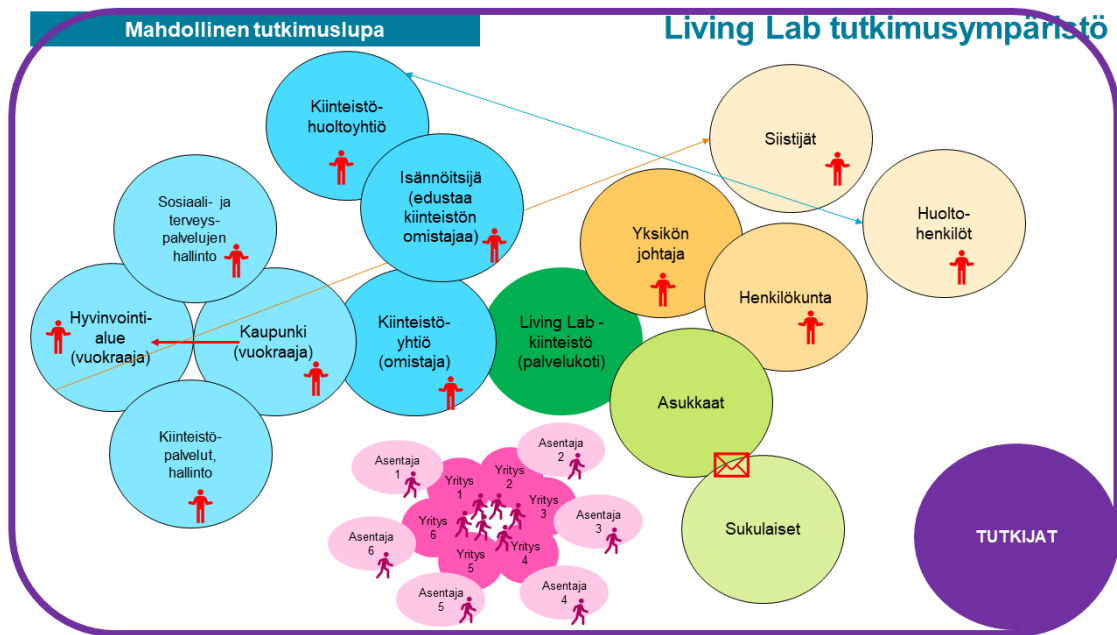
Sisätilan hygienia ja Living Lab

WANDER on alusta lähtien tutkinut sisätilojen mikrobiologiaa ja hygieniaa käyttövesissä, pinnoilla ja sisäilmassa täyden mittakaavan pilottikohteissa Living Lab -teeman mukaisesti. Living Lab eli elävä laboratorio tarkoittaa sitä, että tutkimus viedään laboratorioympäristöstä oikeaan ihmisten käyttämään ympäristöön. Tähän mennessä WANDERin tutkimusten Living Lab -kohteina ovat olleet muun muassa toimistokiinteistö, ikäihmisille suunnattu vuokrakerrostalo, omakotitalo, päiväkotit, toisen asteen koulu ja sairaalaosasto. [2] Parhailaan tutkimuksia tehdään päiväkodissa, alakoulussa ja kahdessa vanhusten palvelutalossa.

Living Lab -tutkimusympäristö

Sisätilan hygienian Living Lab -tutkimusympäristö toimii tutkimusalustana sekä ympäristö- että vaikuttavuustutkimuksissa. Tilaajalle on osoitettava ratkaisujen toimivuus, vaikutus ja kustannustehokkuus. Lisäksi Living Lab -tiloissa sisätilan hygieniata edistävät tuotteet ja ratkaisut voidaan esitellä sekä tilaajalle että käyttäjälle.

Living Lab -tutkimuskohteen kokoaminen vaatii aikaa, kärsivällisyyttä ja lukemattomia tapaamisia eri tahojen kanssa. Alla kuvassa 2 on yksi luonnostelma kaikista niistä tahoista, joita tosielämän tutkimusympäristön toteuttaminen koskettaa. Kaikki nämä tahot on kohdattava tutkimuksen toteutumisen varmistamiseksi. Kuulostaa itsestäänselvyydeltä ja naiivilta, mutta lisäksi on hyvä pyrkiä kohtaamaan nämä tahot nöyrän positiivisella asenteella. Tutkimusympäristön toteuttaminen vaatii usein eri tahoilta, esimerkiksi tilojen käyttäjiltä, muun muassa ensin mahdollisten muutostöiden ja myöhemmin tutkijoiden suorittamien näytteenottojen sietokykyä. Useimpia myös kiinnostaa tiloissa tapahtuvat tavallisuudesta poikkeavat toimenpiteet ja tutkijoilla onkin hyvä olla valmius kuvata tutkimusta kysyjälle soveltuvalla tarkkuudella. Liian tieteellinen jargon ei palvele ketään.



Kuva 2. Tahot, joita Living Lab -tutkimusympäristön toteuttaminen koskettaa.

Tutkimuskeskus WANDER, ja useimmiten myös tutkimuksissa mukana olevien sisätilan hygieniää edistävien tuotteiden ja ratkaisujen valmistajat ja/tai toimittajat ovat lisäksi erityisen kiinnostuneita loppukäyttäjien kokemuksista. Jos tuote tai ratkaisu ei ole käytettävä, sitä ei käytetä. Yksi tutkimuksen tärkeä tavoite onkin kuvata ja arvioida tutkimuskohteena olevan kiinteistön käyttäjien kokemuksia, toiveita ja vaikutuksia koskien sisätilan hygieniää edistäviä tuotteita ja ratkaisuja. Pukaralammin [3] tekemä opinnäytetyö aiemman Hygtech-tutkimuksen [2] osana on hyvä esimerkki tällaisesta käyttäjälähtöisestä selvityksestä.

Sisätilan hygienia julkisessa rakentamisessa

Tutkimuskeskus WANDERin tekemä tutkimus on aina ollut soveltavaa ja käyttäjää lähellä; yhtenä esimerkkinä voidaan mainita rakennusalalle kirjoitetut Hygienia sisätiloissa RT-ohjeet, jotka ovat merkittävästi edesauttaneet sisätilan hygienian jalkauttamista rakentamiseen [4–6]. Suomalaisten yritysten vientiponnisteluja on auttanut taas se, että kyseiset RT-ohjeet on käännetty myös englanniksi. Sisätilan hygienia ja infektioiden leviämisen estäminen kiinnostaa, erityisesti globaalin koronapandemian jälkeen.

Rakennustiedon toimikuntatyönä kirjoitetut RT-ohjeet tekevät hygieniakysymykset näkyväksi ja auttavat merkittävästi, kun esitellään uusia sisäympäristön hygienian innovaatioita perinteisesti melko konservatiiviselle rakennusalalle. Ohjeet ovat

saatavilla Rakennustiedon verkkokaupassa: www.rakennustietokauppa.fi

RT 103191 Hygienia sisätiloissa. Yleiset perusteet.

RT 103192 Hygienia sisätiloissa. Tilasuunnittelu.

RT 103193 Hygienia sisätiloissa. Siivous ja huolto.

RT 103191 en Hygiene in indoor spaces. General principles.

RT 103192 en Hygiene in indoor spaces. Spatial planning.

RT 103193 en Hygiene in indoor spaces. Cleaning and maintenance.

Hygienia sisätiloissa -ohjeiden tavoite on lisätä rakennusalan tietoisuutta hygienian merkityksestä sisätiloissa. Rakennusten sisätiloissa hygienian eli mikrobiologisen puhtauden parantaminen on merkittävä keino estää infektioiden leviämistä. Hygienia käsitteenä ei enää rajoitu vain terveydenhuoltoon ja sairaaloihin, esimerkiksi käsihygienia on jo kaikille tuttu termi. Hyvällä hygienialla on merkitystä kaikille niin päiväkodeissa, kouluissa, uimahalleissa kuin omassa keittiössä. Ohjeissa esitetään rakennustyyppejä ja rakennusten sisätiloja, joissa hygieniaa parantavat ratkaisut ovat järkeviä ja kustannustehokkaita. Jos esimerkiksi päiväkodeissa saadaan vähennettyä infektioiden leviämistä, saadaan samalla vähennettyä henkilökunnan ja lasten sairauspoissaoloja ja edelleen vanhempien poissaoloja töistä.

Hygienian näkökulma on hyvä ottaa esiin jo rakennushankkeen tarveselvitysvaiheessa. Arkkitehti-, sisustus- ja talotekniikkasuunnittelussa voidaan tehdä ratkaisuja, joilla hygieniaa voidaan parantaa. RT-ohjeet soveltuvat sekä uudis- että korjausrakentamiseen. Terveellisen sisäympäristön kokonaisuuden kannalta pelkästään suunnitteluratkaisujen käyttö ei kuitenkaan riitä. Myös sisätilojen siivouksella ja huollolla sekä käyttäjien toiminnalla ja käsihygienialla on suuri merkitys.

Tietoisuuden lisääminen

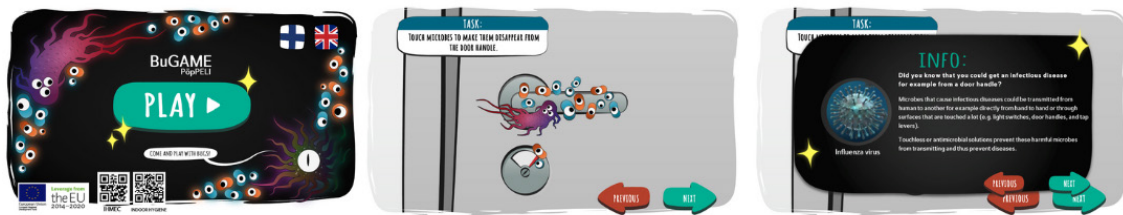
Tärkeä osasisätilanhygienianjalkauttamisessa ihmisten arkeen on yleisen tietoisuuden lisääminen. Edellä mainitut RT-ohjeet ovat yksi esimerkki yleisen tietoisuuden lisäämisestä, erityisesti rakennusosalalle. Monissa WANDERin tutkimuksissa on pyritty tiedottamaan sisätilan hygieniasta kansantajuisesti eri kohderyhmille. Alla on mainittu ja kuvissa 3–6 on esitetty joitakin esimerkkejä tiedottamisesta.

Sisätilan hygienian aakkoset -opas, jossa esitellään sisätilan hygienian ideologia ja edellä mainittujen RT-ohjeiden sisältöä, julkaistiin osana Satakuntaliiton EAKR-rahoittamaa Hygieniasta liiketoimintaa – HygLi -kehittämistyötä. [7]. WANDERin asiantuntijat ovat olleet mukana kirjoittamassa myös muita hygieniaoppaita [8–9].

Mukava esimerkki jalkauttamisesta on sairaalan lastenpäivystyksen osastolle rakennettu pöpönäyttely ja PöpPeli-niminen mobiilipeli, joka oli pelattavissa odotustilassa olevan pelipäätteen kautta. Tarkoitus oli lisätä erityisesti alakouluikäisten lasten ja heidän vanhempiensa tietoisuutta sisätilan hygieniasta. Tämä työ tehtiin osana Satakuntaliiton rahoittamaa Sisätilan hygienian innovaatiotila – SIHI -tutkimusta. Pöpönäyttely ja PöpPeli näkyvät kuvassa 3.



Kuva 3. Pöpönäyttely sairaalan lastenpäivystyksessä, PöpPeliä pelataan SuomiAreenan kansalaistorilla 2019, yksi pelin kehittäjistä WANDERin erikoistutkija Riika Mäkinen PöpPelin äärellä.

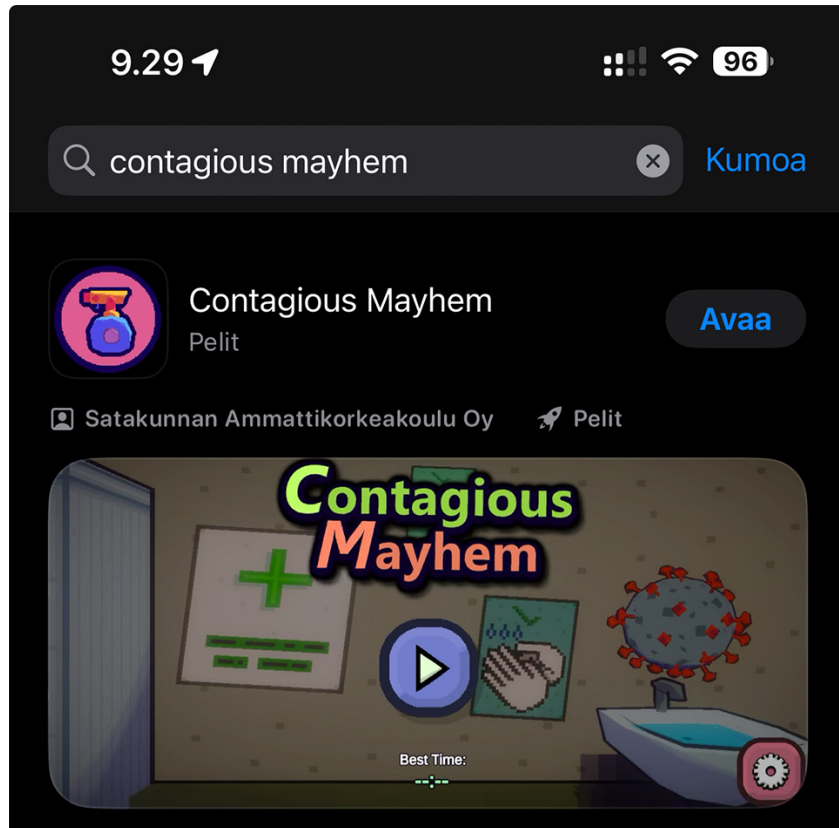


Kuva 4. Pelinäkymiä PöpPeli:stä, joka on tarkoitettu alakouluikäisille. Peli löytyy suomeksi, englanniksi ja arabiaksi.

Meneillään olevassa ARPO – Antimikrobisten ratkaisujen vaikutukset Rauman Pohjoiskehän koulussa -selityksessä (1.11.2022 – 31.8.2024, Satakuntaliitto AKKE) on suunnitteilla ja jo pitkälle työstetty alakouluikäisille (n. 5. lk) suunnattu sisätilan hygienian koulutuspaketti. Paketti kantaa nimeä Pöpöviisas koulu ja se sisältää kirjallista materiaalia (esim. muistipeli, esite, pöpöjen henkilökortit), materiaalia opettajalle, näytteenottoihin yksinkertaisille luokassa normaalioloissa tehtäville mikrobiologisille näytteenotoille ja myös esimerkiksi appikaupoista saatavan mobiilipelin (Contagious Mayhem, Tarttuva sekasorto). Koulutuspaketin laajempi tavoite on olla pieni osa soveltuvan vuosikurssin opetusta, ensin Pohjoiskehän koulussa Raumalla ja seuraavissa vaiheissa muissa kouluissa Raumalla, Satakunnassa, Suomessa, globaalisti... Hygieniakasvatus on tärkeää kaikille kaikkialla. Pöpöviisas koulu näyttäytyy kuvissa 5 ja 6.



Kuva 5. Pöpöviisas koulu, visuaalinen ilme ja hahmot vasemmalta oikealle: Niki Norovirus, Rilla Rinovirus ja Lennu Legionellabakteeri.



Kuva 6. Näkymä *Contagious Mayhem* -pelistä Applen App Storessa.

Mitä seuraavaksi?

Työ sisätilan hygienian arkipäiväistämiseksi jatkuu. WANDERin lähitulevaisuuden tutkimukset sisältävät edelleen sisätilan hygieniää, esimerkiksi Horizon Europe -tutkimuksessa (STOP) tarkoitus on viedä uusia antimikrobisia pinnoitteita Living Lab -ympäristöön. Tutkimuskeskus WANDERin tavoite on se, että sisätilan hygienia eli rakennetun ympäristön hyödyntäminen tarttuvien tautien ehkäisyssä on joku päivä aivan itsestään selvää ja oletus. Kannattaa seurata, kuinka käy. Pysy kuulolla!

Lähteet

- [1] Salonen, N., Ahonen, M., Sirén, K., Mäkinen, R., Anttila, V-J., Kivisaari, M., Salonen, K., Pelto-Huikko, A., Latva, M. (2023) Methods for infection prevention in the built environment—a mini-review. *Front. Built Environ. Sec. Indoor Environment*. Volume 9 - 2023. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1212920>.
- [2] Ahonen, Merja et al. (2015). Ratkaisuja sisäympäristöjen hygienian hallintaan: hankkeen loppuraportti. Satakunnan ammattikorkeakoulu. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201505086916>.
- [3] Pukaralammi, Silja-Maria (2013). Kiinteistöjen hygieniakonsepti HYGTECH: pilottituotteiden käyttäjät päiväkotia Petäjässä. Satakunnan ammattikorkeakoulu

2013. Terveystiedon edistämisen koulutusohjelma Ylempi AMK. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2013100915963>.

- [4] RT 103191 Hygienia sisätiloissa. Yleiset perusteet. (2020). Rakennustietosäätiö.
- [5] RT 103192 Hygienia sisätiloissa. Tilasuunnittelu. (2020). Rakennustietosäätiö.
- [6] RT 103193 Hygienia sisätiloissa. Siivous ja huolto. (2020). Rakennustietosäätiö.
- [7] Mäkinen, R., Mäkitalo-Keinonen, T. (2018) Sisätilan hygienian aakkoset. Satakunnan ammattikorkeakoulu. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-633-254-6>.
- [8] Valkosalo T, Koskinen M, Mäkinen R, Lantea S, Särkijärvi S, Välikylä T. (2020). Kodinomaista palveluasumista hygieenisesti. Ympäristökustannus Oy. ISBN 978-952-9637-63-8.
- [9] Koskinen, M., Lähdeaho, E. et al. (2023) Allas- ja märkätilojen siivous ja hygieniaopas. Ympäristökustannus Oy. ISBN: 978-952-9637-68-3 (Riika Mäkinen yhtenä kirjoittajana).

Sisäympäristön hygienian huomioiminen osana laivanrakennusta – Rakennetulla ympäristöllä voidaan vähentää infektioiden leviämistä myös aluksilla

Sari Repka, PhD, erikoistutkija, sari.repka@samk.fi

Tutkimuskeskus WANDER on tutkinut sisäympäristön hygieniää useiden vuosien ajan kiinteistörakentamisessa ja myös laivanrakennusta on syytä tarkastella. Infektiot ovat vakava terveysriski paikoissa, joissa on paljon ihmisiä kuten risteilyaluksilla. Risteilyaluksen mediaanimatkustaja on yli 45-vuotias ja monella on kroonisia sairauksia, joten on tärkeää, että risteilykokemus on turvallinen ja kaikki mahdollisuudet taudinaiheuttajan leviämisen minimoimiseksi käytetään. Suurin osa risteilyalusten infektiosta on hengitystieinfektioita ja ruoansulatuskanavan infektiota [1] Jos laivalle pääsee infektion aiheuttaja, se voi helposti levitä koko aluksella ja aiheuttaa merkittävää sairastuvuutta.

Epidemiat risteilyaluksilla aiheuttavat terveysriskin, kustannuksia ja imagomenetyksiä, joita on vaikea hallita ja ennaltaehkäistä perinteisillä ratkaisuilla. Infektioiden vähentäminen aluksilla auttaa ihmisten pysymistä terveenä, lisää kannattavuutta ja risteilyjen houkuttelevuutta. Vaikka tässä puhutaan risteilyaluksista, samoja ratkaisuita voidaan soveltaa myös muihin aluksiin. Myös rahtialusten miehistön pitäminen terveenä on ensiarvoisen tärkeää.

Laivojen terveysturvallisuus

Perinteisesti terveysturvallisuutta laivoilla on parannettu esim. ohjeistamalla henkilökuntaa ja matkustajia hyvistä hygieniakäytännöistä, tehostetulla siivouksella ja hyvällä ilmanvaihdolla. Sisätilan hygienia eli infektioiden torjunta ja hallinta rakennetun ympäristön avulla ei ole vielä kovinkaan yleistä laivoissa. Osin tämä johtuu siitä, että laivojen elinkaari on pitkä ja asia on vielä melko uusi. Sisätilan hygieniaa parantavista ratkaisuista tulee myös lisäkustannuksia, ja erityisen kallista ja hankalaa olisi niiden jälkiasennus vanhoihin aluksiin.

Laivanrakennusalalle tarvitaan uusi sisäympäristön hygienian näkökulma suunnitteluun sekä yhteistyötä yritysten kanssa, jotka tuottavat sisäympäristön hygieniaa parantavia tuotteita ja ratkaisuja. Perinteisten keinojen lisäksi uudet teknologiat tarjoavat uudenlaisia mahdollisuuksia parantaa terveysturvallisuutta tehokkaasti. Yleisesti ottaen ne voidaan jakaa kolmeen ryhmään: ilman, veden ja pintojen kautta välittyvien taudinaiheuttajien torjuntaan (kuva 1, [2], [3]). Hygieenisten laivojen kokonaisratkaisu koostuu sisäilman, juomaveden, kosketuspintojen ja ihmisten liikkumisen ymmärtämisestä ja huomioimisesta (kuva 1). Esimerkkeinä näistä ratkaisuista ovat ilmanpuhdistimet, kosketusvapaat hanat sekä erilaiset mikrobeja torjuvat pinnoitteet. Niiden käyttöönotto tulisi tapahtua jo laivan suunnittelusta lähtien ja jatkua koko elinkaaren ajan. Sisäympäristön hygienian huomioiminen tulisi nostaa laivanrakennuksen suunnittelu- ja rakentamisvaiheeseen sekä käyttöön että ylläpitoon.

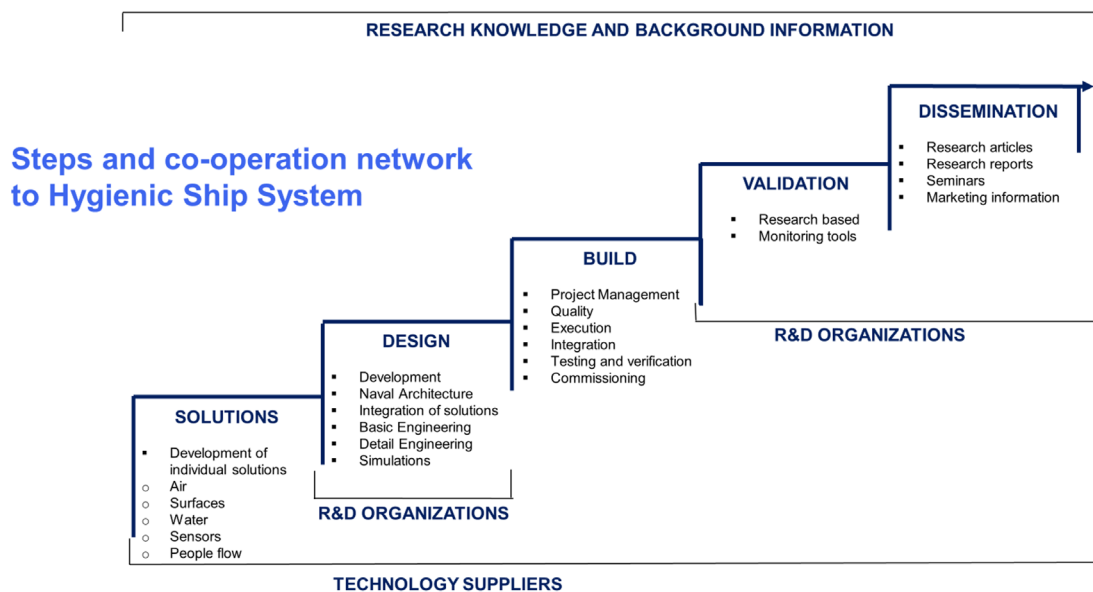


Kuva 1. Hygieenisten laivojen kehittämiseen liittyvä ekosysteemi

Oppia kiinteistörakentamisesta

Kiinteistörakentamisessa sisäympäristön hygienian huomioimiseen on yhteistyössä Rakennustieto Oy:n kanssa laadittu hygieenisen sisäympäristön suunnitteluohjeistus, jota voidaan hyödyntää kiinteistön hankevalmistelussa, suunnittelussa sekä myös elinkaaren aikana (Ks. [4]).

Kiinteistörakentamisesta saatujen kokemusten myötä on todettu, että tehokkainta on todennetusti toimivan sisätilan hygieniää parantavan kokonaisratkaisun asentaminen uudisrakennuksiin. Lisäksi tämä kokonaisratkaisu pitää suunnitella saumattomasti toimivaksi konseptiksi. Lienee selvää, että samat periaatteet toimisivat parhaiten myös risteilyaluksilla. Näitä tavoitteita edistettiin Tutkimuskeskus WANDERin TERVA eli terveelliset vesiliikenteen alukset -hankkeessa. Kuvassa 2 esitellään TERVA-hankkeessa suunniteltu sisätilan hygienian kokonaiskonsepti laiva-alalle. Sisätilan hygieniakonseptin periaatteita on käsitelty laajemmin tämän julkaisun artikkelissa [2] ja aiheesta julkaistussa tieteellisessä artikkelissa [3].



Kuva 2. Laivojen sisätilan hygienian kokonaiskonseptin käyttöönoton askeleet ja yhteistyöverkosto.

Terveysturvallisuus-ajattelu mukaan jo laivan rakennusvaiheeseen

Laivojen rakentamisen säätely ja hallinta toimii eri tavalla kuin kiinteistörakentamisessa. Siihen liittyvät tärkeimmät toimijat löytyvät kuvasta 1. Laivanrakennuksen ekosysteemiin kuuluu osin samoja toimijoita kuin kiinteistörakentamisessa kuten suunnittelutoimistoja, mutta esim. luokituslaitokset ovat laivanrakennukselle tyypillisiä. Vaikka toimijoilla on toisistaan poikkeavat mahdollisuudet vaikuttaa sisätilan hygienian ottamiseen osaksi laivanrakennusta, kaikkien osallistumista ja motivointia tarvitaan, jotta saadaan paras mahdollinen lopputulema sisätilan hygienian suhteen laiva-alalla. Asia on myös sangen konservatiivisella alalla uusi ja tietoa ratkaisuista sekä yleistä tietoisuuden levittämistä tarvitaan.

Luokituslaitokset valvovat laivanrakentamiseen liittyviä sääntöjä ja ovat siten tärkeä osa myös sisätilan hygienian kehittämisessä. Täytyy kuitenkin ymmärtää, että koska virallisia sääntöjä ja määräyksiä laivojen terveysturvallisuuteen tällä tasolla ei ole, asian edistäminen on vapaaehtoista, eikä siis kuulu luokituslaitosten ydintoimintaan, ellei asiakas sitä vaadi. Osalla luokituslaitoksista on kuitenkin jo epävirallinen sertifikaatti liittyen terveysturvallisuuteen, esim. Det Norske Veritas (DNV) [5]. Nämä sertifikaatit koskevat kuitenkin enemmän laivan operoinnin aikaista terveysturvallisuutta kuten siivoamista ja käsien pesua kuin laivan rakentamista.

Vapaaehtoisuudesta johtuen terveysturvallisuuden edistäminen rakennetun ympäristön avulla on lopulta aluksen tilaajan käsissä. Vaikka virallista säätelyä terveysturvallisuuden huomiointiin kokonaisvaltaisesti ei ole, mikään ei tietenkään estä tilaamasta laivaa, jossa tällainen uusi konsepti on huomioitu. Hygieniia parantavat ratkaisut ovat jonkin verran kalliimpia kuin perinteiset, mutta yleisesti ottaen ajatellaan, että ne maksavat itsensä takaisin esimerkiksi vähentyneinä sairauskuluina, epidemioina sekä asiakkaiden luottamuksena. Risteilyaluksille rakennetaan paljon muitakin rakenteita houkuttelemaan asiakkaita, miksei siis myös terveysturvallisuutta kannattaisi huomioida vielä nykyistä enemmän. Hygieenisten ratkaisuiden kustannustehokkuutta ei ole kuitenkaan riittävän selkeästi osoitettu puolueettomissa tieteellisissä tutkimuksissa, joten lisätutkimusta tähän tarvitaan.

Mukana laivanrakentamisen säätelyssä on myös muita viranomaisia, lainsäätäjiä ja rahoitusinstituutioita (kuva 1) mutta ne pohjaavat toimintansa vahvasti olemassa olevaan sitovaan säätelyyn. Toinen; erittäin pitkä tie olisi saada kansainvälisen

merenkulkujärjestön kautta asiaan sitovaa sääntelyä laivojen terveysturvallisuuden parantamiseksi, ja sen voisivat myös Suomen viranomaiset halutessaan nostaa agendalle. Tämä vaatisi kuitenkin sisätilan hygieniää parantavia ratkaisuja toimittavilta yrityksiltä selkeästi käytännön elämässä toimivia ratkaisuita eli ns. tosielämän pilotteja, joissa Tutkimuskeskus WANDERilla on osaamista kiinteistörakentamisessa [4]. Toistaiseksi ei ole tiedossa yhtään tosielämän sisätilan hygienian pilottia merenkulkualalta. Voidaan siis sanoa, että tässä vaiheessa vapaaehtoisuuteen perustuva malli on hyvä, koska tutkittua tietoa on vielä liian vähän.

Kokonaisvaltaisen terveysturvallisuuskonseptin tuominen meriteollisuudessa keskiöön voisi saada tukea alan toimijoiden lisäksi myös suurelta yleisöltä eli potentiaalisilta risteilymatkailijoilta. Covid-19-pandemia herätti ihmisiä sisätilan hygienian tärkeyteen, mutta se on jo ehkä jossain määrin unohtunut ihmisten mielissä. Toisaalta uusia pandemioita tulee myös tulevaisuudessa ja esimerkiksi norovirus on yleinen ongelma myös risteilyillä. Tarvitaan lisää yleistä informaatiota ja mielipiteenmuokkausta tästä jokaiselle laivamatkustajallekin tärkeästä asiasta, jotta voidaan käyttää parhaita menetelmiä sisätilan hygienian parantamiseen myös merenkulkualalla.

Tulevaisuus

Tällä hetkellä kehitetään paljon uusia laivakonsepteja uusien vähähiilisten polttoaineiden ympärille. Tällaisiin uusiin projekteihin olisi hyvä ottaa heti mukaan myös terveysturvallisuus. Onkin siis tärkeää lisätä tietoisuutta uudentlaisista sisätilan hygieniää parantavista ratkaisuista sekä niiden tarjoamista uusista liiketoimintamahdollisuuksista. Sisäympäristön hygienia voisi nousta yhdeksi kilpailuvaltiksi ja erikoistumisalaksi suomalaisessa laivanrakennusteollisuudessa ja alaan liittyvissä muissa yrityksissä.

Tutkimuskeskus WANDERissa on yhdessä ratkaisuita toimittavien yritysten kanssa työstetty kokonaiskonsepteja, joka voidaan ottaa liittämään osaksi uusien laivojen suunnittelua (Kuva 2, [6]). Työtä jatketaan tarkoituksena saada testattua näitä konsepteja tosielämän tilanteissa ja saada näin konkreettisesti määritettyä niiden kustannustehokkuus. Yritämme paraikaa rakentaa uutta hanketta yhteistyössä varustamoiden ja laivanrakentajien kanssa tosielämän pilotille risteilyaluksessa.

Lähteet

- [1] Kak, V. (2015) Infections on Cruise Ships. Microbiol Spectr 2015 Aug, 3, (4) [doi: 10.1128/microbiolspec.IOL5-0007-2015](https://doi.org/10.1128/microbiolspec.IOL5-0007-2015).
- [2] Salonen, N. (2024) Tartuntojen ehkäisy sisäympäristössä, tässä julkaisussa.
- [3] Salonen, N., Ahonen, M., Sirén, K., Mäkinen, R., Anttila, V-J., Kivisaari, M., Salonen, K., Pelto-Huikko, A., Latva, M. (2023) Methods for infection prevention in the built environment—a mini-review. Front. Built Environ. Sec. Indoor Environment. Volume 9 - 2023. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1212920>.
- [4] Mäkinen, R. (2024) Sisätilan hygienian jalkauttaminen tosielämään, tässä julkaisussa
- [5] DNV – Certification services in infection prevention and control. <https://www.dnv.fi/services/certification-services-in-infection-prevention-and-control-176861>.
- [6] Sisätilan hygienian virtuaalinen innovaatioalusta laivaympäristössä. <https://youtu.be/iYL8obtKsl8?si=iTHwIaxEpyc9fql>.

Antimikrobiset pinnat infektioidentorjunnan tukena

Merja Ahonen, FT, johtava tutkija (sisätilan hygienia), merja.ahonen@samk.fi

Koronapandemian seurauksena erilaisten antimikrobisten pintojen käyttö sisätiloissa on lisääntynyt. Niiden avulla pyritään estämään pintojen kautta tarttuvien infektioiden leviämistä tavanomaisten infektioidentorjunnan käytänteiden kuten siivouksen, desinfektion ja käsihygienian lisänä. Tauteja aiheuttavat mikrobit voivat olla vaarallisia erityisesti riskiryhmiin kuuluville ihmisille, esimerkiksi vanhuksille ja pienille lapsille, ja heille, joilla on joitakin perussairauksia. Antimikrobisten pintojen ja pinnoitteiden käyttö osana sisätilan hygienian kokonaiskonseptia on hyödyllisintä julkisissa tiloissa, joissa on paljon käyttäjiä kuten julkisessa liikenteessä, liikenteen solmukohdissa, kauppakeskuksissa ja terveydenhuollossa. Mahdollisia sovelluskohteita ovat usein kosketut kovat pinnat ja tekstiilit, esimerkiksi tukikaiteet, kahvat, kalusteet sekä julkisten wc-tilojen kosketuspinnat. Sisätilan hygieniakonseptia on käsitelty laajemmin tämän julkaisun artikkelissa Tartuntojen ehkäisy sisäympäristössä, sivulta 8 alkaen.

Antimikrobisten pintojen kestävä käyttö edellyttää niiden hyötyjen ja haittojen arviointia ihmisten terveyden ja ympäristön kannalta. Tässä artikkelissa näkökulmana on erityisesti Tutkimuskeskus WANDERissa tehty ja meneillään oleva tieteellinen tutkimus antimikrobisiin pintoihin liittyen. Kahdentoista vuoden aikana WANDERin tutkijat ovat osallistuneet useisiin kansallisiin ja kansainvälisiin hankkeisiin, joissa antimikrobisia pintoja on tutkittu monesta näkökulmasta sekä laboratorio-olosuhteissa että aidoissa käyttöolosuhteissa.

Vaikutusmekanismit

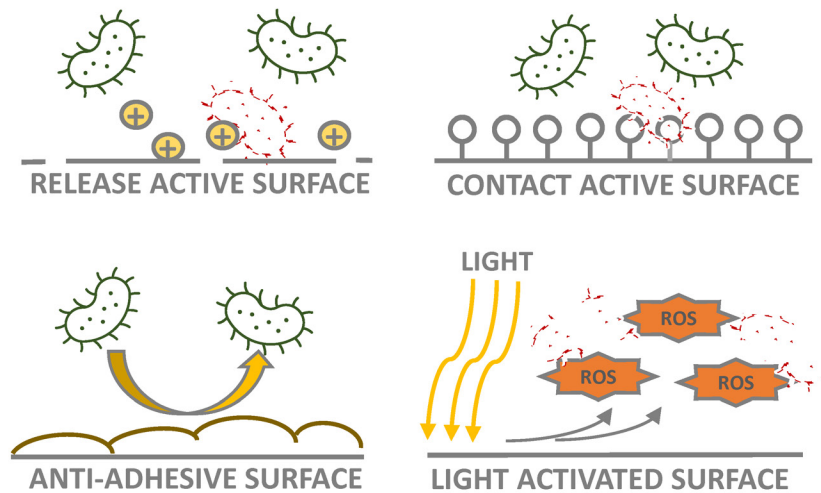
Kupariin ja hopeaan perustuvat antimikrobiset pinnat ovat tunnetuimpia. Tällä hetkellä hopean antimikrobisiin ominaisuuksiin perustuvat pinnat ovat ylivoimaisesti eniten tutkittuja ja käytettyjä, ja seuraavaksi eniten tutkitaan titaaniin, kupariin, sinkkiin, kitosaaniin ja kvaternaariisiin ammoniumyhdisteisiin perustuvia pintoja. Antimikrobisia pintoja käytetään sisätilan hygieniaratkaisujen lisäksi myös mm. biolääketieteessä,

meriteollisuudessa, elintarviketeollisuudessa ja tekstiiliteollisuudessa [1].

Antimikrobiset pinnat **tuhoavat tai hylkivät mikrobeja** erilaisiin mekanismeihin perustuen. Vaikutusmekanismit voidaan jaotella neljään ryhmään (Kuva 1):

1. antimikrobista ainetta vapauttavat (esim. kupari, hopea),
2. kosketuksesta mikrobeja tuhoavat (esim. kitosaani, kvaternaariset ammoniumyhdisteet),
3. mikrobien kiinnittymistä estävät (esim. pinnan rakenne tai hydrofobisuus), ja
4. fotokatalyyysillä mikrobeja tuhoavat (mm. titaanioksidi + valo).

Antimikrobisen ominaisuuden sisältävä tuote voi sisältää vaikuttavia aineita useammasta mainitusta ryhmästä, jolloin sen ajatellaan vahvemmin estävän mikrobien resistenssiominaisuuksien kehittymistä [2].



Kuva 1. Neljä antimikrobista vaikutusmekanismia. 1) Antimikrobista ainetta, esimerkiksi metalli-ioneja kuten hopeaa tai kuparia vapauttava pinta. 2) Antimikrobinen aine on kiinnitetty pysyvästi pintaan (esim. kovalenttisesti sidotut kvaternääriset ammoniumyhdisteet) ja se vaikuttaa antimikrobisesti mikrobien joutuessa läheiseen kosketukseen pinnan kanssa. 3) Mikrobeja ja likaa hylkivä pinta (esim. superhydrofiilinen polyetyleeniglykoli) estää mikrobien tarttumisen ja kerääntymisen pinnalle. 4) Valolla aktivoitava antimikrobinen materiaali (esim. titaanidioksidi) tuhoaa mikrobeja tuottamalla reaktiivisia happiradikaaleja tietyillä valon aallonpituuksilla. [2]

Tehokkuus laboratorio-olosuhteissa

Antimikrobisten pintojen ja pinnoitteiden tehokkuus osoitetaan laboratorio-olosuhteissa käyttäen standardin mukaista testausta. Laboratoriotestien lisäksi tuotteen teho on syytä osoittaa myös tulevaa käyttöä vastaavissa olosuhteissa huomioiden mm. lämpötilan ja kosteuden sekä kemiallisen ja mekaanisen kulutuksen vaikutuksen. Laboratoriotestejä erilaisilla antimikrobisilla tehoaineilla on tehty runsaasti [3-5].

Tutkimuskeskus WANDER on mukana suomalaisessa ja kansainvälisessä **standardointityössä** ja kuuluu Yhteisen toimialaliiton standardointiryhmään (Yhteinen toimialaliitto ry, YTL). Suomessa SFS (Suomen standardoimisliitto SFS ry) toimii standardoinnin keskusjärjestönä ja on maailmanlaajuisen järjestön ISO:n (International Organization of Standardization) jäsen. Käytännön standardointityötä tehdään SFS:n ja eri toimialoja edustavien organisaatioiden eli toimialayhteisöjen ryhmissä. Standardointiryhmät seuraavat alansa eurooppalaista ja maailmanlaajuisia standardointia ja osallistuvat niiden kommentointiin ja laadintaan.

YTL:n ”Hygieniaratkaisut”-standardointiryhmässä WANDER on erityisesti mukana kansainvälisessä komiteassa ISO/TC 330 ”Surfaces with biocidal and antimicrobial properties”, jossa kehitetään standardoitua menetelmää antimikrobisten pintojen tehon määrittämiseen **todellisia käyttöä vastaavissa olosuhteissa**. WANDER on myös osallistunut ns. Ring Trial kokeisiin, joissa standardia testataan laboratorio-olosuhteissa. Näin löydetään parhaiten standardiin liittyvät haasteet ja varmistetaan laadittavan standardin toimivuudesta todellisissa olosuhteissa.

Tehokkuus pilottikohteissa

Tällä hetkellä on kovin vähän todellisissa käyttöolosuhteissa tehtyjä tutkimuksia, joissa voidaan osoittaa infektioiden väheneminen [6]. Tutkimuskeskus WANDERissa on käynnissä kaksi hanketta, joissa tutkitaan antimikrobisten pintojen tehokkuutta **infektioiden vähentäjänä** pilottikohteissa sekä pohditaan pintojen **kustannustehokkuutta ja turvallisuutta**. Vuoden 2022 alussa käynnistyneessä Opetus- ja kulttuuriministeriön rahoittamassa **HEAL**-hankkeessa (Healthier Life with Comprehensive Indoor Hygiene Concept) pilottikohteina on neljä vanhusten palveluasumisen yksikköä ja kaksi päiväkotiryhmää Satakunnassa. Verrokkitiloissa on tavanomaiset pintamateriaalit ja interventioryhmissä hyödynnetään antimikrobisia pintoja osana sisätilan hygieniakonseptia (<https://www.wander.fi/projektit/heal/>).

Syyskuussa 2022 käynnistyneessä **STOP**-hankkeessa (Surface Transfer of Pathogens) kehitetään uusia nanopinnoitteita vähentämään ja estämään tautia aiheuttavien mikrobin siirtymistä pintojen kautta henkilöltä toiselle. Hanke rahoitetaan huippututkimusta tukevasta EU:n Horisontti Eurooppa -ohjelmasta, ja mukana on 15 eurooppalaista kumppania teollisuudesta ja korkeakouluista (<https://www.wander.fi/en/projects/STOP/>). WANDERin tutkimusosuudessa uusia pinnoitteita testataan pilottikohteissa.



Kuva 2. Näytteiden käsittelyä WANDERin HEAL-hankkeessa. Kuva: Veera Korhonen.

Antimikrobisen pinnan turvallisuus

Antimikrobisten pintojen kestävä käyttö edellyttää niiden hyötyjen ja haittojen arviointia **ihmisten terveyden** ja **ympäristön** kannalta. Käytön ja puhdistuksen yhteydessä kosketuspinta kuluu ja pieniä määriä antimikrobista ainetta irtoaa ympäristöön, jolloin sillä voi olla haitallisia vaikutuksia ihmiseen tai ympäristöön. Julkaistua tietoa tuotteista ympäristöön irtoavien ainesosien määrästä on niukasti, jolloin mahdollisten haitallisten vaikutusten arviointi on haastavaa. Joissain tuotteissa aktiivinen aine on **nano-kokoluokan** partikkeleina ja niiden mahdollinen ympäristö- ja terveysriski aiheuttaa erityistä huolta [1,7]. Pintojen puhdistuksen myötä patogeenisiä resistenttejä mikrobeja ja pieniä pitoisuuksia antimikrobisen pinnan aktiivista ainetta

sekä muita antimikrobisia aineita (antibiootteja, desinfektioaineita) päätyy esimerkiksi sairaalan jäteveteen mahdollistaen **resistenttien mikrobikantojen** valikoitumisen ja kehittymisen. Jätevesi olisi hyvä deaktivoita ja hygienisoida ennen johtamista jätevedenpuhdistamolle [1,8].

WANDER on ollut mukana tutkimassa kaupallisten hopeaa sisältävien laminaattipintojen ja jauhemaalattujen pintojen antimikrobista tehoa sekä pinnan kestävyyttä toistuvassa puhdistuksessa. Sisäympäristön usein koskettujen pintojen olosuhteita simuloitiin mm. keinohien avulla. **Pinnalta vapautuneen hopean määrä oli tuhat kertaa pienempi kuin elintarvikkeiden kanssa kosketuksiin joutuville materiaaleille ja polymeereille säädetyt lainsäädännölliset raja-arvot.** [9] Vaikutus ihmisen terveyteen tai ympäristöön on siis hyvin pieni.

Antimikrobisia kosketuspintoja on ajateltu keinona taistella terveydenhuollon **resistentejä mikrobikantoja** vastaan, nykyisten infektioidentorjuntakeinojen lisänä. Toisaalta on myös esitetty huoli siitä, että resistenssi antimikrobisen pinnan aktiiviselle aineelle saattaa lisätä resistenssiä myös (tietyille) antibiooteille. Suurin osa tähän aihepiiriin liittyvästä tutkimuksesta on tehty liuoksessa tai kosteissa olosuhteissa (biofilmissä), jolloin tulokset eivät ole suoraan sovellettavissa kuiville kosketuspinoille. Todellisissa käyttöolosuhteissa tehtävien antimikrobista tehokkuutta osoittavien testien yhteydessä pitäisikin arvioida myös pinnan kykyä resistenttien mikrobikantojen valikointiin ja suosimiseen. Nykytiedon valossa tehokkaiden antimikrobisten pinnan teho saattaa ylittää mahdollisen resistenssin aiheuttaman riskin. Lisätutkimuksia tarvitaan, jotta arviota voidaan täsmentää. [5]

Antimikrobiset pinnat saattavat muuttaa sisäympäristön **mikrobiston koostumusta**, millä voi olla vaikutusta ympäristöön ja ihmisten hyvinvointiin pitkällä aikavälillä. Pintojen käyttö voi vähentää mikrobien kokonaismäärää pinnalla, mutta siihen voi liittyä mikrobien epätasapainon ja mikrobien yleisen monimuotoisuuden vähenemisen riski. Monimuotoisuuden häviäminen voi johtaa haitallisten bakteerien rikastumiseen ja lisääntyneeseen tartuntatautien tai immunologisten ei-tarttuvien tulehdussairauksien riskiin. Laajamittaisia geneettisiä tutkimuksia tässä aihepiirissä on vähän. Metagenomisen tutkimuksen avulla voidaan seurata antimikrobisten pintojen vaikutuksia sisätilan mikrobiston koostumukseen ja toimintaan. [2] WANDER on aloittanut tutkimusyhteistyön Tarton yliopiston kanssa antimikrobisten pintojen mikrobistovaikutusten selvittämiseksi.

Yhteenveto

Koronapandemian seurauksena erilaisten antimikrobisten pintojen käyttö sisätiloissa on lisääntynyt. Antimikrobiset pinnat tuhoavat tai hylkivät mikrobeja erilaisiin mekanismeihin perustuen ja niiden avulla voidaan estää pintojen kautta tarttuvien infektioiden leviämistä. Antimikrobisten pintojen käytöllä on monia etuja, mutta myös haittapuolia tulee pystyä arvioimaan. Sisäympäristön kosketuspinoille soveltuvien antimikrobisten pintojen teho mikrobimäärän vähentäjänä on usein osoitettu laboratoriotestein. Tutkimuskeskus WANDERin tutkijat ovat mukana kansainvälisessä standardisointikomiteassa ISO/TC 330 "Surfaces with biocidal and antimicrobial properties" kehittämässä uutta standardoitua menetelmää antimikrobisten pintojen tehon määrittämiseen.

Todellisissa käyttöympäristössä tehtyjä tutkimuksia, joissa on osoitettu antimikrobisten pintojen aiheuttama infektioiden väheneminen, on vielä vähän. WANDERissa meneillään olevat hankkeet HEAL ja STOP tuovat lisätietoa tähän kysymykseen. Lisäksi niissä pohditaan antimikrobisten pintojen kustannustehokkuutta. Myös tärkeä riskienarviointityö jatkuu edellä mainituissa hankkeissa. Alustavia tuloksia HEAL-hankkeesta julkaistaan noin vuoden kuluttua.

Tutkimus pilottikohteissa aidoissa toimintaympäristöissä vie paljon aikaa, koska olosuhteita sekä ihmisten käytöstä ja ominaisuuksia ei voida vakioida. Ihmisten vastustuskyvyissä on eroa eli joku sairastuu infektioitauteihin herkemmin kuin toinen, koeasetelmasta riippumatta. Tarvitaan useamman vuoden seuranta-aika, jotta tulosten järkevä tilastollinen analysointi on mahdollista. Käytännössä monitieteinen ja kansainvälinen tutkijatiimi rakentamisen, kemian ja mikrobiologian asiantuntijoista lääkäreihin sekä sujuva yhteistyö pilottikohteiden kanssa on mahdollistanut tutkimuksen toteuttamisen. Ennen seuraavaa pandemiaa tulee etsiä kaikki keinot infektioiden leviämisen ehkäisemiseksi. Jos antimikrobiset pinnat osana sisätilan hygienian kokonaiskonseptia vähentävät päiväkotilasten, vanhusten ja edellä mainittuja hoitavan henkilökunnan infektioitauteja, siitä hyötyy merkittävästi koko yhteiskunta sekä kustannussäästöjen että hyvinvoinnin lisääntymisen kautta. Tulevaisuudessa tarvitaan isompi maailmanlaajuinen tutkimus useissa eri kohteissa ja kohdemaissa, jotta antimikrobisten ratkaisujen muodostaman konseptin vaikutus voitaisiin myös globaalisti tutkimuksilla varmentaa. Toisaalta jos tulevaisuudessa halutaan vähentää sairastuvuutta, niin antimikrobiset ratkaisut eivät kuitenkaan ole se ainoa tekijä vaan pitää myös ottaa huomioon ihmisten vastustuskyvyn kehittäminen sekä resistenttien mikrobien muodostumisen hillitseminen.

Lähteet

- [1] Rosenberg M, Ilić K, Juganson K, Ivask A, Ahonen M, Vinković Vrček I, Kahru A. (2019). Potential ecotoxicological effects of antimicrobial surface coatings: a literature survey backed up by analysis of market reports. PeerJ 7:e6315. <https://doi.org/10.7717/peerj.6315>.
- [2] Mäki, A., Salonen, N., Kivisaari, M., Ahonen, M. & Latva, M. (2023) Microbiota shaping and bioburden monitoring of indoor antimicrobial surfaces. Front. Built Environ. 9:1063804. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1063804>.
- [3] Adlhart C, Verran J, Azevedo NF ym. Surface modifications for antimicrobial effects in the healthcare setting: a critical overview. Journal of Hospital Infections 2018; Vol 99 (3): s. 239-249. <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2018.01.018>.
- [4] Dunne CP, Askew PD, Papadopoulos T, ym. Anti-Microbial Coating Innovations to prevent infectious disease: a consensus view from the AMiCI COST Action. Journal of Hospital Infection 2020; Vol 105 (2): s. 116-118. <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2020.04.006>.
- [5] Pietsch F, O'Neill AJ, Ivask A ym. Selection of resistance by antimicrobial coatings in the healthcare setting. Journal of Hospital Infection 2020; Vol 106 (1), s. 115-125. <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2020.06.006>.
- [6] Salonen, N., Ahonen, M., Sirén, K., Mäkinen, R., Anttila, V-J., Kivisaari, M., Salonen, K., Pelto-Huikko, A., Latva, M. (2023) Methods for infection prevention in the built environment—a mini-review. Front. Built Environ. Sec. Indoor Environment. Volume 9 - 2023. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1212920>.
- [7] Ahonen M, Kahru A, Ivask A ym. Proactive approach for safe use of antimicrobial coatings in healthcare settings: opinion of the COST Action network AMiCI. Int J Environ Res Public Health. 2017; 14(4). <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph14040366>.
- [8] Dunne SS, Ahonen M, Modic M ym. Specialised cleaning associated with antimicrobial coatings for reduction of hospital acquired infection. Opinion of the COST Action Network AMiCI (CA15114). Journal of Hospital Infections 2018; 99(3): s. 250-255. <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2018.03.006>.
- [9] Blomberg, E., Herting, G., Rajarao, G.R., Mehtiö, T., Uusinoka, M., Ahonen, M., Mäkinen, R., Mäkitalo, T. & Odnevall, I. (2022) Weathering and antimicrobial properties of laminate and powder coatings containing silver phosphate glass used as high touch surfaces. Sustainability 2022, 14(12), 7102; <https://doi.org/10.3390/su14127102>.

Valoon perustuvat ratkaisut sisäympäristön antimikrobisissa sovelluksissa

Martti Latva, FT, tutkimuspäällikkö, martti.latva@wander.fi

Valoa tuottavia lamppeja voidaan käyttää muuhunkin kuin vain perinteiseen pimeiden tilojen ja alueiden valaistukseen. Valon yksi mielenkiintoinen ominaisuus on sen kyky tuhota mikrobeja. Tämän vuoksi Tutkimuskeskus WANDERin sisäympäristön hygieniakonseptissa myös valoa käytetään pintojen ja sisäilman desinfiointiin [1]. Valolla voidaan vaikuttaa sisäympäristön mikrobeihin joko suoraan tai sitten tuottamalla materiaalipintojen valon absorption kautta reaktiivisia mikrobeja tuhoavia happiyhdisteitä. Käytännössä desinfiointiin käytettyjä valolähteitä ovat erilaiset UV-lamput ja sinivalolamput. Valoa absorboivissa materiaalipinnoissa käytetyin reaktiivisia happiyhdisteitä tuottava yhdiste on TiO_2 . Lisäksi TiO_2 :n ja vastaavien yhdisteiden tehoa ja valon absorptioaallonpituusaluetta voidaan laajentaa erilaisilla laajemman absorptiospektrin omaavilla väriaineilla, joita kutsutaan herkistäjiksi. WANDERin tosielämän tutkimuskohteissa sinivaloa käytetään päiväkotikohteessa tarvikkevarastossa desinfioidessa siellä säilytettäviä leikkikaluja. UV-valoa käytetään kehitettävässä siivousrobottikonseptissa ja TiO_2 -pinnoitusta yhdessä näkyvän valon kanssa pintojen ja sisäilman desinfiointiin useammassa tutkimuskohteessa. Tulevaisuudessa valoa tullaan yhä enemmän käyttämään desinfiointiratkaisuna tai yhtenä osana sitä. Teknologiaa hyväksi käyttävien yritysten ja muiden toimijoiden on tärkeää ymmärtää sitä mihin valon antimikrobisuus perustuu sekä mitä reaktiomekanismeja ja myös mahdollisia riskitekijöitä siihen liittyy. Tähän artikkeliin on koottu olennaisin tieto liittyen valon käyttöön antimikrobisena ratkaisuna.

Desinfiointi UV-valolla

Tehokas lähestymistapa ilmaitse tarttuvien mikrobitalutien leviämisen estämiseksi perustuu haitallisten bakteerien ja virusten tuhoamiseen UV-valon avulla [2–4]. UV-säteilyn on todettu soveltuvan hyvin kaikenlaisten mikro-organismien, kuten lääkkeille vastustuskykyisten ja jopa moniresistenttien bakteerien [5] ja erilaisten viruskantojen [6–11] tuhoamiseen. Tällainen antimikrobinen vaikutus johtuu UV-valon vahingoittavasta vaikutuksesta biopolymeereihin, joista mikrobit muodostuvat.

Desinfiointitehokkuus on riippuvainen mikro-organismityypistä ja toimintaolosuhteista kuten UV-aallonpituudesta, UV-intensiteetistä ja säteilytysajasta sekä lisäksi myös tietyt ympäristöolosuhteet, kuten lämpötila ja suhteellinen kosteus vaikuttavat [12,13].

Antimikrobisten UV-valaistusjärjestelmien käyttö julkisissa tiloissa on kuitenkin rajoitettua, koska tavanomaiset UV-valonlähteet voivat olla haitallisia myös ihmisten terveydelle [14,15]. On myös osoitettu, että jotkin mikro-organismit voivat toipua UV-säteilyn subletaalista altistuksesta valoentsyymaattisen prosessin avulla [16]. Tämän ongelman ratkaisemiseksi UV-valoa käytetään usein yhdessä valokatalyyttisten materiaalien kanssa, joita kutsutaan valokatalyyteiksi [17,18]. UV-valokatalyyttistä hapetusta (PCO) on paljon hyödynnetty mm. ilmanpuhdistustekniikassa [19–21]. PCO:lla on monia etuja muihin tekniikoihin verrattuna, kuten kyky käsitellä samanaikaisesti eri epäpuhtauksien seoksia, suhteellisen halpa hinta sekä helppo ylläpitää ja käyttää [22,23–25].

Mikro-organismien inaktivointi edellyttää eri parametrien eli UV-aallonpituuden, valokatalyytin koostumuksen ja UV-annoksen (= UV-valon intensiteetin ja säteilytysajan tulo) hienosäätöä. Näin ollen mikro-organismien inaktivointi on riippuvainen absorboidun säteilyn määrästä, joka voi aiheuttaa toisaalta myös haitallisia vaikutuksia. On olemassa kaksi mekanismia, joiden kautta UV-säteily voi vahingoittaa mikro-organismeja: i) valon aiheuttamat reaktiot, jotka johtuvat UV-fotonien suorasta absorboitumisesta biopolymeereihin, erityisesti nukleiinihappoihin ja proteiineihin, jotka ovat bakteerien ja virusten yhteisiä peruskomponentteja [26,27], sekä ii) valon aiheuttama hapetusreaktio, jonka laukaisevat reaktiiviset happiyhdisteet, jotka syntyvät eksogeenisten ja endogeenisten valoherkistäjien UV-säteilytyksen jälkeen. Tällaisia valoherkistäjiä ovat tyypillisesti voimakkaat hapettavat aineet tai muut valoherkät molekyylit kuin nukleiinihapot ja proteiinit [28].

UV-valo luokitellaan säteilyn aallonpituuden mukaan UV-A ($\lambda = 315\text{--}400\text{ nm}$), UV-B ($\lambda = 280\text{--}315\text{ nm}$) ja UV-C ($\lambda = 100\text{--}280\text{ nm}$). Yleisesti ottaen UV-C- ja UV-B-valo ovat tehokkaimpia aikaansaamaan valon synnyttämiä DNA:n ja RNA:n reaktiotuotteita. Tämä johtuu siitä, että nukleiinihapot sisältävät monosakkarideja ja nukleobaaseja, joiden absorptiohuippu on suurimmillaan 200 ja 265 nm:ssä. Sen sijaan UV-A-valon on todettu olevan vähemmän tehokas nukleiinihappojen vaurioitumisen aiheuttaja, koska tällaiset biopolymeerit eivät absorboi sitä suoraan [29–31]. UV-A-säteilyn on kuitenkin havaittu aiheuttavan valon aikaansaamaa hapettumista vapaiden radikaalien ja reaktiivisten happiyhdisteiden muodostumisen kautta, mikä puolestaan voi lopulta vahingoittaa nukleiinihappoja, proteiineja ja lipidejä [26, 29,32]. Kaiken kaikkiaan

UV-säteilyn aiheuttama mikrobien tuhoutuminen on seurausta valon aiheuttamista reaktioista, jotka tapahtuvat nukleiinihappojen absorboimien fotonien takia [33].

UV-säteen aallonpituuden (tietyllä intensiteetillä) ja nukleiinihappojen vaurioitumisen välillä on selvä syy-yhteys [34]. UV-säteilyn aiheuttamat DNA- ja RNA-molekyylien vauriot tapahtuvat useimmiten UV-B- ja UV-C-säteilyn avulla ja aallonpituuksilla 200–300 nm [8,9]. UV-valon on todettu aiheuttavan reaktiotuotteiden syntymistä, jotka voivat johtaa nukleiinihappojen rakenteellisiin ja toiminnallisiin muutoksiin ja vikoihin replikaatio-, transkriptio- ja translaatiomekanismeissa [34]. Siksi UV-valo on potentiaalisesti tappavaa monille erilaisille organismeille prokaryooteista kasveihin ja jopa eläimiin [29]. Kun UV-valoa käytetään virusten desinfiointiin, sen on lisäksi havaittu estävän genomien replikaatiota ja infektiota, mikä johtaa lopulta viruspartikkelin tuhoutumiseen [35].

UV-säteilyn suoran nukleiinihappoihin kohdistuvan vaikutuksen lisäksi DNA:n ja RNA:n hapettumisen aiheuttamat vauriot voivat syntyä muiden UV-valon käynnistämien reaktioiden seurauksena. Tässä yhteydessä reaktiivisten happiyhdisteiden muodostuminen UV-A-valon absorboitumisen jälkeen muihin valoherkkiin molekyyliin kuin nukleiinihappoihin voi johtaa guaniini-(G)-emäksen hapettumiseen, jolloin syntyy 8-okso-7,8-dihydro-20-deoksiguanosiini-addukti (8-oksodGua) [34,36]. Jos solun itsekorjausmekanismit eivät korjaa niitä asianmukaisesti, tällaiset UV-säteilyn aiheuttamat nukleiinihappovauriot voivat vaikuttaa nukleiinihapon kokonaisrakenteeseen ja -toimintaan sekä heikentää proteiinien translaatiota siten, että solut lopulta kuolevat [37,38].

Toisaalta proteiinit (eli prokaryoottisten ja eukaryoottisten solujen pääkomponentti ja viruskapsidi) ovat toinen valon hapettumisen kohde [39,40]. Epäsuorat valokemialliset vauriot koostuvat valon absorptiosta herkistäjäyhdisteissä ja elektronin siirtymisestä nesteisiin liuenneeseen molekulaariseen happeen (O_2). Tällöin muodostuu reaktiivisia happiyhdisteitä, kuten singlettihapetta (1O_2) ja hydroksyyli-radikaalia ($\cdot OH$), jotka puolestaan voivat reagoida joidenkin aminohappojäämien sivuketjujen kanssa ja johtaa proteiinien hapettumiseen [27,41,42]. Tämä ilmiö voi lopulta aiheuttaa sen, että proteiinit menettävät rakenteensa ja toimintansa ja niistä tulee erittäin haitallisia mikro-organismeille. Lisäksi hapettuneet proteiinit korjaantuvat huonosti, koska ne ovat vähemmän (tai joskus enemmän tai liian) alttiita proteolyysille (valkuaisaineen pilkkoutuminen) [42].

UV-C-säteily on osoittautunut tehokkaaksi tuhoamaan ilmassa olevia bakteeripatogeeneja. Tutkimusten perusteella UV-C-annos, joka tarvitaan inaktivoimaan ilmassa olevia patogeeneja pinnoilla, on yleensä kymmenistä satoihin mJ cm^{-2} [5,43,44]. Lisäksi on osoitettu, että kaukainen UV-C-säteily ($\lambda = 207\text{-}222$ nm; UV-annos = 135 mJ cm^{-2}) inaktivoi tehokkaasti lääkkeille vastustuskykyisiä bakteereja ilman ilmeistä haittaa nisäkkäiden iholle [45,46]. Tulos on yllättävä, kun otetaan huomioon, että UV-C-säteilyn tiedetään yleisesti olevan haitallista mikro-organismeille, kuten viruksille, bakteereille, hiivoille ja sienille muutamassa sekunnissa, mutta se aiheuttaa myös ihoärsytystä ja vakavia silmävaurioita [47]. Aallonpituuden 222 nm käyttö mikrobien tuhoamisessa onkin tullut viime aikoina vahvasti esille, koska markkinoille on tullut valolähteitä, missä kaikki muut UV-aallonpituudet voidaan suodattaa pois ja jäljelle jää vain haluttu 222 nm säteily [48].

Valolla tuotetut reaktiiviset happiyhdisteet

Useimmat tutkimukset osoittavat, että reaktiiviset happiyhdisteet (ROS) ovat vastuussa hapetukseen perustuvista hajotuksista ja mikrobien tuhoamisista ja useimmin on tulkittu, että $\cdot\text{OH}$ (hydroksyyliiradikaali) on keskeisin tekijä [49–51]. Reaktiivisten happiyhdisteiden (ROS) aiheuttama lipidiperoksidaatio osoitettiin hajoamistuotteen malondialdehydi (MDA) vapautumisena samalla kun menetettiin membraanikalvojen hengitysaktiivisuutta, jota mitattiin 2,3,5-trifenyylitetratsoliumkloridin pelkistymisellä [52]. Dimetyylisulfoksidi ja kysteamiini, jotka eliminoivat $\cdot\text{OH}$ -radikaaleja tehokkaasti havaittiin vedessä poistavan TiO_2 -suspension valokatalyyttisen desinfiointiaktiivisuuden [53]. Muodostuneet radikaalit kuten $\cdot\text{OH}$ ovat kuitenkin lyhytikäisiä, eivätkä ne todennäköisesti diffundoivat TiO_2 :n pinnasta yli $1 \mu\text{m}$:n etäisyydelle, varsinkaan orgaanisen aineen läsnä ollessa [50,54]. Kikuchi työryhmineen osoitti, että *E. coli* -bakteerien tuhoamista tapahtui kuitenkin edelleen, vaikka bakteerit erotettiin pinnasta $50 \mu\text{m}$ paksulla huokoisella kalvolla. ROS-yhdisteiden tuottaminen TiO_2 :n valokatalyyysillä pystyy tuhoamaan monenlaisia organismeja, mukaan lukien bakteerien endosporit, vedessä, ilmassa ja erilaisilla materiaalipinnoilla [50]. Teknologialla on potentiaalia olla tehokas ase tartuntatautien leviämisen torjunnassa, erityisesti kun otetaan huomioon myös näkyvän valon avulla aktivoitujen katalyyttien kehittäminen. Yksi ongelmista on se, että ei ole ollut olemassa riittävän hyvää standardimenetelmää valokatalyyttisten prosessien antimikrobisen tehokkuuden testaamiseksi. Esimerkiksi *E. coli* -bakteerikantoja on käytetty monissa eri kasvualustoissa ja testiolosuhteissa. Tämän vuoksi eri tutkimusryhmien tuloksia on hyvin vaikea vertailla keskenään.

Materiaalit, jotka tuottavat valovirityksen avulla reaktiivisia happiyhdisteitä.

Viime vuosina kiinnostus puolijohteiden avulla tapahtuvaan valokatalyyysiin on lisääntynyt, sillä se on ympäristöystävällinen menetelmä, jolla voidaan hajottaa monia erilaisia epäpuhtauksia ja biologisia aineita. Desinfointitarkoituksiin käytettävien valokatalyyttien joukossa, joihin kuuluvat sinkkioksidi (ZnO), volframioksidi (WO₃) ja titaanidioksidi (TiO₂), joista jälkimmäinen metallioksidi on toistaiseksi ylivoimaisesti eniten tutkittu katalyytti. Sen suuri valoaktiivisuus, stabiilisuus, kustannustehokkuus ja myrkyttömyys sekä mahdollisuus käyttää sitä ympäristön lämpötilassa ja paineessa ovat etuja, joita tämä materiaali tarjoaa UV-valon kanssa käytettynä. Lisäksi TiO₂:n kyky hajottaa valokatalyyttisesti lähes kaikenlaisia orgaanisia ja eläviä epäpuhtauksia, myös bakteereja ja viruksia, on edistänyt sen käyttöä puhdistus- ja desinfointitekniikoissa [55–58].

TiO₂:lla on kolme pääpolymorfia: anataasi, rutiili ja brookiitti. Suurin osa tutkimuksista osoittaa, että anataasi on tehokkain valokatalyytti, ja että rutiili on vähemmän aktiivinen. Erot johtuvat todennäköisimmin eroista elektronien ja reikien rekombinaation laajuudessa näiden kahden muodon välillä [59]. Tutkimukset ovat kuitenkin osoittaneet, että anataasin ja rutiilin seokset olivat tehokkaampia valokatalyyttejä kuin 100-prosenttinen anataasi [59].

Titaanidioksidin (TiO₂) kyky toimia valokatalyysaattorina on tunnettu jo 90 vuotta [60], ja sen rooli erilaisten pintojen päällystämisenä on myös hyvin tunnettu [61]. Kiinnostus TiO₂:n valokatalyyttisten ominaisuuksien soveltamista kohtaan heräsi kunnolla, kun Fujishima ja Honda (1972) raportoivat veden valoelektrolyysistä [62], ja tätä toimintaa hyödynnettiin pian liittyen sen kykyyn katalysoida epäpuhtauksien hapettumista [63, 64] ja tuhota mikro-organismeja [65,66]. Sittemmin on raportoitu valokatalyyysin käytöstä mm. bakteerien, sienten, levien, alkueläinten ja virusten sekä mikrobitoroksinien tuhoamiseen. TiO₂:ta voidaan käyttää suspensiona nesteissä tai kiinnitettynä pinnoille [50,67,68]. Kupari- ja hopeaioneilla on hyvin tunnettu antimikrobinen vaikutus, ja ne voivat myös tehostaa valokatalyyttistä aktiivisuutta. Cu²⁺- ja Ag⁺-ionien yhdistelmät TiO₂:n kanssa tarjoavat näin ollen kaksitoimisia pintoja.

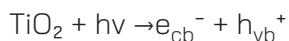
Valokatalyyttiset pinnat voivat olla myös superhydrofobisia, mikä tarkoittaa, että pinnat hylkivät vettä ja poolisia yhdisteitä, jolloin lika huuhtoutuu veden mukana pois. Kyky poistaa mikro-organismeja valokatalyyttisillä itsepuhdistuvilla/itsedesinfioivilla

pinoilla tarjoaa hyödyllisen lisämekanismien tautien leviämisen valvonnassa tavanomaisten desinfiointimenetelmien ohella. TiO₂-pinnoitettuja suodattimia on käytetty myös ilman desinfiointiin [69,70]. Valokatalyyysin käytön etuna perinteisen ilmansuodatuksen rinnalla on se, että suodattimet ovat myös itsepuhdistuvia.

Valokatalyyttinen mekanismi

TiO₂ on puolijohde. Riittävän energian omaavan fotonin adsorptio TiO₂:een siirtää elektroneja valenssivyöltä (e_{vb}⁻) johtavuusvyölle (e_{cb}⁻), jolloin valenssivyölle jää positiivisesti varautunut aukko (h_{vb}⁺). TiO₂:n mineraalimuodon anataasin välivyöenergia (elektronin siirtämiseen tarvittava energia) on noin 3,2 eV, mikä tarkoittaa käytännössä sitä, että valokatalyyysi voidaan aktivoida fotoneilla, joiden aallonpituus on alle 385 nm. Elektronit voivat tällöin vapaasti siirtyä johtavuusvyölle. Tämän jälkeen elektronit voivat vapaasti liikkua johtavuusvyöllä, ja muodostuva aukko voidaan täyttää viereisestä molekyylistä peräisin olevalla elektronilla. Tämä prosessi voidaan toistaa edelleen. Näin ollen myös aukot ovat liikkuvia. Elektronit ja aukot voivat yhdistyä uudelleen tai kun ne pääsevät materiaalin pinnalle, ne voivat reagoida tuottaen reaktiivisia happiyhdisteitä (ROS), kuten ·O₂⁻ ja ·OH-radikaaleja. Nämä voivat liuoksessa reagoida muodostaen vetyperoksidi-, hydroksyyli- ja hydroperoksyyli-radikaaleja. Radikaalien reagointi orgaanisten yhdisteiden kanssa johtaa orgaanisen aineksen hajoamiseen. Aukkojen ja elektronien yhdistyminen vähentää prosessin tehokkuutta.

TiO₂:ta käytettäessä tämä tapahtumaprosessi voidaan esittää seuraavina reaktioina ja reaktioyhtälöillä:

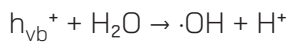


Tämän jälkeen elektronit voivat vapaasti siirtyä johtavuusvyön sisällä, kun taas aukot voivat täyttyä elektronien siirtyessä viereisestä molekyylistä, jolloin jälkimmäiseen jää aukko, ja jolloin prosessi voidaan toistaa valokatalyyttin pinnalla. Elektronit ja aukot voivat myös nopeasti yhdistyä uudelleen. Huomionarvoista on, että kosketuksissa ympäristössä esiintyvien hapen ja veden kanssa (esim. kosteassa ilmassa), ne voivat menettää varauksensa, missä nämä kaksi molekyyliä toimivat e- ja h+ sieppaajina.

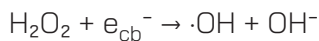
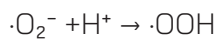
Tuloksena on superoksidi-anionin ($\cdot\text{O}_2^-$) muodostuminen,



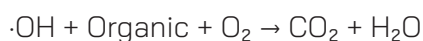
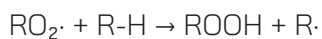
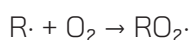
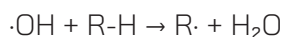
sekä hydroksyyliiradikaalin ($\cdot\text{OH}$) muodostuminen,



Kun nämä reaktiiviset happiyhdisteet altistuvat kostealle ilmalle, ne voivat lisäksi reagoida edelleen. Erityisesti $\cdot\text{O}_2^-$ johtaa hydroperoksyyliradikaalin ($\cdot\text{OOH}$) muodostumiseen, kun taas $\cdot\text{OH}$ kytkeytyy nopeasti toisen ohimenevän $\cdot\text{OH}$:n kanssa, jolloin syntyy vetyperoksidi (H_2O_2). Aktiivisen puolijohdemateriaalin läsnä ollessa muodostunut H_2O_2 toimii kuitenkin e- sieppaajana, mikä edistää $\cdot\text{OH}$ -radikaalien muodostumista:



Tällaisten hapen radikaalien (eli $\cdot\text{OOH}$, $\cdot\text{OH}$ ja $\cdot\text{O}_2^-$) nopea reaktio mikro-organismeissa esiintyvien orgaanisten molekyylien (eli proteiinien ja ennen kaikkea monitydyttymättömien rasvahappojen) kanssa on ensimmäinen vaihe antimikrobisessa prosessissa. Huomattakoon, että reaktiiviset happiyhdisteet toimivat edistämällä vetyatomien siirtoreaktioita orgaanisista substraateista (R-H) siten, että syntyy uusia hiiliyhdisteiden radikaaleja (R \cdot). Nämä radikaalit voivat puolestaan reagoida O_2 :n kanssa ja edistää radikaaliketjua, joka lopulta johtaa orgaanisen substraatin täydelliseen hapettumiseen [71,72]:



Bakteerien UV-valokatalyyttinen inaktivointi johtuu pääasiassa reaktiivisten happiyhdisteiden ja niiden sivutuotteiden aiheuttamista soluseinän, kalvon, solunsisäisten entsyymien ja nukleiinihappojen vaurioista [73]. Sunada ym. ehdottivat kolmivaiheista mekanismia bakteerien valokatalyyttiselle tuhoamiselle valosäteilytetyillä TiO₂-pinnoilla: (i) reaktiivisten happilajien hyökkäys soluseinään, (ii) sisäisen sytoplasmakalvon hajoaminen ja (iii) solunsisäisten komponenttien hajoaminen [74]. Vaikka soluseinän peptidoglykaanikerroksen havaittiin olevan hieman altis reaktiivisten happiradikaalien hyökkäykselle, tärkeimpinä kohteina pidetään gram-negatiivisissa bakteereissa esiintyvän lipopolysakkaridikerroksen lipidien peroksidoitumista ja monityydyttymättömiä rasvahappoja, joita esiintyy sekä gram-positiivisissa että gram-negatiivisissa bakteereissa. Kun soluseinästä tulee läpäisevä, radikaalit ·OH ja vähemmässä määrin ·O₂⁻ kulkeutuvat huokosten läpi ja pääsevät sytoplasmaan, jolloin ne voivat vahingoittaa nukleiinihappoja ja koentsyymi-A:ta [75–78]. Virusten tapauksessa ·OH:n ja ·O₂⁻:n on ehdotettu olevan vastuussa orgaanisten yhdisteiden, kuten fosfolipidikaksoiskerroksen ja kuoren (kuoriviruksissa) ja kapsidiproteiinien hajoamisesta, jolloin voi tapahtua geneettisen aineksen hajoaminen [79–81].

Valokatalyyttinen vaikutus mikro-organismeihin

Valokatalyyttisyys on osoitettu kykenevän tappamaan monenlaisia organismeja, kuten gram-negatiivisia ja gram-positiivisia bakteereja, mukaan lukien endosporit, sieniä, leviä, alkueläimiä ja viruksia, ja sen on myös osoitettu kykenevän inaktivoimaan prioneja [82]. Valokatalyyttisyys on myös osoitettu tuhoavan mikrobitoroksiineja. Sen sijaan *Acanthamoeba*-kystien ja *Trichoderma asperellum coniodiosporen* on esitetty olevan vastustuskykyisiä, mutta näistä tutkimuksia on vähän. Kyky tuhota kaikki muut mikro-organismiryhmät liittyvät siihen, että pinnat voivat olla itsesteriloituvia, erityisesti kun niihin yhdistetään Cu tai Ag. Monissa tutkimuksissa on käytetty puhdasviljelmiä, vaikka on olemassa raportteja valokatalyyttisestä aktiivisuudesta sekaviljelmiä [83] ja luonnollisia yhteisöjä vastaan [84,85].

Väriaineen virittämisen avulla tapahtuva tehostaminen

Tehokkaan näkyvän valon talteenoton saavuttamiseksi erinomainen keino on puolijohteiden valoherkistäminen sopivilla viritetyillä molekyyliillä. Väriaineen virittäminen valolla on yksi lupaavimmista tavoista laajentaa valovastetta näkyvän valon alueelle, ja sillä on tiettyjä etuja suoraan valokatalyyttiin verrattuna [86–89]. Väriaineen avulla herkistetyin valokatalyytti näkyvän valon indusoima

valokatalyyttinen mekanismi on seuraavanlainen [86]: väriaine absorboi näkyvää valoa ja saavuttaa virittyneen tilan, jonka hapetus-pelkistyspotentiaali on yleensä alhaisempi kuin vastaavan perustilan. Kun hapetus-pelkistyspotentiaali on alempi kuin puolijohteen johtavuusvyön, voidaan sekä kationisia radikaaleja että johtavuusvyön elektroni helposti muodostaa, jos elektroni injektoidaan johtavuusvyölle virittyneeltä tilalta [86,87].

Li työryhmineen osoitti, että squaryliumväriaineella (ISQ) viritettyjen TiO₂-nanohiukkasten valovasteet ulottuivat huomattavan laajalle näkyvän valon alueelle, ja että niiden valokatalyyttinen aktiivisuus näkyvän valon säteilytyksen aikana parani merkittävästi [87]. Tällaisessa järjestyksessä TiO₂:n pinnalla oleva ISQ-väriaine voitiin helposti virittää perustilasta (D) virittyneeseen tilaan (D*) näkyvän valon avulla. Tämä virittynyt väriaineyhdiste voitiin sitten muuntaa puoliksi hapettuneeksi radikaalikationiksi ($\cdot D^+$) injektoimalla elektroni TiO₂:n johtavuusvyölle, koska ISQ-väriaineen pienin miehittämätön molekyyliorbitaali (LUMO) sopii hyvin yhteen TiO₂:n johtavuusvyön kanssa, mikä mahdollistaa varauksensiirron. Tämän jälkeen muodostuu happiradikaaleja, kuten $\cdot O_2^-$, $\cdot OH$ ja $\cdot OOH$ erilaisten protonointi- ja pelkistysvaiheiden kautta. Lopuksi $\cdot OH$ -radikaalit reagoivat orgaanisten ryhmien ja molekyylien kanssa tuottaen hajoamistuotteita.

Mikrobien tuhoaminen sinisellä valolla

2000-luvun alkupuolelta lähtien on tehty paljon tutkimusta, joka osoittaa, että kalliita lasereita ei välttämättä tarvita taudinaiheuttajien tuhoamiseksi, ja että suora säteilytys yleisesti saatavilla olevilla sinisillä tai violeteilla LED-valoilla inaktivoi taudinaiheuttajia merkittävästi ilman valoherkistystä [90–93]. On paljon tutkimuksia, joiden perusteella LED-valonlähteitä on käytetty mikrobien tuhoamiseen [94–97], ja nämä tutkimukset ovat johtaneet siihen, että sinisiä LED-valonlähteitä käytetään yhä enemmän mikrobien tuhoamiseen ja desinfointiin [98–100], ja että tekniikkaa pyritään jatkuvasti kehittämään [90,101,102].

Keskeinen havainto tutkimuksissa, joissa on tutkittu bakteerien valoon perustuvaa inaktivoimista sinisellä valolla, on se, että 405 nm:n valo on tehokkain bakteerien tuhoamisessa verrattuna muihin aallonpituuksiin 400–470 nm:n alueella [103–105]. Tutkimuksessa, jossa verrattiin *Listeria monocytogenes* -bakteerin valoon perustuvan inaktivoimisen tehokkuutta sinisen valon eri aallonpituuksilla, jotka vaihtelivat 400–450 nm:n välillä 10 nm:n välein, havaittiin, että 405 ± 5 nm oli tehokkain [105]. Hesslingin tutkimuksessa todettiin, että 405 nm:n valo johti *Enterococcus moraviensis*

-bakteerikonsentraation suurempaan vähenemiseen kuin 450 nm:n valon [103]. Vastaavasti Wangin työryhmän tutkimuksessa, jossa tutkittiin aallonpituuden merkitystä *Neisseria gonorrhoeae* -bakteerin inaktivointiin, havaittiin, että 405 nm:n valo johti suurempaan bakteeripitoisuuden vähenemiseen kuin 470 nm:n valo [104].

McKenzie ym. käyttivät 405 nm:n valoa yhdessä erilaisten stressiolosuhteiden kanssa selvittääkseen, mitkä stressiolosuhteet tehostavat eniten 405 nm:n valon bakteereja tappavaa aktiivisuutta ja näissä kokeissa *Escherichia coli* ja *Listeria monocytogenes* altistettiin subletaalisille stressiolosuhteille, joihin kuuluivat vaihtelevat lämpötilat, pH-tasot ja suolapitoisuudet [106]. Sen jälkeen, kun bakteerisuspensioita oli pidetty subletaalisissa stressiolosuhteissa, ne altistettiin 405 nm:n valolle, jonka säteilyteho oli 70 mW/cm² [106]. Lämpötilastressin havaittiin aiheuttavan molemmissa lajeissa lisääntyneitä valoon perustuvaa inaktivoitumista 405 nm:n valolla, ja 4 °C ja 45 °C stressitilanteissa kasvatetuissa populaatioissa inaktivoitumisen nopeus oli suurempi kuin 22 °C stressittömissä olosuhteissa kasvatetuissa populaatioissa [106]. Hapostressin havaittiin lisäävän valoinaktivoitumista eniten [106]. Kun *E. coli* -bakteeria pidettiin pH 3:n olosuhteissa, 405 nm:n valon annos, joka tarvittiin saman inaktivoitumisasteen saavuttamiseksi kuin stressittömässä populaatiossa, pieneni 77 % *E. coli* -bakteerin osalta ja 50 % *L. monocytogenes* -bakteerin osalta [106]. Suolakonsentraation lisääminen vaikutti eri tavoin näihin kahteen lajiin, sillä *E. coli* tarvitsi 50 % pienemmän annoksen inaktivoitumiseen, kun taas *L. monocytogenes* tarvitsi vastaavasti suuremman annoksen inaktivoitumiseen [106]. Bache ym. vertasivat bakteerien vähenemisen laajuutta eri kestoisen näkyvän sinisen valon käsittelyn jälkeen ja havaitsivat, että pidempi altistuksen kesto oli yhteydessä bakteerien suurempaan vähenemiseen [107].

Pulssitettu sininen valo

Uusien tutkimusten mukaan pulssitettu sininen valo (PBL) voi olla käyttökelpoinen vaihtoehto haitalliselle UV-valolle, koska sen teho on suuri ja sen bakterisidinen tehokkuus on parempi kuin tavanomaisen jatkuvakestoisen sinisen valon (CW). Tutkimukset osoittavat, että PBL inaktivoi taudinaiheuttajia, kuten esim. metisilliinille resistenttiä *Staphylococcus aureus* (MRSA) 40–100 kertaa pienemmällä säteilyteholla kuin jatkuvakestoisen sinisen valon [102]. PBL-tekniikassa hyödynnetään UV-A:ta lähellä olevia aallonpituuksia, erityisesti aallonpituuksia, jotka ovat käytännössä vaarattomia niiden alhaisemman valoenergian vuoksi. Toiseksi PBL-tekniikka muuttaa selvästi violetin sinistä säteilyä tehostaakseen sen bakterisidistä tehokkuutta, jolloin sen bakteereita tappava vaikutus on lähempänä UV-säteilyä,

mutta ilman UV-säteilyn aiheuttamia vaaroja. Näin ollen PBL:n korkea teho kullakin violetin ja sinisen aallonpituudella tekee siitä huomattavasti bakterisidiseemmän pienemmällä säteilytehoilla kuin jatkuvakestoisen valo [102]. Ilman tätä tavanomaiset jatkuvakestoiset violetit ja siniset valonsäteet ovat paljon vähemmän bakterisidisempiä kuin UV-säteily.

PBL-tekniikka perustuu siihen, että happimolekyyli on perustilassaan tripletti, jolloin sen kahdella uloimmalla molekyyliorbitaalilla on kummallakin yksi elektroni, joiden spinit ovat samansuuntaiset. Tällainen perustilassa oleva happi (= triplettihappi) voi törmätä virittyneessä tilassa olevan molekyylin kanssa, joka puolestaan relaxoituu perustilaansa sen jälkeen, kun säteilemätön energiansiirto triplettihapelle on tapahtunut, ja jolloin muodostuu reaktiivista singlettihapetta. PBL-tekniikka koostuu pulssisarjasta, jonka huippusäteily ja pulssin kesto riittää virittämään valoa absorboivat molekyylit kuten porfyriinit optisesti virittyneeseen singlettitilaansa. Valopulssien välissä on riittävä tauko aika, jotta valoa absorboivat molekyylit voivat palata perustilaansa. Tämä kyseinen siirtymä aiheuttaa reaktion triplettihapen kanssa, jolloin happimolekyyli pelkistyy erittäin reaktiiviseen singlettitilaan, johon kuuluu singlettihapetta (1O_2), hydroksyyli-radikaaleja ($\cdot OH$) ja superoksidi-ioneja (O_2^-) riippuen siitä, kumpi valokemiallinen reitti on käynnistetty, tyyppi I vai tyyppi II. Riittävän suurina määrinä nämä vapaat radikaalit häiritsevät mikro-organismien solurakennetta, jolloin kaikki mikro-organismit tai osa niistä inaktivoituvat ja tuhoutuvat. Useat tutkimukset osoittavat, että violetin ja sinisen valon alueen eri aallonpituudet tuottavat lievästi vaihtelevia mutta samankaltaisia antimikrobisia vaikutuksia ja ne voivat tuhota lukuisia mikro-organismeja [90,101,102].

Merkittävä ero PBL- ja CW-valon välillä on se, että CW-valo virittää jatkuvasti erilaisten yhdisteiden valoa absorboivia ryhmiä eli kromoforeja ja pitää ne viritetyssä tilassa; vähemmän kromoforeja kykenee palaamaan perustilaansa, ja ne palaavat satunnaisesti sen sijaan, että ne palaisivat yhdessä valon kanssa, joka virittää niitä tietyllä taajuudella. Fluoresenssimenetelmään perustuvassa tutkimuksessa, jossa valosäteilytys ajoitettiin samaan aikaan porfyriinien virittyneen tilan palautumisen kanssa, havaittiin bakteerien tuottaman fluoresenssin ajoitettu kasvu ja lasku bakteerien tuhoamisen maksimoimiseksi [102].

Sekä PBL- että CW-valon on osoitettu häiritsevän biofilmin muodostumista monenlaisissa mikrobipesäkkeissä ja PBL:n on osoitettu myös siinä yhteydessä häiritsevän bakteerien biofilmirakennetta alhaisemmilla valomäärillä kuin CW-valon [101]. Molemmat valotekniikat tuhoavat mikro-organismeja häiritsemällä niiden

solukalvoja, aiheuttamalla nopeaa kalvojen depolarisaatiota ja solun hajoamista solukalvon tuhoutuessa sekä muuttamalla ja häiritsemällä kalvorakennetta ja solujen replikaatiota [108]. Tämä havainto on erittäin merkityksellinen pyrittäessä tuhomaan viruksia, koska viruskapsidin hajoaminen ja viruksen nukleiinihapon pirstoutuminen ovat kaksi kriittistä mekanismia valon viruksia tuhoavalle vaikutukselle [109]. Lisäksi sekä PBL- että CW-valo indusoivat A-DNA:n pilkkoutumista, mekanismia, jolla on potentiaalia heikentää DNA-viruksia [110,111].

Yhteenveto

Valon käyttö antimikrobisena ratkaisuna tulee jatkossa yleistymään, koska valon ei tiedetä aiheuttavan resistenttejä mikrobikantoja. Suurin haaste valon käytölle on riskitekijät, jotka liittyvät siihen, että desinfiioiva valo voi vaikuttaa haitallisesti ihmisiin silloin, kun he mahdollisesti altistuvat sille. Voimakkaasta desinfiioivasta valosta voi olla vaikutusta ihmisten silmille ja näkökyvylle sekä iholle. Ratkaisuja tähän on jo kehitetty. Yksi on liiketunnistinohjaukset, joiden avulla varmistetaan, että ihmisiä ei ole tilassa, missä antimikrobinen valaistus on päällä. Toinen tapa on valita valosta käyttöön aallonpituudet, joiden haitallinen vaikutus ihmiseen on hyvin olematon eli sinisen alueen valo 405 nm tai UV-valo 222 nm. Tutkimuskeskus WANDERin tutkimuksissa valoon perustuvia ratkaisuja tullaan hyödyntämään ja tutkimaan jatkossa enemmän. Yksi esimerkki on valon käyttö antimikrobisena ratkaisuna esimerkiksi eläintilojen tautisuojausten kehittämisessä paremmaksi. Eläintautien torjunta on tärkeää tuotantoeläintiloilla, joissa tautipaineen pienentäminen voi lisätä merkittävästi eläinten hyvinvointia sekä tilan kannattavuutta. Nautatiloilla mm. *Mycoplasma bovis*, *salmonelloosi* ja *kryptosporidioosi* ovat uhkaavia tarttuvia eläintauteja, suuria vaikutuksia sikatilalle levitessään aiheuttaisi afrikkalainen sikarutto ja vastaavasti siipikarjatilalla lintuinfluenssa sekä Newcastlel tauti, mutta päivittäiset tautihaasteet liittyvät etenkin yleisesti esiintyviin tauteihin kuten hengitystie- ja ripulisairauksiin ja niiden torjuntaan. Lisäksi jotkin eläintaudeista kuten *kryptosporidioosi* ja *salmonella* voivat tarttua myös tilalla työskenteleviin ihmisiin. Nämä ovat siis zoonooseja eli tartuntatauteja, joiden aiheuttajat voivat siirtyä eläimistä ihmisiin ja päinvastoin.

Lähteet

- [1] N. Salonen, R. Mäkinen, M. Ahonen, T. Mäkitalo, A. Pelto-Huikko, M. Latva, A comprehensive indoor hygiene concept for infection prevention and control within built environments, *Frontiers in Built Environment*, 2022, 8, <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.1075009>.
- [2] A. Hollaender, H. Du Buy, H. Ingraham, S. Wheeler, Control of air-borne microorganisms by ultraviolet floor irradiation, *Science*, 1944, 99, 2563, 130–131.

- [3] W. Kowalski, ISO 15714:2019 Method of Evaluating the UV Do, Springer Science and Business Media LLC: Berlin, Germany, 2009, ISBN 9783642019982.
- [4] M. Darnell, K. Subbarao, S. Feinstone, D. Taylor, Inactivation of the coronavirus that induces severe acute respiratory syndrome, SARS-CoV. *J. Virol. Methods*, 2004, 121, 85–91.
- [5] T. Conner-Kerr, P. Sullivan, J. Gaillard, M. Franklin, R. Jones, The effects of ultraviolet radiation on antibiotic-resistant bacteria in vitro, *Ostomy Wound. Manag.*, 1998, 44, 50–56.
- [6] E. Budowsky, S. Bresler, E. Friedman, N. Zheleznova, Principles of selective inactivation of viral genome—I. UV-induced inactivation of influenza virus, *Arch. Virol.*, 1981, 68, 239–247.
- [7] W. Kowalski, W. Bahnfleth, D. Witham, B. Severin, T. Whittam, Mathematical modeling of ultraviolet germicidal irradiation for air disinfection, *Quant. Microbiol.*, 2000, 2, 249–270.
- [8] S. Beck, R. Rodriguez, M. Hawkins, T. Hargy, T. Larason, K. Linden, Comparison of UV-induced inactivation and RNA damage in MS2 phage across the germicidal UV spectrum, *Appl. Environ. Microbiol.*, 2016, 82, 1468–1474.
- [9] A. Besaratinia, J. Yoon, C. Schroeder, S. Bradforth, M. Cockburn, G. Pfeifer, Wavelength dependence of ultraviolet radiation induced DNA damage as determined by laser irradiation suggests that cyclobutane pyrimidine dimers are the principal DNA lesions produced by terrestrial sunlight, *FASEB J.* 2011, 25, 3079–3091.
- [10] D. Mackenzie, Ultraviolet Light Fights New Virus, *Engineering*, 2020, 6, 851–853.
- [11] F. Memarzadeh, R. Olmsted, J. Bartley, Applications of ultraviolet germicidal irradiation disinfection in health care facilities: Effective adjunct, but not stand-alone technology, *Am. J. Infect. Control* 2010, 38, 13–24.
- [12] X. Li, M. Cai, L. Wang, F. Niu, D. Yang, G. Zhang, Evaluation survey of microbial disinfection methods in UV-LED water treatment systems. *Sci. Total Environ.*, 2019, 659, 1415–1427.
- [13] L. Fletcher, C. Noakes, C. Beggs, P. Sleight, K.; Kerr, The ultraviolet susceptibility of aerosolised microorganisms and the role of photoreactivation, In *Proceedings of the 2nd International Congress on Ultraviolet Technologies*, Vienna, Austria, 9–11 July 2003, International Ozone Association: Scottsdale, AZ, USA, 2003, 10.
- [14] R. Setlow, E. Grist, K. Thompson, A. Woodhead, Wavelengths effective in induction of malignant melanoma. *Proc. Natl. Acad. Sci., USA* 1993, 90, 6666–6670.
- [15] S. Ahmad, *Ultraviolet Light in Human Health, Diseases and Environment*, Springer: Berlin, Germany, 2017, Volume 996, ISBN 978-3-319-56017-5.
- [16] Y. Kebbi, A. Muhammad, A. Sant’Ana, L. do Prado-Silva, D. Liu, T. Ding, Recent advances on the application of UV-LED technology for microbial inactivation: Progress and mechanism, *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, 2020, 1–27.
- [17] A. Habibi-Yangjeh, S. Asadzadeh-Khaneghah, S. Feizpoor, A. Rouhi, Review on heterogeneous photocatalytic disinfection of waterborne, airborne, and foodborne viruses: Can we win against pathogenic viruses?, *J. Colloid. Interface Sci.*, 2020, 580, 503–514.
- [18] T. Cutler, J. Zimmerman, Ultraviolet irradiation and the mechanisms underlying its inactivation of infectious agents, *Anim. Health Res. Rev.*, 2011, 12, 15–23.
- [19] A. Benabbou, Z. Derriche, C. Felix, P. Lejeune, C. Guillard, Photocatalytic inactivation of *Escherichia coli*. Effect of concentration of TiO₂ and micro-organism, nature, and intensity of UV irradiation. *Appl. Catal. B Environ.*, 2007, 76, 257–263.
- [20] J. Byrne, P. Dunlop, J. Hamilton, P. Fernández-Ibáñez, I. Polo-López, P. Sharma, A. Vennard, A review of heterogeneous photocatalysis for water and surface disinfection, *Molecules*, 2015, 20, 5574–5615.
- [21] B. Da Costa Filho, V. Vilar, Strategies for the intensification of photocatalytic oxidation processes towards air streams decontamination: A review, *Chem. Eng. J.*, 2020, 391, 123531.
- [22] J. Kim, J. Jang, Inactivation of airborne viruses using vacuum ultraviolet photocatalysis for a flow-through indoor air purifier with short irradiation time, *Aerosol Sci. Technol.*,

- 2018, 52, 557–566.
- [23] U. Gaya, A. Abdullah, Heterogeneous photocatalytic degradation of organic contaminants over titanium dioxide: A review of fundamentals, progress and problems, *J. Photochem. Photobiol. C Photochem. Rev.*, 2008, 9, 1–12.
- [24] M. Pelaez, N. Nolan, S. Pillai, M. Seery, P. Falaras, A. Kontos, P. Dunlop, J. Hamilton, J. Byrne, K. O’Shea, A review on the visible light active titanium dioxide photocatalysts for environmental applications. *Appl. Catal. B Environ.*, 2012, 125, 331–349.
- [25] H. Destailats, M. Sleiman, D. Sullivan, C. Jacquiod, J. Sablayrolles, L. Molins, Key parameters influencing the performance of photocatalytic oxidation (PCO) air purification under realistic indoor conditions, *Appl. Catal. B Environ.*, 2012, 128, 159–170.
- [26] D. Pattison, M. Davies, Actions of ultraviolet light on cellular structures, *EXS 2006*, 131–157.
- [27] M. Davies, Singlet oxygen-mediated damage to proteins and its consequences, *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 2003, 305, 761–770.
- [28] J. Cadet, T. Douki, Formation of UV-induced DNA damage contributing to skin cancer development, *Photochem. Photobiol. Sci.*, 2018, 17, 1816–1841.
- [29] R. Sinha, D. Häder, UV-induced DNA damage and repair: A review, *Photochem. Photobiol. Sci.*, 2002, 1, 225–236.
- [30] J. Kesavan, J. Sagripanti, Disinfection of Airborne Organisms by Ultraviolet-C Radiation and Sunlight, *Aerosol Sci. Technol. Appl.*, 2014, 9781119977, 417–439.
- [31] S. Pigeot-Rémy, F. Simonet, D. Atlan, J. Lazzaroni, C. Guillard, Bactericidal efficiency and mode of action: A comparative study of photochemistry and photocatalysis, *Water Res.*, 2012, 46, 3208–3218.
- [32] J. Pouget, T. Douki, M. Richard, J. Cadet, DNA damage induced in cells by γ and UVA radiation as measured by HPLC/GCMS and HPLC-EC and comet assay, *Chem. Res. Toxicol.*, 2000, 13, 541–549.
- [33] A. Ariza-Mateos, S. Prieto-Vega, R. Díaz-Toledano, A. Birk, H. Szeto, I. Mena, A. Berzal-Herranz, J. Gómez, RNA self-cleavage activated by ultraviolet light-induced oxidation, *Nucleic Acids Res.*, 2012, 40, 1748–1766.
- [34] J. Ravanat, T. Douki, J. Cadet, Direct and indirect effects of UV radiation on DNA and its components, *J. Photochem. Photobiol. B Biol.*, 2001, 63, 88–102.
- [35] K. Wigginton, B. Pecson, T. Sigstam, F. Bosshard, T. Kohn, Virus inactivation mechanisms: Impact of disinfectants on virus function and structural integrity, *Environ. Sci. Technol.*, 2012, 46, 12069–12078.
- [36] R. Rastogi, Richa, A. Kumar, M. Tyagi, R. Sinha, Molecular mechanisms of ultraviolet radiation-induced DNA damage and repair, *J. Nucleic Acids*, 2010, 6551, 592980.
- [37] A. Britt, Repair of DNA damage induced by solar UV. *Photosynth. Res.*, 2004, 81, 105–112.
- [38] E. Wurtmann, S. Wolin, RNA under attack: Cellular handling of RNA damage RNA under attack: Cellular handling of RNA damage, *Crit. Rev. Biochem. Mol. Biol.*, 2009, 44, 34–49.
- [39] B. Mayer, Y. Yang, D. Gerrity, M. Abbaszadegan, The Impact of Capsid Proteins on Virus Removal and Inactivation during Water Treatment Processes, *Microbiol. Insights*, 2015, 8s2, MBI.S31441.
- [40] K. Rule Wigginton, L. Menin, J. Montoya, T. Kohn, Oxidation of virus proteins during UV254 and singlet oxygen mediated inactivation. *Environ. Sci. Technol.*, 2010, 44, 5437–5443.
- [41] D. Pattison, A. Rahmanto, M. Davies, Photo-oxidation of proteins, *Photochem. Photobiol. Sci.*, 2012, 11, 38–53.
- [42] M. Davies, Reactive species formed on proteins exposed to singlet oxygen, *Photochem. Photobiol. Sci.*, 2004, 3, 17–25.
- [43] P. Sullivan, T. Conner-Kerr, A comparative study of the effects of UVC irradiation on select prokaryotic and eukaryotic wound pathogens. *Ostomy. Wound. Manag.*, 2000, 46, 28–34.
- [44] H. Mohr, L. Steil, U. Gravemann, T. Thiele, E. Hammer, A. Greinacher, T. Müller, U. Völker, A novel approach to pathogen reduction in platelet concentrates using short-wave ultraviolet light, *Transfusion*, 2009, 49, 2612–2624.

- [45] M. Buonanno, G. Randers-Pehrson, A. Bigelow, S. Trivedi, F. Lowy, H. Spotnitz, S. Hammer, D. Brenner, 207-nm UV Light—A Promising Tool for Safe Low-Cost Reduction of Surgical Site Infections. I: In Vitro Studies, *PLoS ONE*, 2013, 8, e76968.
- [46] M. Buonanno, M. Stanislaukas, B. Ponnaiya, A. Bigelow, G. Randers-Pehrson, Y. Xu, I. Shuryak, L. Smilenov, D. Owens, D. Brenner, 207-nm UV light—A promising tool for safe low-cost reduction of surgical site infections. II: In-vivo safety studies, *PLoS ONE*, 2016, 11, e013841.
- [47] N. Reed, The history of ultraviolet germicidal irradiation for air disinfection, *Public Health Rep.*, 2010, 125, 15–27.
- [48] H. Kitagawa, T. Nomura, T. Nazmul, K. Omori N. Shigemoto, T. Sakaguchi, H. Ohge, Effectiveness of 222-nm ultraviolet light on disinfecting SARS-CoV-2 surface contamination, *Am. J. Infect. Control*, 2021, 49, 3, 299-301.
- [49] J. Ireland P. Klostermann E. Rice R. Clark, Inactivation of *Escherichia coli* by titanium dioxide photocatalytic oxidation, *Appl. Environ. Microbiol.*, 1993, 59, 5, 1668–1670.
- [50] Y. Kikuchi, K. Sunada, T. Iyoda, K. Hashimoto, A. Fujishima, Photocatalytic bactericidal effect of TiO₂ thin films: dynamic view of the active oxygen species responsible for the effect, *J. Photochem. Photobiol. A*, 1997, 106, 51–56.
- [51] M. Cho, J. Yoon, Measurement of OH radical CT for inactivating *Cryptosporidium parvum* using photo/ferrioxalate and photo/TiO₂ systems, *J. Appl. Microbiol.*, 2008, 104, 3, 759–766.
- [52] P. Maness, S. Smolinski, D. Blake, Z. Huang, E. Wolfrum, W. Jacoby, Bactericidal activity of photocatalytic TiO₂ reaction: toward an understanding of its killing mechanism, *Appl. Environ. Microbiol.*, 1999, 65, 9, 4094–4098.
- [53] F. Salih, Enhancement of solar inactivation of *Escherichia coli* by titanium dioxide photocatalytic oxidation, *J. Appl. Microbiol.*, 2002, 92, 5, 920–926.
- [54] W. Pryor, Oxy-radicals and related species: their formation, lifetimes and reactions, *Ann. Rev. Physiol.*, 1986, 48, 657–663.
- [55] T. Daikoku, M. Takemoto, Y. Yoshida, T. Okuda, Y. Takahashi, K. Ota, F. Tokuoka, A. Kawaguchi, K. Shiraki, Decomposition of organic chemicals in the air and inactivation of aerosol-associated influenza infectivity by photocatalysis, *Aerosol Air Qual. Res.* 2015, 15, 1469–1484.
- [56] S. Pigeot-Remy, J. Lazzaroni, F. Simonet, P. Petinga, C. Vallet, P. Petit, P. Vialle, C. Guillard, Survival of bioaerosols in HVAC system photocatalytic filters, *Appl. Catal. B Environ.*, 2014, 144, 654–664.
- [57] C. Rodrigues-Silva, S. Miranda, F. Lopes, M. Silva, M. Dezotti, A. Silva, J. Faria, R. Boaventura, V. Vilar, E. Pinto, Bacteria and fungi inactivation by photocatalysis under UVA irradiation: Liquid and gas phase, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2017, 24, 6372–6381.
- [58] W. Lin, C. Chen, T. Tseng, M. Wei, J. Hsieh, W. Tseng, Micellar layer-by-layer synthesis of TiO₂/Ag hybrid particles for bactericidal and photocatalytic activities, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2010, 30, 2849–2857.
- [59] T. Miyagi, M. Kamei, T. Mitsuhashi, T. Ishigaki, A. Yamazaki A, Charge separation at the rutile/anatase interface: a dominant factor of photocatalytic activity, *Chem. Phys. Lett.* 2004, 390, 399–402.
- [60] C. Renz, Lichtreaktionen der Oxyde des Titans, Cers und der Erdsauern, *Helv. Chim. Acta*, 1921, 4, 961–968.
- [61] A. Jacobsen, Titanium dioxide pigments—correlation between photochemical reactivity and chalking, *Ind. Eng. Chem.*, 1949, 41, 3, 523–526.
- [62] A. Fujishima, K. Honda, Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode, *Nature*, 1971, 238, 5358, 37–38.
- [63] J. Carey, J. Lawrence, H. Tosine, Photodechlorination of PCB's in the presence of titanium dioxide in aqueous suspensions, *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 1976, 16, 6, 697–701.
- [64] S. Frank, A. Bard, Heterogeneous photocatalytic oxidation of cyanide and sulfite in

- aqueous solutions at TiO₂ powders, *J. Am. Chem. Soc.* 1977, 99, 1, 303–304.
- [65] T. Matusunga, Sterilization with particulate photoconductor, *J. Antibact. Antifung. Agents*, 1985, 13, 211–220.
- [66] T. Matsunaga, R. Tomoda, T. Nakajima, H. Wake, Photoelectrochemical sterilization of microbial cells by semiconductor powders, *FEMS Microbiol. Lett.*, 1985, 29, 1–2, 211–214.
- [67] K. Sunada, Y. Kikuchi, K. Hashimoto, A. Fujishima, Bactericidal and detoxification effects of TiO₂ thin film photocatalysts, *Environ. Sci. Technol.*, 1998, 32, 5, 726–728.
- [68] I. Ditta, A. Steele, C. Liptrot, J. Tobin, H. Tyler, H. Yates, D. Sheel, H. Foster, Photocatalytic antimicrobial activity of thin surface films of TiO₂, CuO and TiO₂/CuO dual layers on *Escherichia coli* and bacteriophage T4, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 2008, 79, 1, 127–133.
- [69] W. Jacoby, P. Maness, E. Wolfrum, D. Blake, J. Fennell, Mineralization of bacterial cell mass on a photocatalytic surface in air, *Environ. Sci. Technol.*, 1998, 32, 17, 2650–2653.
- [70] D. Chan, K. Law, C. Kwan, W. Chiu, Application of an air purification system to control airborne bacterial contamination in a university clinic, *Trans. Hong. Kong. Inst. Eng.*, 2005, 12, 1, 17–21.
- [71] D. Friedmann, C. Mendive, D. Bahnemann, TiO₂ for water treatment: Parameters affecting the kinetics and mechanisms of photocatalysis, *Appl. Catal. B Environ.*, 2010, 99, 398–406.
- [72] L. Visai, L. de Nardo, C. Punta, L. Melone, A. Cigada, M. Imbriani, C. Arciola, Titanium oxide antibacterial surfaces in biomedical devices, *Int. J. Artif. Organs*, 2011, 34, 929–946.
- [73] Q. Guo, C. Xu, Z. Ren, W. Yang, Z. Ma, D. Dai, H. Fan, T. Minton, X. Yang, Stepwise photocatalytic dissociation of methanol and water on TiO₂(110), *J. Am. Chem. Soc.*, 2012, 134, 13366–13373.
- [74] K. Sunada, T. Watanabe, K. Hashimoto, Studies on photokilling of bacteria on TiO₂ thin film, *J. Photochem. Photobiol. A Chem.*, 2003, 156, 227–233.
- [75] J. Bogdan, J. Zarzyńska, J. Pławinska-Czarnak, Comparison of Infectious Agents Susceptibility to Photocatalytic Effects of Nanosized Titanium and Zinc Oxides: A Practical Approach, *Nanoscale Res. Lett.*, 2015, Dec. 10, 1, 1023.
- [76] O. Dalrymple, E. Stefanakos, M. Trotz, D. Goswami, A review of the mechanisms and modeling of photocatalytic disinfection, *Appl. Catal. B Environ.*, 2010, 98, 27–38.
- [77] H. Foster, I. Ditta, S. Varghese, A. Steele, Photocatalytic disinfection using titanium dioxide: Spectrum and mechanism of antimicrobial activity, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 2011, 90, 1847–1868.
- [78] M. Cho, H. Chung, W. Choi, J. Yoon, Different inactivation behaviors of MS-2 phage and *Escherichia coli* in TiO₂ photocatalytic disinfection, *Appl. Environ. Microbiol.*, 2005, 71, 270–275.
- [79] J. Kim, C. Lee, M. Cho, J. Yoon, Enhanced inactivation of *E. coli* and MS-2 phage by silver ions combined with UV-A and visible light irradiation, *Water Res.*, 2008, 42, 356–362.
- [80] R. Xu, X. Liu, P. Zhang, H. Ma, G. Liu, Z. Xia, The photodestruction of virus in Nano-TiO₂ suspension, *J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Ed.*, 2007, 22, 422–425.
- [81] J. Sjogren, R. Sierka, Inactivation of phage MS2 by iron-aided titanium dioxide photocatalysis, *Appl. Environ. Microbiol.*, 1994, 60, 344–347.
- [82] I. Paspaltsis, K. Kotta, R. Lagoudaki, N. Grigoriadis, I. Poullos, T. Sklaviadis, Titanium dioxide photocatalytic inactivation of prions, *J. Gen. Virol.*, 2006, 87, 10, 3125–3130.
- [83] R. Van Grieken, J. Marugan, C. Pablos, A. Lopez, Comparison between the photocatalytic inactivation of Gram-positive *E. faecalis* and Gram-negative *E. coli* faecal contamination indicator microorganisms, *Appl. Catal. B*, 2010, 100, 212–220.
- [84] R. Armon, N. Laot, N. Narkis, I. Neeman, Photocatalytic inactivation of different bacteria and bacteriophages in drinking water at different TiO₂ concentrations with or without exposure to O₂, *J. Adv. Oxid. Technol.*, 1998, 3, 145–150.
- [85] M. Cho, Y. Choi, H. Park, K. Kim, G. Woo, J. Park, Titanium dioxide/UV photocatalytic disinfection in fresh carrots. *J. Food*, 2007, Prot. 70, 1, 97–101.

- [86] J. Zhao, C. Chen, W. Ma, Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants Under Visible Light Irradiation, *Topics in Catalysis*, 2005, 35, 3, 269–278.
- [87] Z. Li, Y. Fang, X. Zhan, S. Xu, Facile preparation of squarylium dye sensitized TiO₂ nanoparticles and their enhanced visible-light photocatalytic activity, *J. Alloys Compd.*, 2013, 564, 138–142.
- [88] D. Chatterjee, S. Dasgupta, Visible light induced photocatalytic degradation of organic pollutants, *J. Photochem. Photobiol., C*, 2005, 6, 186–205.
- [89] X. Li, Y. Cheng, S. Kang, J. Mu, Preparation and enhanced visible light-driven catalytic activity of ZnO microrods sensitized by porphyrin heteroaggregate, *Appl. Surf. Sci.*, 2010, 256, 6705–6709.
- [90] V. Bumah, D. Masson-Meyers, W. Tong, C. Castel, C. Enwemeka, Optimizing the bactericidal effect of pulsed blue light on *Propionibacterium acnes* - A correlative fluorescence spectroscopy study, *Photochem. Photobiol. B*, 2020, 202, 111701.
- [91] Y. Wang, R. Ferrer-Espada, Y. Baglo, Y. Gu, T. Dai, Antimicrobial blue light inactivation of *Neisseria gonorrhoeae*: roles of wavelength, endogenous photosensitizer, oxygen and reactive oxygen species, *Lasers Surg. Med.*, 2019, 51, 815–823.
- [92] Y. Wang, R. Ferrer-Espada, Y. Baglo, X. Goh, K. Held, Y. Grad, Y. Gu, J. Gelfand, T. Dai, Photoinactivation of *Neisseria gonorrhoeae*: a paradigm-changing approach for combating antibiotic-resistant gonococcal infection, *J. Infect. Dis.*, 2019, 220, 873–881.
- [93] O. Feuerstein, N. Persman, E. Weiss, Phototoxic effect of visible light on *Porphyromonas gingivalis* and *Fusobacterium nucleatum*: an in vitro study, *Photochem. Photobiol.*, 2004, 80, 412–415.
- [94] C. Enwemeka, D. Williams, S. Hollosi, D. Yens, S. Enwemeka, Visible 405nm SLD Photo-destroys methicillin resistant staphylococcus aureus (MRSA) in vitro, *Lasers Surg. Med.*, 2008, 40, 734–737.
- [95] C. Enwemeka, D. Williams, S. Enwemeka, S. Hollosi, D. Yens, 470nm blue light kills methicillin resistant staphylococcus aureus (MRSA) in vitro, *Photomed. Laser Surg.*, 2009, 27, 221–226.
- [96] J. Guffey, J. Wilborn, In vitro bactericidal effects of 405-nm and 470-nm blue light, *Photomed. Laser Surg.*, 2006, 24, 684–688.
- [97] M. Maclean, S. MacGregor, J. Anderson, G. Woolsey, High intensity narrow spectrum light inactivation and wavelength sensitivity of *Staphylococcus aureus*, *FEMS Microbiol. Lett.*, 2008, 285, 227–232.
- [98] C. Enwemeka, Antimicrobial Blue Light: an Emerging Alternative to Antibiotics, *Photomed. Laser Surg.*, 2013, 31, 11, 509–511.
- [99] M. Gold, Therapeutic and aesthetic uses of photodynamic therapy: part two of a five-part series – Laser and light treatments for *acnes vulgaris* promising therapies, *J. Clin. Aesthet. Dermatol.*, 2008, 1, 3, 28–34.
- [100] K. Caetano, M. Frade, D. Minatel, L. Santana, C. Enwemeka, Phototherapy improves healing of chronic venous ulcers, *Photomed. Laser Surg.*, 2009, 27, 111–118.
- [101] V. Bumah, D. Masson-Meyers, C. Enwemeka, Pulsed 450 nm blue light suppresses MRSA and *Propionibacterium acnes* in planktonic cultures and bacterial biofilms, *J. Photochem. Photobiol. B*, 2020, 202, 111702.
- [102] D. Masson-Meyers, V. Bumah, C. Castel, D. Castel, C. Enwemeka, Pulsed 450nm blue light significantly inactivates *Propionibacterium acnes* more than continuous wave blue light, *J. Photochem. Photobiol. B*, 2020, 202, 111719.
- [103] M. Hessling, U. Wenzel, T. Meurle, B. Spellerberg, K. Hönes, Photoinactivation results of *Enterococcus moraviensis* with blue and violet light suggest the involvement of an unconsidered photosensitizer, *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 2020, 533, 813–817.
- [104] Y. Wang, R. Ferrer-Espada, Y. Baglo, Y. Gu, T. Dai, Antimicrobial blue light inactivation of *Neisseria Gonorrhoeae*: roles of wavelength, endogenous photosensitizer, oxygen, and reactive oxygen species, *Lasers Surg Med.*, 2019, 51, 815–823.

- [105] E. Endarko, M. Maclean, I. Timoshkin, S. MacGregor, J. Anderson, High-intensity 405nm light inactivation of *Listeria monocytogenes*, *Photochem. Photobiol.*, 2012, 88, 1280–1286.
- [106] K. McKenzie, M. Maclean, I. Timoshkin, S. Macgregor, J. Anderson, Enhanced inactivation of *Escherichia Coli* and *Listeria monocytogenes* by exposure to 405 Nm light under sub-lethal temperature, salt and acid stress conditions, *Int. J. Food Microbiol.*, 2014, 170, 91–98.
- [107] S. Bache, M. Maclean, G. Gettinby, J. Anderson, S. MacGregor, I. Taggart, Universal decontamination of hospital surfaces in an occupied inpatient room with a continuous 405 nm light source, *J. Hosp. Infect.*, 2018, 98, 67–73.
- [108] C. Bowman, V. Bumah, I. Neisman, P. Cortez, C. Enwemeka, Structural membrane changes induced by pulsed blue light on methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA), *J. Photochem. Photobiol. B*, 2021, 216, 112150.
- [109] T. Richardson, C. Porter, Inactivation of murine leukaemia virus by exposure to visible light, *Virology*, 2005, 341, 321–329.
- [110] V. Bumah, E. Aboualizadeh, D. Masson-Meyers, J. Eells, C. Enwemeka, C. Hirschmugl, Resistance of B-DNA to blue light induced damage in methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*, *J. Photochem. Photobiol. B*, 2017, 167, 150–157.
- [111] E. Aboualizadeh, V. Bumah, D. Masson-Meyers, J. Eells, C. Hirschmugl, C. Enwemeka, Infrared microspectroscopy study: understanding the antimicrobial activity of selected disinfectants against methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA), *PLoS One*, 2017, 12, 10, 1–15.

Ilmanlaatuanturit osana sisäilma- ja hygienia tutkimusta

Kalle Salonen, DI, asiantuntija, kalle.salonen@samk.fi

Teollistuneissa maissa ihmiset viettävät jopa 90 % ajastaan sisätiloissa. Hyvälaatuinen sisäilma on ensisijaisen tärkeää viihtyvyyden ja terveyden kannalta sekä julkisissa että yksityisissä tiloissa. Tutkimuskeskus WANDER tutkii sisäympäristön hygieniaa ja sen vaikutusta infektioiden ehkäisyssä. Sisäilmalla on suuri vaikutus tartuntatautien leviämiseen, kuten COVID-19-pandemia osoitti. Sisäilman laadun parantaminen ja seuraaminen liittyy olennaisesti sisäympäristön hygieniaan. Oikein valitut ilmanlaatuanturit luovat pohjan sisäilman laatuun liittyvään tutkimukseen.

Sisäilman laatu on monen muuttujan summa. Jotkin muuttujat kuten lämpötila ovat helposti aistittavissa lähes välittömästi tilaan saavuttaessa. Toisaalta osa muuttujista saatetaan havaita vasta viiveellä, tai niiden aiheuttamia seurauksia ei pystytä suoraan yhdistämään sisäilman laatuun. Esimerkiksi kohonnut hiilidioksidipitoisuus saatetaan aistia väsymyksenä. Osa sisäilman laatutekijöistä saattaa vaikuttaa vasta pitkien aikojen kuluessa, jolloin on entistä hankalampaa yhdistää syyseuraussuhteita. On myös huomattava, että jotkin tekijät vaikuttavat rakennuksen käyttäjien lisäksi myös itse rakennuksen terveyteen.

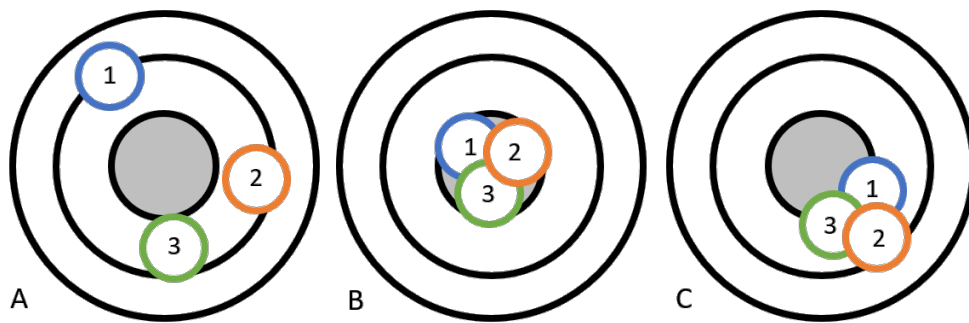
Sisäilma- ja hygienia tutkimuksessa ilmanlaatua voidaan seurata useammasta näkökulmasta. Tutkimuskohteena voi olla suoranaisesti sisäilman laatutekijät. Tällöin voidaan tutkia sisäilman laadun vaikutusta kiinteistöön tai kiinteistön käyttäjiin. Tämän kaltaisessa tutkimuksessa voidaan myös pyrkiä aktiivisesti muuttamaan sisäilman laatutekijöitä ja mitata muutosten aiheuttamaan vastetta. Toisaalta tutkimuksen kohteena voi olla vaikkapa jonkin sisätilan hygieniaan vaikuttavan ratkaisun tehokkuuden arviointi vertailututkimuksen avulla. Tällaisessa tutkimuksessa ei välttämättä pyritä suoranaisesti vaikuttamaan sisäilman mitattaviin laatutekijöihin, vaan tarkoituksena on pikemminkin varmistautua siitä, että vertailtavat tilat ovat sisäilman laadun osalta vertailukelpoisia. Näin voidaan poissulkea ilmanlaadun vaikutus havaittuihin tuloksiin.

Vain osa sisäilman laatutekijöistä on mitattavissa jatkuvatoimisilla antureilla. Tyypillisiä perusmittauksia ovat lämpötila, kosteus ja hiilidioksidipitoisuus. Useimpien kiinteistöjen ilmanvaihto perustuu juuri näiden muuttujien hallintaan. Tämän lisäksi voidaan mitata monia yksittäisiä kemiallisia epäpuhtauksia kuten rikkidioksidia, typen oksideja, otsonia ja hiilimonoksidia sekä VOC-yhdisteitä (haihtuvat orgaaniset yhdisteet). Omana ryhmänään voidaan mitata myös hiukkasmaisia partikkeleita. Partikkelit ryhmitellään koon perusteella. Hengitettäviä hiukkasia ovat kaikki alle 10 µm halkaisijan omaavat partikkelit ja pienhiukkasista puhuttaessa viitataan halkaisijaltaan alle 2.5 µm partikkeleihin.

Ilmanlaatuanturin vaatimukset

Sisäilma- ja hygienen tutkimus asettaa omat vaatimuksensa ilmanlaatuantureille. Erityisesti Living Lab -kohteissa suoritettavat tutkimukset edellyttävät suurehkoa anturimäärää riittävän kattavuuden ja vertailtavuuden aikaansaamiseksi. **Tällöin korostuvat erityisesti mittalaitteiden siirrettävyys ja kustannustehokkuus. Toisaalta mittalaitteilta edellytetään luotettavuutta ja mitatun tiedon helppoa saavutettavuutta esimerkiksi tallenteena.** Nämä perusvaatimukset poissulkevat suurimman osan niin laboratorionkäyttöön suunnitelluista antureista kuin kuluttajamarkkinoille suunnatuista tuotteista. Laboratoriotason mittalaitteet ovat hinnaltaan ja siirrettävyydeltään lähtökohtaisesti soveltumattomia, mutta tuottavat erittäin laadukasta mittausdataa. Toisaalta kuluttajillekin suunnatut anturiratkaisut ovat usein hyvin helposti siirrettäviä ja hankintahinnaltaan edullisia. Ongelmaksi saattaa kuitenkin muodostua mittausdatan laatu.

Antureiden absoluuttinen tarkkuusvaatimus on tyypillisesti suhteellinen. **Useimmissa tapauksissa pyritään havaitsemaan eroja tai todentamaan samankaltaisuutta, jolloin absoluuttiset arvot menettävät osittain merkityksensä.** Tätä on havainnollistettu kuvassa 1.



Kuva 1. Erillisten mittalaitteiden 1-3 täsmällisyys ja tarkkuus. A) epätarkka ja epätasmällinen; B) tarkka ja täsmällinen; C) epätarkka ja täsmällinen.

Hyvä mittalaite on sekä täsmällinen että tarkka (kuva 1B). Vertailevissa mittauksissa täsmällisyys on kuitenkin yleensä tarkkuutta tärkeämpi ominaisuus koska erojen luetettava havaitseminen on esiarvoisen tärkeää. Tällöin myös kuvan 1C mittalaite soveltuu käytettäväksi pienestä absoluuttisesta virheestä huolimatta. Tämä on anturivaatimuksien kannalta huomionarvoista, koska täsmällisyyden todentaminen on verraten helppoa. Lisäksi kalibroinneissa voidaan keskittyä ensisijaisesti täsmällisyyden ja toistettavuuden saavuttamiseen sen sijaan että tavoiteltaisiin absoluuttista tarkkuutta.

Kaupallisten laitteiden osalta mittausdatan saatavuus on usein pullonkaula, sillä kuluttajille suunnatuissa mittalaitteissa ei yleensä ole toteutettuna ominaisuuksia tähän tarpeeseen. Tulokset voi olla mahdollista lukea esim. laitevalmistajan sovelluksella älylaitteen ruudulle tai niitä voidaan tarkastella visualisoituna, mutta numeerinen saatavuus osoittautuu monesti mahdottomaksi. Kalliimpien laitteiden kohdalla tulokset saattavat tallentua esim. pilvipohjaiselle palvelimelle, josta ne on mahdollista koostaa numeerisiksi raporteiksi. Tällöin kustannusten ohella haasteena voi olla suurten datamäärien manuaalinen käsittely.

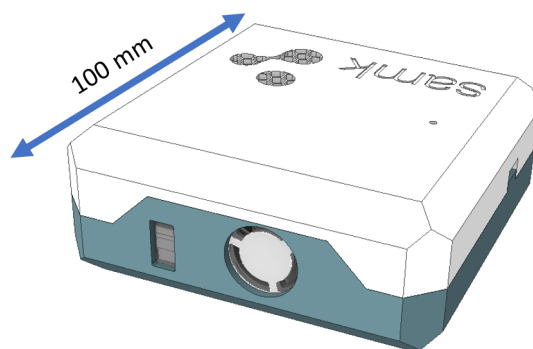
Kohti tarvelähtöistä ratkaisua

Tutkimuskeskus WANDER:ssa on käynnissä tutkimushankkeita, joissa tutkitaan erilaisten sisäympäristön hygienia- ja terveysratkaisujen vaikutusta mikrobipitoisuuksiin ja sairastuvuuteen. Näissä hankkeissa on ilmennyt tarve mitata sisäilman laatutekijöitä erityisesti vertailututkimuksen näkökulmasta. **Tutkimushankkeiden sisällön perusteella mitattaviksi suureiksi asetettiin lämpötila, ilmankosteus, hiilidioksidi ja partikkelit.** Lisäksi pidettiin tavoiteltavana, että yksi mittalaite pystyisi mittaamaan kaikki halutut muuttujat. Mittaustulokset haluttiin myös tallentaa reaaliaikaisesti

erilliselle tallennuspalvelimelle, josta ne olisivat saatavilla sekä ohjelmallisesti että manuaalisesti milloin tahansa. Koska tarkoitukseen soveltuvaa kaupallista laitetta ei löydetty, päätettiin kehittää oma ilmanlaatuanturi, joka täyttäisi asetetut vaatimukset. Samat haasteet ovat johtaneet vastaavaan lähestymistapaan myös muissa tutkimushankkeissa [1].

Anturikehityksen lähtökohdana pidettiin kaupallisten anturimoduulien hyödyntämistä ja näiden yhdistämistä yhdeksi anturikonaisuudeksi. Verrattain edullisesta hankintahinnasta huolimatta näiden moduulien suorituskyky on riittävä tämänkaltaiseen sovellukseen [2, 3 ja 4]. Anturi päätettiin toteuttaa kahden erillisen mittamoduulin avulla, joista toinen vastaisi hiilidioksidin mittauksesta ja toinen partikkelien mittauksesta. Kumpikin mittamoduuli sisälsi lisäksi lämpötila- ja ilmakestiusanturin. Hiilidioksidin mittaus perustuu optiseen NDIR-tekniikkaan (non-dispersive infrared) ja on varustettu rinnakkaisella referenssikennolla, joka parantaa laitteen täsmällisyyttä erityisesti pitkällä aikavälillä. Partikkelien mittaus perustuu niin ikään optiseen menetelmään, joka tuottaa mitatut PM1.0 ja PM2.5 arvot, sekä laskennalliset PM4 ja PM 10 arvot. Partikkelianturista valittiin versio, joka mittaa lisäksi VOC- ja NOx-indeksin. Valittu mittauskokonaisuus on hyvin linjassa vastaavien kehityshankkeiden kanssa, mutta tähtää keskimääräistä pidempään käyttöikään [5].

Ilmanlaatuanturin tiedonsiirto ja mittamoduulien tiedonsiirto toteutettiin Arduino-kehitysalustalla. Tätä lähestymistapaa puolsivat erityisesti toteutuksen helppous ja kustannustehokkuus. Valitun lähestymistavan ansiosta mittalaitteeseen vaadittiin ainoastaan hyvin yksinkertainen piirikortti, johon valmiit komponentit voitiin liittää. Anturin kotelointi toteutettiin pienen valmistusmäärän vuoksi 3D-tulostuksella. Valmiin ilmanlaatuanturin havainnekuva on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. WANDER:ssa kehitetty ilmanlaatuanturi.

Valittu kehitysalusta tukee WiFi-verkkoa, joten tiedonsiirto päätettiin toteuttaa hyödyntäen tätä ominaisuutta. Tiedonsiirtoprotokollaksi valittiin tämänkaltaiseen IoT-sovellukseen hyvin soveltuva MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) [6]. MQTT:n kantavana ajatuksena on, että mittalaite lähettää (Publish) tulokset ennalta määrätylle palvelimelle (MQTT-Broker), josta ne voidaan edelleen jakaa (Subscribe), esim. tallennusta tai reaaliaikaista käsittelyä varten. Toteutetussa ratkaisussa erillinen palvelin kerää reaaliaikaisesti kaikkien antureiden tulokset ja tallentaa ne pilvipohjaiseen tietokantaan.

Jatkokehitys

Toteutettu ilmanlaatuanturi on todettu teknisesti toimivaksi ratkaisuksi. Joustavan toteutustavan ansiosta anturia on kuitenkin mahdollista edelleen kehittää. **Yhtenä kehityssuuntana on antureiden ryhmäkalibrointi, yksittäiskalibroinnin sijaan.** Tällä pyritään siihen, että valittu joukko antureita kalibroidaan tuottamaan yhtenäinen, täsmällinen mittaustulos (vrt. kuva 1B ja 1C). Tällöin antureiden soveltuvuus vertailututkimuksissa paranisi entisestään.

Toisena kehityssuuntana on langattomien lisäantureiden liittäminen ilmanlaatuanturiin. Lisäantureiden avulla pyritään tuottamaan ilmanlaatumittauksia selventävää informaatiota. Tästä voisi olla esimerkkinä langattomat liikeanturit, jotka seuraavat tilan käyttöä. Näin ilmanlaadun mittaustuloksia voidaan tarkastella monipuolisemmin. Esimerkiksi partikkelipitoisuuksien vaihtelussa voidaan luotettavammin tunnistaa sisäiset ja ulkoiset tekijät.

Reaaliaikainen ja helposti saavutettava mittausdata mahdollistaa myös uudenlaisia sovellutuksia. Olemassa olevan järjestelmän yhteyteen on mahdollista kehittää erilaisia tiedonkäsittelyalgoritmeja. Yksinkertaisimmillaan kyse voisi olla verrokkitilojen erosuureiden automaattisesta laskennasta. Tiedonkäsittelyä on kuitenkin mahdollista automatisoida myös paljon pidemmälle. Tavoitteena on kehittää työkaluja erityisesti mittausdatan automaattiseen analysointiin.

Lähteet

- [1] J. Jo, B.-W. Jo, J.-H. Kim, S.-J. Kim, ja W.-Y Han, Development of an IoT-Based Indoor Air Quality Monitoring Platform, Journal of Sensors, Yhdysvallat, 2020, s. 1-14.
- [2] J. Kuula, T. Mäkelä, M. Aurela, K. Teinilä, S. Varjonen, Ó.r González, ja H. Timonen, Atmos., Laboratory evaluation of particle-size selectivity of optical low-cost particulate matter sensors, Atmospheric Measurement Techniques, Saksa, 2020, s. 2413–2423.

- [3] M. Giordano, C. Malings, S. Pandis, A. Presto, V. F. McNeill, D. Westervelt, M. Beekmann ja R. Subramanian, From low-cost sensors to high-quality data: A summary of challenges and best practices for effectively calibrating low-cost particulate matter mass sensors, *Journal of Aerosol Science, Iso-Britannia*, 2021, s. 1-23.
- [4] M. García, A. Spinazzé, P. Branco, F. Borghi, G. Villena, A. Cattaneo, A. Gilio, V. Mihucz, E. Álvarez, S. Lopes, B. Bergmans, C. Orłowski, K. Karatzas, G. Marques, J. Saffell ja S. Sousa, Review of low-cost sensors for indoor air quality: Features and applications, *Applied Spectroscopy Reviews, Yhdysvallat*, 2022, s. 747-779.
- [5] L. Zhao, Y. Yang ja Z. Wu, Review of Communication Technology in Indoor Air Quality Monitoring System and Challenges, *Electronics, Sveitsi*, 2022, s. 1-32.
- [6] B. Mishra ja A. Kertesz, The Use of MQTT in M2M and IoT Systems: A Survey, *IEEE Access, Yhdysvallat*, 2020, s. 201071-201086.

Tutkimusympäristö Tutkimuskeskus WANDERin osaamisen kerryttäjänä

Aino Peltö-Huikko, DI, lehtori, aino.pelto-huikko@samk.fi

Satakunnan ammattikorkeakoulun Tutkimuskeskus WANDERin on tehnyt merkittävää tutkimusta erilaisissa tutkimusympäristöissä. Tutkimusympäristöjen merkitystä ei voi aliarvioida tutkimuskeskusten osaamisen kasvattajana ja toisaalta yhteistyömahdollisuuksien luojana. Artikkelissa tarkastellaan toimistotalo Sytyttimen käyttöä tutkimusympäristönä ja siellä tehtyjen tutkimusten tuloksia.

Raumalla sijaitseva Teknologiaatalo Sytytin otettiin käyttöön huhtikuussa 2011. Tutkimusympäristö suunniteltiin osana talon muuta suunnittelua ja siten taloon rakennettiin innovatiivinen Living Lab -ympäristö, jossa kiinteistön vesijärjestelmä toimii tutkimuskäytössä. Tutkimusverkostoon liittyen tehtiin jo rakentamisvaiheessa ensimmäinen opinnäytetyö, jossa seurattiin ja analysoitiin suunnitteluvaihetta [1]. Ensimmäisen käyttövuoden veden laadun sekä verkoston seurannasta saadut tulokset [2] loivat pohjan tulevalle tutkimukselle. Laajempaa tutkimusta tehtiin osana strategisen osaamisen keskittymän (SHOK) Sisäympäristö-ohjelman Käyttäjäkeskeinen sisäympäristö -työpaketin vesikokonaisuutta [3]. Teknologiaatalo Sytyttimeen liittyen on tehty useita opinnäytetöitä aiheenaan käyttövesiverkoston simulointi [4], paineiskujen vaikutukset [5], langattomat anturiverkostot [6], sisäympäristömittaukset [7], käyttövesiverkoston energiatehokkuus [8] sekä messinkimateriaalien kestävyys [9].

Käyttövesiverkosto tutkimusympäristönä käyttövesiverkosto

Teknologiaatalo Sytyttimen kiinteistössä on kolme erilaista vesijärjestelmää: kupari-, PEX- ja monikerrosputket. Kupari- ja PEX-järjestelmien eriyttäminen alkaa lämmönjakohuoneesta, ja kummallakin järjestelmällä on omat lämmönvaihtimet kellarikerroksessa. Keskeiset putkilinjat kiinteistön keskellä jakautuvat siten, että yhdessä osassa on kupariputket ja toisessa osassa PEX-putket. Monikerrosputkijärjestelmä toimii kylmävesiverkostona kellarikerroksissa.

Tutkimuksessa keskitytään erityisesti kupari- ja PEX-putkijärjestelmiin, jotka ovat osa samaa kiinteistöä. Tutkimusverkosto kattaa nämä kaksi järjestelmää ja sisältää lisäasennuksia, kuten vesinäytteiden ottopisteitä, jatkuvatoimisia vesimittareita ja putkikeräinjärjestelmiä, jotka mahdollistavat materiaalien vertailun ja vesinäytteiden ottamisen. Inkisen artikkelissa [2] on kuvattu koko talon järjestelmä. Kiinteistön vesi saadaan Rauman Vedeltä, joka käsittelee pintavettä talousvedeksi käyttäen useita prosessivaiheita, kuten saostus, flotaatio ja desinfiointi.

Tutkimusympäristöä on käytetty monipuolisesti. Tutkimusta on tehty kiinteistön vesijohtoverkostossa talousveden laatuun kuin materiaaleihinkin liittyen. Lisäksi järjestelmän mitoittamiseen ja mallinnukseen sekä näiden tuomiin ilmiöihin kuten paineiskuihin liittyen on tehty tutkimusta.

Vedenlaatututkimusta teknologiatalo Sytyttimessä

Kiinteistön käyttöönotto vaihe on mielenkiintoinen vesijärjestelmien kannalta. Materiaalien kestävyys kannalta käytön alkuvaiheessa tapahtuu erilaisia hapettumisreaktioita, joiden seurauksen verkoston ja veden laadun kannalta ovat moninaiset eikä aina tarkasti tiedossa. Tutkimusympäristö mahdollisti alkuvaiheen tarkemman tutkimuksen sekä veden laadun että materiaalien kannalta. Tutkimusverkoston käyttöönotto, ensimmäinen toimintavuosi ja sen aikana tehdyt laajat analyysit on kuvattu yksityiskohtaisesti Inkisen ym. [2] kirjoittamassa artikkelissa.

Tutkimuksen [2] mukaan merkittävimmät muutokset tapahtuivat ensimmäisen puolen vuoden aikana veden laadussa sekä veden ja putkimateriaalien vuorovaikutuksessa. Pitoisuudet tasoittuivat tämän jälkeen, ja vaihtelua esiintyi lähinnä vuodenajan vaikutuksesta. Korkeimmat lyijypitoisuudet havaittiin ensimmäisen käyttöönottoviikon aikana, ja sekä epäorgaanisia että orgaanisia yhdisteitä vapautui putkimateriaaleista. Putkimateriaalilla ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta biofilmin muodostumiseen ensimmäisen vuoden aikana.

Tutkimus [2] osoitti, että kiinteistöissä veden ja putkimateriaalin välinen vuorovaikutus oli suurempi kuin päävesilinjoissa, mikä johti suurempiin veden laadun muutoksiin rakennuksissa. Nämä vaikutukset olivat erityisen merkittäviä ensimmäisen vuoden aikana. Siksi on tärkeää ottaa alueen veden laatu huomioon valittaessa putkimateriaaleja kiinteistöjen vesiverkostoihin, jotta voidaan vähentää mahdollisia materiaalin ja veden vuorovaikutuksia.

Veden mikrobiologista laatua tarkasteltiin tutkimuksessa [2] pesäkelukumäärällä. Kylmässä vedessä ne kasvoivat nopeasti muutamassa päivässä, kun taas lämpimän veden pesäkelukumäärä kasvoi ensimmäisten viikkojen aikana. Lämpimän veden pesäkelukumäärä oli huomattavasti pienempi kuin kylmän veden. Eri putkimateriaalien välillä ei havaittu merkittäviä eroja, koska pesäkelukumäärät kasvoivat nopeasti ja pysyivät suunnilleen samalla tasolla kummassakin materiaalissa.

Kiinteistön vesiverkoston paineiskut vaikuttavat veden laatuun

Vesijohtoverkostossa tulee paineiskuja mm. normaaliin käyttöön liittyen hanojen ja venttiilien avaamiseen ja sulkemiseen. Näiden paineiskujen suuruutta tutkittiin teknologiatalo Sytyttimen verkostossa osana strategisen osaamisen keskittymän (SHOK) Sisäympäristö-ohjelman Käyttäjäkeskeinen sisäympäristö -työpakettin vesikokonaisuutta. Tarkemmat tulokset löytyvät hankkeen loppuraportista. [3]

Paineenvaihtelut voivat irrottaa vesijohtoverkoston kertyneitä sakkoja, joissa usein on runsaasti mikrobeja. Tämä mikrobien pitoisuuden kasvu vedessä voi aiheuttaa esteettisiä ongelmia veden laadussa, ja paineenvaihtelut voivat ilmetä myös veden sameuden muutoksina.

Tutkimuksen [3] mukaan tulisi syventyä edelleen paineen vaikutuksiin mikrobien irtoamiseen. Alustavat tulokset viittaavat siihen, että paineenalennusventtiilin asentaminen voi vähentää mikrobien irtoamista paineiskujen seurauksena.

Paineenvaihteluiden aiheuttamia ongelmia hanaveden laadulle voitaisiin pienentää kehittämällä hanoja, jotta ne aiheuttaisivat vähemmän painevaihteluita. Myös paineenvaihteluiden vähentäminen verkostossa paineenalennusventtiilin avulla voisi olla käytännöllinen keino hallita tällaisia piikkejä. Lisäksi muovimateriaalin käyttö hanaventtiilien rakenteissa voisi vähentää korkeapaineisia vaihteluita, jotka syntyvät tavallisesti hanoja avattaessa ja sulkiessa. [3, 4, 5]

PEX-putkista liukenevat kemikaalit

Teknologiatalo Sytyttimestä tutkittiin vesinäytteiden avulla kiinteistöstä viiden ensimmäisen vuoden aikana PEX-a-putkista liukenevia haihtuvia orgaanisia yhdisteitä (Volatile Organic compounds, VOC). Tyypillisimmät havaitut VOC-yhdisteet ovat metyyli-tert-butyylietteri (MTBE), etyyli-tert-butyylietteri (ETBE), tert-amyylimetyylietteri (TAME) ja tert-butyylialkoholi (TBA). Tulokset julkaistiin osana

Pelto-Huikon ja muiden [10] artikkelia, jossa vesinäytteistä tehdyt analyysit yhdistettiin materiaalinäytteiden tuloksiin, sekä suomenkielisenä raporttina, jossa tuloksia yhdistettiin pilottimittakaavan tuloksiin [11].

Vesinäytteiden perusteella varhaisessa käytösvaiheessa mitatut korkeat TBA-pitoisuudet vaativat ohjeita keskivertokäyttäjille haitallisten terveysvaikutusten välttämiseksi. MTBE ja ETBE pysyivät jo varhaisessa käytösvaiheessa melko kohtuullisella tasolla. Näistä kolmesta yhdisteestä TBA todennäköisesti kantaa suurinta terveysriskiä ja vaatii terveysperusteisen enimmäispitoisuusarvon arvioitaessa juomaveden laatua. Putkinäytteiden perusteella putkimateriaaleista on kulunut putkien säilymiseen liittyviä kemikaaleja eli antioksidantteja ensimmäisen viiden vuoden aikana, mutta kaikki tutkitut putket olivat melko hyvässä kunnossa. Antioksidanttien kulutukseen vaikuttavat veden lämpötila, laatu ja määrä, putken koko ja virtausnopeus. [10]

Sinkinkadon kestävämmätön messinki vesijärjestelmissä: Riskit, laadunvarmistus ja veden vaikutus

Veden laadun vaikutus messinkiosien korroosioon on Pohjoismaissa ollut hyvin tunnettu ongelma. Käytännössä tämä tarkoittaa sinkinkadon kestävämmätönä messingistä valmistettujen osien aiheuttamaa vesivahinkoriskiä. Tämä riski voi johtaa haitallisiin kosteus- ja mikrobivaurioihin kiinteistöissä, mikä puolestaan altistaa asukkaat terveysongelmille. Tämän ongelman ratkaisemiseksi on olennaista ymmärtää, miten veden laatu ja messinkiosien laatu vaikuttavat sinkinkatoon sekä miten hankintaketju ja lainsäädäntö voivat auttaa välttämään näitä riskejä.

Messinkiosien laadun arvioiminen on vaikeaa pelkän silmämääräisen tarkastelun perusteella. Sinkinkadon kestävämmätönä messinkiä on merkitty kirjaimilla CR tai DZR, mutta pienemmissä osissa tätä merkintää ei aina ole. Tämä tekee laadun tarkistamisen haastavaksi, erityisesti pienissä liittimissä. Jotta laadunvarmistus olisi mahdollista, hankintaketjun toimivuus on keskeistä. LVI-tukkujen ja isojen urakoitsijoiden hankintakanavien on oltava toimivia, ja heidän on ymmärrettävä eri tuotehyväksyntöjen merkitys.

Suomessa kansallisen lainsäädännön mukaan kiinteistön vesijärjestelmissä on käytettävä sinkinkadon kestävämmätönä messinkiä. Tästä vastaa rakennushankkeeseen ryhtyvä taho, ja julkisten kiinteistöjen rakentamisessa on noudatettava hankintalakia.

Tuotteiden määrittelyssä on tärkeää vaatia ja varmistaa, että ne täyttävät vaatimukset, erityisesti sinkinkadon kestävyys-suhteen.

Veden laadulla on olennainen vaikutus sinkinkadon kestävyys-suhteen. Vaikka lainsäädäntö määrittelee, että vesi ei saa olla syövyttävää, tarkempia parametreja ei ole asetettu. Syövyttävä vedenlaatu ja sen seisominen putkistossa voivat edistää metalliosien korroosiota ja metallien liukenemistä talousvedeen. Tässä yhteydessä vesilaitosten vastuu teknisestä veden laadusta on tullut esille. Veden syövyttävyyteen voi vaikuttaa veden käsittelyllä, mutta tämä on haastavaa. Korroosiota voidaan myös ehkäistä käyttämällä kestävämpiä materiaaleja vesijohtoverkostoissa.

Teknologiatalo Sytyttimessä tehdyssä tutkimuksessa todettiin, että sinkinkadonkestämättömät messinkiosat syöpyvät putki ensimmäisen viiden käyttövuoden aikana [9, 12]. Tämä tutkimus on auttanut eurooppalaisen materiaalihyväksyntäjärjestelmän taustatyössä ja neuvotteluryhmissä osoittamaan konkreettiset pohjoismaisen veden laatuun liittyvät materiaali-ongelmat.

Yhteenveto

Satakunnan ammattikorkeakoulun Tutkimuskeskus WANDER on tehnyt vaikuttavaa tutkimusta erilaisissa tutkimusympäristöissä, erityisesti Teknologiatalo Sytyttimessä. Tutkimusta on tehty sekä vettä että materiaaleja koskien.

Teknologiatalo Sytytin Raumalla on merkittävä Living Lab -ympäristö, joka mahdollistaa vesijärjestelmien ja veden laadun tutkimuksen kiinteistön eri osissa. Tässä kiinteistössä on kolme erilaista vesijärjestelmää: kupari-, PEX- ja monikerrospotket. Tutkimus keskittyy erityisesti kupari- ja PEX-putkijärjestelmiin sekä niiden ja veden välisten vuorovaikutusten ymmärtämiseen. Tämä ympäristö tarjoaa ainutlaatuisen mahdollisuuden tutkia vedenlaadun vaikutusta materiaalien korroosioon ja vesivahinkoriskeihin kiinteistöissä.

Tutkimuksissa on havaittu, että kiinteistön käyttöönotto ja ensimmäiset vuodet ovat kriittisiä vesijärjestelmien ja veden laadun kannalta. Veden laatu ja putkimateriaalien vuorovaikutus ovat monimutkaisia ja voivat aiheuttaa muutoksia veden laadussa. Kuitenkin nämä muutokset tasoittuvat ajan myötä ja liittyvät usein vuodenajan vaihteluihin. Alueen veden laatu vaikuttaa merkittävästi näihin vuorovaikutuksiin, ja siksi on tärkeää valita oikeat putkimateriaalit kiinteistöjen vesiverkostoihin.

Kokonaisuudessaan tehty tutkimus osoittaa, kuinka tärkeää on ymmärtää veden laadun vaikutus materiaalien korroosioon ja vesivahinkoriskeihin kiinteistöissä. Teknologiatalo Sytytin toimii arvokkaana Living Lab -ympäristönä, joka mahdollistaa tällaisten tutkimusten tekemisen ja auttaa parantamaan kiinteistöjen vesijärjestelmien laatua ja turvallisuutta.

Lähteet

- [1] Vepsä J. (2010) Rauman teknologiatalon talousveden tutkimusverkoston suunnitteluvaiheen seuranta ja analysointi. Opinnäytetyö. Satakunnan ammattikorkeakoulu.
- [2] Inkinen J., Kaunisto T., Pursiainen A., Miettinen I.T., Kusnetsov J., Riihinen K., Keinänen-Toivola M.M. 2014. Drinking water quality and formation of biofilms in an office building during its first year of operation, a full scale study. *Water Research* 49, 83–91. doi: [10.1016/j.watres.2013.11.013](https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.11.013).
- [3] Pelto-Huikko A. (toim.) 2015. Käyttövesijärjestelmien tutkimus Sisäympäristö-ohjelmassa: laatu, turvallisuus sekä veden- ja energiansäästö.
- [4] Peltonen M. (2013). Rakennuksen käyttövesiverkoston simulointi hydraulisella mallilla. Opinnäytetyö. Aalto yliopisto.
- [5] Kukkasmäki M. (2013). Paineiskujen vaikutukset käyttövesiverkostossa. Opinnäytetyö. Satakunnan ammattikorkeakoulu.
- [6] Kukka M. (2013). Langattomat anturiverkot kiinteistön olosuhteiden seurannassa. Opinnäytetyö. Satakunnan ammattikorkeakoulu.
- [7] Uusitalo S. (2013). Sisäympäristömittaukset Hygtech-projektin pilottikohteissa. Opinnäytetyö. Satakunnan ammattikorkeakoulu.
- [8] Rämö M. (2012). Toimistorakennuksen käyttövesijärjestelmän energiatehokkuus. Opinnäytetyö. Satakunnan ammattikorkeakoulu.
- [9] Mäkinen R. ja Pelto-Huikko A. (2017). Kiinteistöjen vesijärjestelmien messinkiosien vauriot vesivahinkojen aiheuttajana. RTA-opinnäytetyö. Rateko.
- [10] Pelto-Huikko A, Ahonen M, Ruismäki M, Kaunisto T, Latva M. 2021. Migration of Volatile Organic Compounds (VOCs) from PEX-a Pipes into the Drinking Water during the First Five Years of Use. *Materials*. 14(4):746. doi: [10.3390/ma14040746](https://doi.org/10.3390/ma14040746).
- [11] Kaunisto T., Pelto-Huikko A., Kiuru J., Latva M. (2017) PEX-putkista liukeneva tert-butyylialkoholi (TBA). Vesi-Instituutin julkaisuja 7. Satakunnan ammattikorkeakoulu, Sarja B, Raportit 13/2017. ISBN 978-951-633-239-3. urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2017121120530
- [12] Latva M., Kaunisto T., Pelto-Huikko A. (2017) Durability of the non-dezincification resistant CuZn40Pb2 brass in Scandinavian waters. *Engineering Failure Analysis*, 74, 133-141, doi: [10.1016/j.engfailanal.2017.01.011](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.01.011).

Nanokuplat, ja niiden synty, stabiilius ja ominaisuudet

Jussi Tamminen, TKT, tutkija, jussi.tamminen@samk.fi

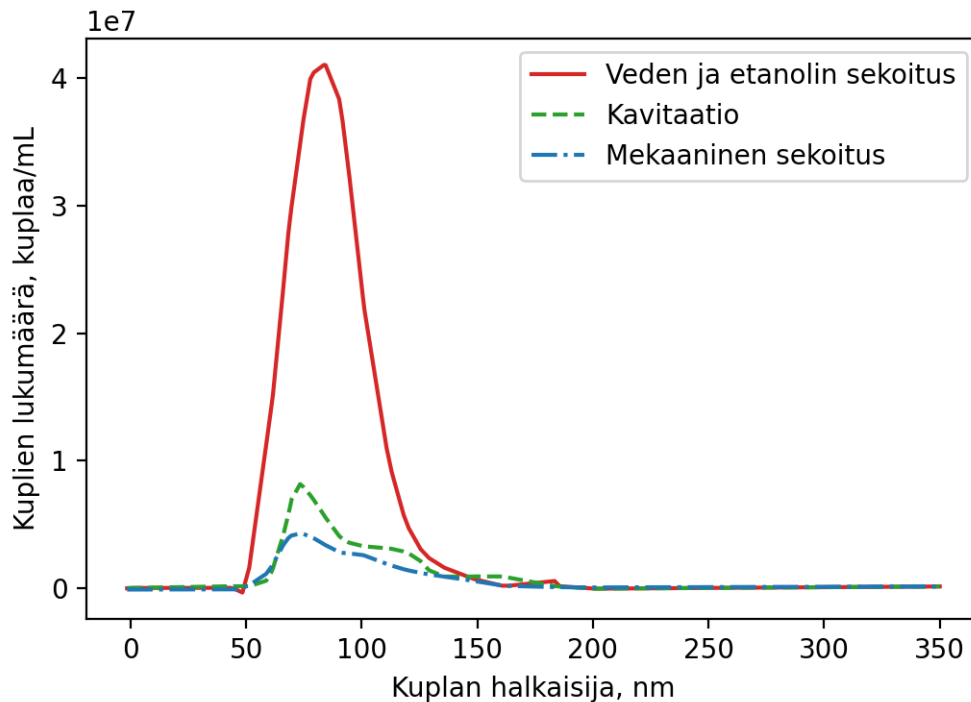
Nanokuplat ovat vedessä olevia nanokokoisia kaasukuplia, jotka ovat olleet löytämisestään asti kasvavan kiinnostuksen kohteena. Nanokuplia näyttäisi muodostuvan suhteellisen helposti ja niiden on havaittu pysyvän vedessä useita kuukausia muodostumisensa jälkeen, kun olosuhteet ovat sopivat. Kun olosuhteet pysyvät vakioina, niiden pysyvyyttä voidaan hyödyntää esim. kaasuvälikampana kasteluvesissä, jolloin kasveille pystytään paremmin siirtämään veden mukana niiden tarvitsemää happea. Toinen mahdollisuus voi olla käyttää nanokuplia kontrolloimaan vesijohtojen biofilmejä. Nanokuplien soveltamista edellä mainittuihin tarkoituksiin tutkitaan useissa Tutkimuskeskus Wanderin käynnissä olevissa hankkeissa. Nanokuplien tutkimus on intensiivistä ja uudet tutkimustulokset voivat johtaa kokonaan uusiin innovaatioihin. Tässä artikkelissa esitetään nanokuplien syntyyn ja stabiiliuteen vaikuttavat tekijät sekä nanokuplien ominaisuudet.

Nanokuplien muodostuminen

Nanokuplat tai ultrapienet kuplat ovat vedessä olevia pieniä kaasukuplia, joiden koko on alle 1 µm. Nanokuplien muodostuminen näyttää olevan yleistä, koska niitä on löydetty sekä luonnonvesistä [1], että eri menetelmillä käsitellyistä vedestä tai vesiliuoksista [2–13]. Nanokuplien tiedetään muodostuvan sen jälkeen, kun vesi on altistunut akustiselle [2–6] tai hydrodynaamiselle kavitaatiolle [7–9]. Nanokuplia voidaan tuottaa myös käyttämällä tehostettua sekoitusta esim. roottori-staatori- sekoittimessa (eng. High Shear Mixer, HSM) [3] tai tehosekoittimessa [10]. Muita menetelmiä, joiden tiedetään tuottavan nanokuplia, ovat etanolin [3] tai suolan [11] sekoittaminen veteen, pulssilaserin käyttö [12] sekä jaksottaisen paineenvaihtelun käyttö [13].

Eri menetelmät tuottavat vaihtelevia määriä nanokuplia [3] (ks. Kuva 1). Veden ja etanolin sekoitus tuottaa suurimmat nanokuplien pitoisuudet, kun taas akustinen kavitaatio ja mekaaninen sekoitus tuottavat pienempiä määriä nanokuplia. Nanokuplien pitoisuudet on mitattu käyttäen NTA (Nanoparticle tracking analysis)

-menetelmää, jossa kuplan koko mitataan perustuen sen Brownin liikkeeseen. Nanokuplia on myös havaittu värjäämällä niiden pinta ja kuvaamalla ne mikroskoopilla [8].

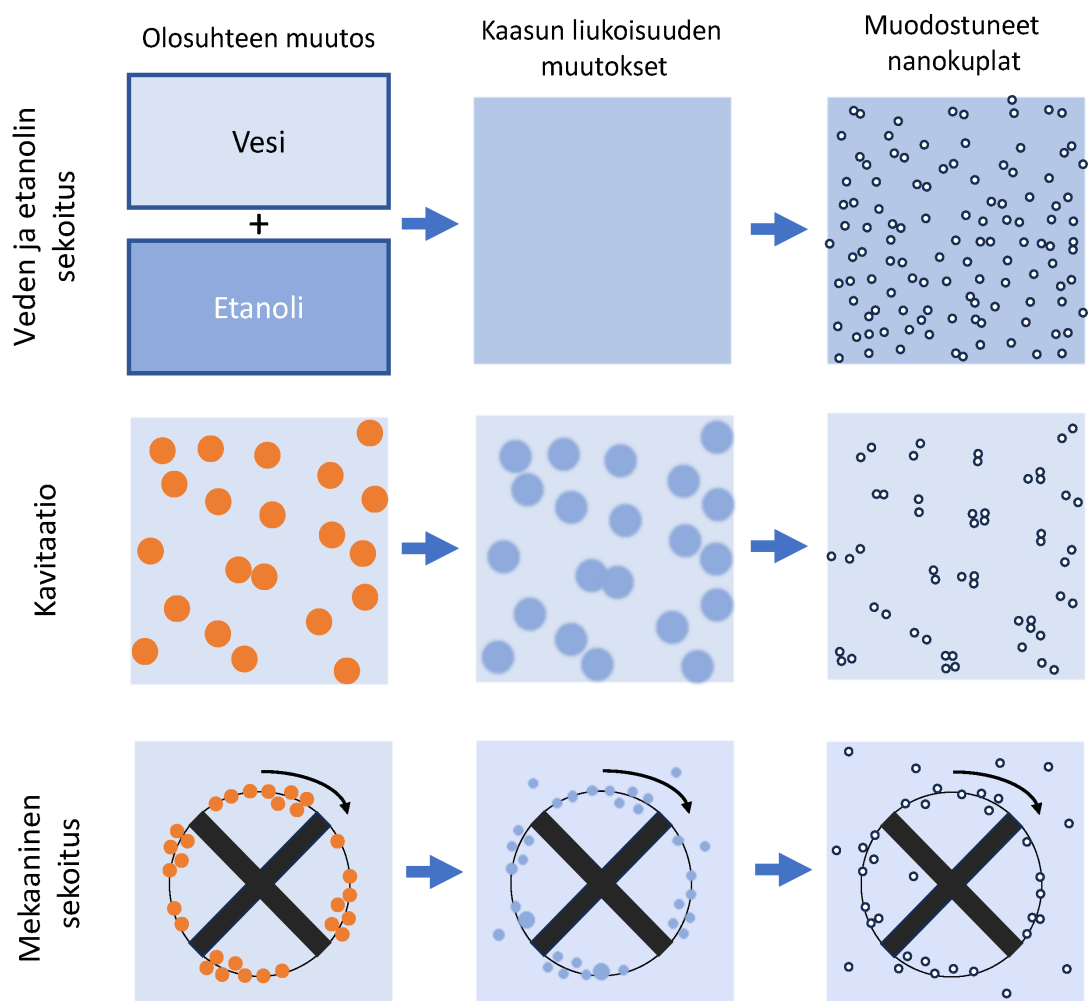


Kuva 1. Eri menetelmillä muodostettujen nanokuplien pitoisuudet [3]. Vesi-etanoliseoksen mooliosuus on 0,02. Kavitaatio- ja mekaaninen sekoitus-kokeet on tehty puhtaalla vedellä. Data on toisinnettu graafisesti [14].

Nanokuplia tuottavien menetelmien moninaisuus viittaa siihen, että nanokuplia syntyy helposti olosuhteiden ollessa oikeat. Nanokuplia on havaittu muodostuvan monien erilaisten menetelmien käytön seurauksena, mutta usein oletetaan, että nanokuplien muodostumiseen johtavia mekanismeja on vain muutamia. Esimerkiksi Agarwal et al. [11] ovat päätelleet, että paineen ja suolapitoisuuden nousu johtaa nanokuplien muodostumiseen. Tiedetään, että nämä muutokset johtavat kaasujen liukoisuuden muutoksiin vedessä ja vesiliuksissa [15,16]. Lämpötilan nopea muutos, esim. kavitaatiokuplan hajotessa voi johtaa kaasun paikalliseen ylikyllästymiseen ja siten nanokuplien muodostumiseen [17]. Veden ollessa ylikylläistä kaasun suhteen, siinä olevien kuplien koko kasvaa, kuten kuvasta 3 voi nähdä. Nanokuplien muodostumisen voidaan olettaa olevan seurausta kaasun liukoisuuden muutoksista, jotka puolestaan johtuvat äkillisistä paineen, lämpötilan tai liuoksen koostumuksen muutoksista.

Kun kaasun, kuten hapen, liukoisuus pienenee äkillisesti, osa kaasumolekyyleistä ei ole enää liuenneessa muodossa. Muodostunut kaasun ylimäärä on kuitenkin nesteen ympäröimä, joten se ei voi suoraan vapautua ilmakehään. Tällöin kaasuylimäärän on pakko muodostaa pieniä kaasukuplia. Kaasukuplien muodostumiseen käytettävissä oleva aika on rajallinen, jolloin ylimäärä kaasua voi kerääntyä yhteen vain rajatulta alueelta. Tällöin muodostuvien kuplien koko jää pieneksi.

Eri menetelmillä muodostuu erilaisia pitoisuuksia nanokuplia, koska niiden vaikutus rajoittuu eri tilavuuksiin nesteessä. Liunneen kaasun pitoisuuden muutos veden ja etanolin sekoituksessa kohdistuu koko nesteen tilavuuteen (Kuva 2, ylin rivi), koska kaasujen liukoisuudet veteen, etanoliin ja niiden seoksiin ovat erilaisia. Sekoitettaessa vettä ja etanolia, muodostuva liuos on ylikylläinen liunneen kaasun (kuten hapen) suhteen [16]. Koska liennut kaasu on levinnyt tasaisesti koko nesteen tilavuuteen, nanokuplat voivat muodostua koko nesteen tilavuudessa. Nanokuplien muodostumisen tapahtuessa nopeasti kaasumolekyyleillä on rajallinen aika siirtyä kuhunkin nanokuplaan. Tämä rajoittaa muodostuvien nanokuplien kokoa ja ne jäävät kooltaan pieniksi.



Kuva 2. Nanokuplien muodostuminen eri menetelmillä. Veden ja etanolin sekoitus (ylin kuvarivi), johtaa kaasun ylikylläisyyteen ja nanokuplien muodostumiseen koko nesteen tilavuudessa. Kavitaatio (keskimmäinen kuvarivi) muuttaa kaasun liukoisuutta paikallisesti kavitaatiokuplien (oranssit pallot kuvassa) romahtaessa. Nanokuplat muodostuvat kavitaation vaikutuksesta syntyneisiin ylikylläisen kaasun alueisiin (siniset pallot). Intensiivinen mekaaninen sekoitus voi aiheuttaa kavitaatiota pyörivän sekoitineliimen läheisyydessä. Sekoitineliin (merkitty kuvaan mustalla) voi muodoltaan olla esimerkiksi potkuri. Kavitaatiosta johtuvat paineen ja lämpötilan muutokset johtavat kaasun liukoisuuden muutoksiin. Kaasun liukoisuuden muutokset johtavat nanokuplien muodostumiseen.

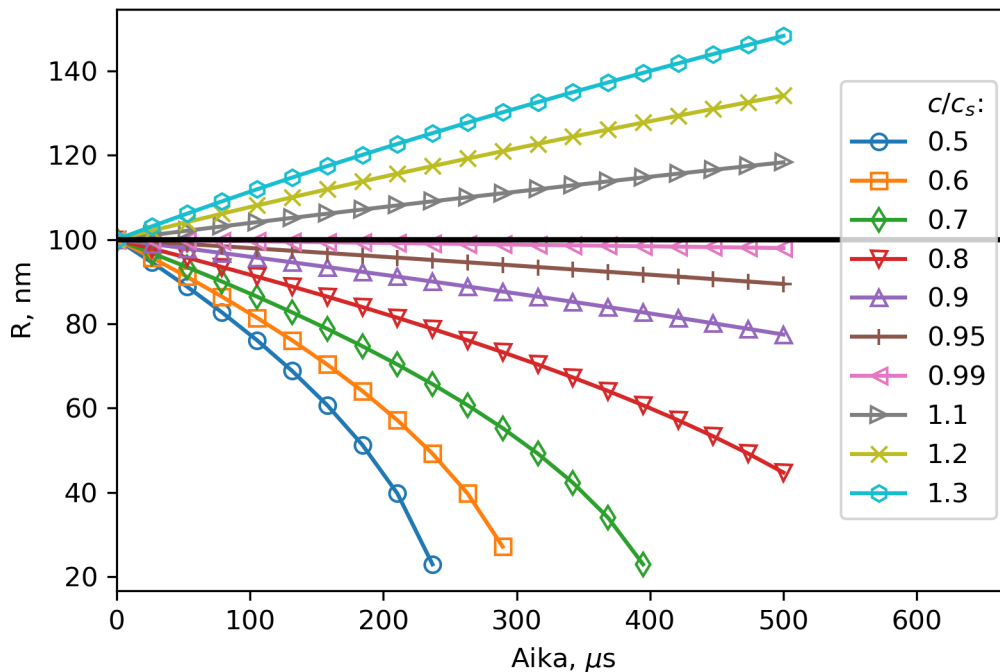
Kavitaatiokuplan romahtaminen [18,19] johtaa nopeisiin paikallisiin paineen ja lämpötilan vaihteluihin, jotka lopulta johtavat nanokuplien muodostumiseen (Kuva 2, keskimmäinen rivi). Koska kavitaatio tapahtuu paikallisesti vain osassa nesteen tilavuutta, kavitaatiossa muodostuu vähemmän nanokuplia kuin etanolin ja veden sekoituksessa (Kuva 1).

Nesteen intensiivinen mekaaninen sekoittaminen voi johtaa kavitaatioon sekoitinelimen läheisyydessä (Kuva 2, alin rivi). Tällöin sekoitinelimen läheisyydessä muodostuu nanokuplia, jotka siirtyvät pois sekoitinelimen luota. Toisaalta intensiivinen sekoitus myös tasoittaa pitoisuuseroja, mikä johtaa suhteellisesti vähäisempään nanokuplien määrään kuin em. menetelmillä. Tiedetään, että suuret sekoitusnopeudet ja pienet tilavuusvirtaukset jatkuvatoimisessa roottori-staattorisekoittimessa (in-line HSM) nostavat lämpötilaa sekoittimessa. On havaittu, että vesiliuoksen lämpötila voi enimmillään nousta useita kymmeniä celsiusasteita n. 10 sekunnissa [20,21]. Tällaisessa sekoittimessa lämpötilan nousu ja siten kaasujen liukoisuuden muutokset voivat olla riittävän nopeita, että nanokuplat muodostuvat vaikka sekoittimessa ei tapahtuisi kavitaatiota.

Eri menetelmien väliset erot havaitaan myös ultraäänihauteen ja -sauvan tuottamien nanokuplia määrässä [2]. Haude synnyttää enemmän kuplia kuin ultraäänisauva, koska hauteessa kavitaatio tapahtuu suuremmissa tilavuudessa, vaikka hauteen ultraääniteho on pienempi. Ultraäänisauvan suurempi teho johtaa kuitenkin pienempien nanokuplien syntymiseen. Nanokuplien muodostuminen ultraäänilaitteissa muistuttaa tässä neste-nestesekoitusta, jossa suuremman sekoitustehon käyttö johtaa pienempien pisaroiden syntyyn [22]. Lisäksi ultraäänien tehonlisäys ja ultraäänenkäsittelyn pidentäminen lisäävät kuplien määrää [2]. Käytetty menetelmä vaikuttaa syntyvien nanokuplien kokoon ja määrään suuresti.

Nanokuplien stabiilius

Jos nanokuplasuspensio sijaitsee avoimessa astiassa, pääsevät kaasun pitoisuuserot ajan mittaan tasoittumaan, kun ylimäärä kaasua haihtuu ilmakehään. Tällöin myös nanokuplat voivat liueta ympäröivään veteen, liuenneiden kaasujen pitoisuuksien pienetessä. Tähän viittaa se, että vakuumia käytettäessä nanokuplien määrä vedessä pienenee huomattavasti [3]. Toisaalta suljetussa astiassa, jossa olosuhteet ovat pysyvät pitempään vakiona, nanokuplat hajoavat hitaammin. Tällöin nanokuplien määrä voi pysyä likimain vakiona useita kuukausia [3].



Kuva 3. Halkaisijaltaan 200 nm kaasukuplan laskettu [23,24] koon muutos eri veden kaasupitoisuuksilla. Kuplan säde, $R = 100$ nm. c/c_s on kuplaa ympäröivän kaasun pitoisuuden suhde Henryn lain pitoisuuteen (c/c_s , saturaatiopitoisuus). $T = 295$ K.

Kuvassa 3 on esitetty 200 nm kaasukuplan laskettu koon muutos eri veden kaasupitoisuuksilla [23,24]. Kuplaa ympäröivän pitoisuuden ollessa pieni, kuplan koko pienenee nopeasti, kun kuplan sisältämä kaasu liukenee ympäröivään veteen. Mitä lähempänä kuplan pitoisuus on kyllästymispistettä (eli Henryn lain pitoisuutta [25,26]), sitä vähemmän kaasua voi siirtyä kuplasta ympäröivään vesiliuokseen. Tällöin kupla liukenee hitaasti tai ei ollenkaan. Kun vesi on kaasun suhteen kylläistä ja olosuhteet pysyvät vakioina, muodostuvien nanokuplien ikä voi olla hyvinkin pitkä, jopa useita kuukausia [3]. Koska kaasun liukoisuus on herkkä lämpötilan tai paineen muutoksille, lopulta kuplat kuitenkin alkavat joko liueta tai kasvaa kokoa [29]. Veden ollessa ylikylläistä kuplien koko kasvaa, mikä voi johtaa lopulta siihen, että kuplan on riittävän suuri nousemaan veden pinnalle, jossa se haihtuu ilmaan.

Kaasun ja nesteen rajapinnalla on rajakerrokset, joiden läpi aine siirtyy diffuusiolla. Kaasumolekyylit siirtyvät kaasukuplan, rajapinnan ja vesikerroksen välillä jatkuvasti. Kaasumolekyylit voivat siirtyä sekä kuplasta veteen, että vedestä kuplaan. Aineensiirron jatkuessa riittävän pitkään kuplasta veteen, nanokuplien sisältämä kaasu liukenee veteen ja mikä lopulta johtaa kuplien häviämiseen (ks. Kuva 3).

Rajakerroksien vesi voi olla kaasun suhteen glykyläisiä. Rajakerroksien glykyläisyys johtaa alentuneeseen pintajännitykseen [4,27]. Nanokuplien stabiilisuuden vedessä on toisaalta ehdotettu johtuvan nanokuplien pinnalla olevista pinta-aktiivisista epäpuhtauksista tai pintavarauksesta, jotka haittaavat kaasun siirtymistä kuplasta ympäröivään nesteeseen [28]. Nanokuplien elinaikaa on myös selitetty edestakaisella aineensiirrolla kuplan rajakerrosta ympäröivän nesteen ja rajakerroksen välillä. Nanokuplat muistuttavat misellejä ja käänteismisellejä sikäli, että molemmat ovat dynaamisia itsejärjestäytyviä järjestelmiä, ja joissa aineensiirto kuplan tai misellin ja niitä ympäröivän alueen välillä on nopeaa.

Nanokuplien pienen koon takia niiden nostevoimasta johtuva nousunopeus on pieni. Nostevoima taas riippuu kuplan ja veden tiheyserosta. Kun nanokuplan koko on pienempi kuin n. 1 μ m, nousunopeus on pienempi kuin Brownin liikkeen nopeus [28]. Nanokuplat eivät tällöin nouse suoraviivaisesti kohti veden pintaa, vaan lämpöliike hallitsee niiden liikesuuntaa. Kahden nanokuplan kohdatessa ne voivat koalesoitua, eli sulautua yhteen, jolloin kuplien koko kasvaa. Kuplakoon kasvaessa niiden nousunopeus kasvaa lopulta suuremmaksi kuin Brownin liikkeen nopeus, jolloin ne alkavat nousta kohti veden pintaa. Nousunopeus kasvaa kuplakoon kasvaessa. Useiden yhteensulautumisten seurauksena kuplan koko voi olla niin suuri, että ne nousevat nopeasti veden pinnalle, häviten lopulta ilmaan. Nanokuplien useita kuukausia pitkä ikä [3] kuitenkin viittaa siihen, että niiden koalesenssi ei ole kovin merkitsevää. Nanokuplien pinta voi olla varattu [29, 1], ja pinnan negatiivisella varauksella ajatellaan olevan nanokuplia stabiloiva vaikutus. Varatun kuplan ympärille muodostuu sähköinen kaksoiskerros ja positiivisesti varatut yhdisteet (kationit) pyrkivät kuplaa kohti ja lopulta voivat kiinnittyä siihen. Nanokuplien pintavarauksen ollessa samanmerkkinen, ne hylkivät toisiaan. mikä myös ehkäisee nanokuplien koalesenssia, ja tekee nanokuplasuspensiosta stabiilimman.

Nanokuplien ominaisuudet

Nanokuplien pienestä koosta johtuen nanokuplien tilavuusosuus liuksesta on pieni, vaikka niiden lukumäärä lioksessa onkin suuri. Pienestä tilavuusosuudesta johtuen nanokuplien vesisuspension ja puhtaan veden aineominaisuudet, kuten tiheys ja viskositeetti eivät käytännössä poikkea toisistaan [30]. Nanokupla-suspension pintajännitys näyttäisi olevan pienempi kuin veden pintajännitys [31]. Tämän lisäksi pintajännitykseen vaikuttavat myös nanokupla-suspensiossa mahdollisesti mukana olevat pinta-aktiiviset aineet, jotka kerääntyvät myös nanokuplien pinnalle. Suhteellisen pieni nanokuplien määrä kerääntyessään ilman ja nanokuplasuspension

rajapinnalle riittää vaikuttamaan pintajännitykseen, koska pintajännitykseen vaikuttaa vain aine rajapinnan välittömässä läheisyydessä. Muiden ainearvojen, kuten tiheyden ja viskositeetin muuttuminen vaatii huomattavasti suuremman määrän nanokuplia, koska ne riippuvat muutoksista koko nesteen tilavuudessa.

Useissa tutkimuksissa [32–34] on raportoitu, että tiheys nanokuplan sisällä on korkea, ja se voi olla jopa 270kg/m^3 . Tämä on huomattavasti suurempi kuin kaasun tiheys normaali-ilmanpaineessa [35] ja viittaisi siihen, että kuplan sisältämä aine on ylikriittistä. Nanokuplan pienen koon takia sen pinnan kaareutuvuus on suurta. Pallomaiselle kuplalle Laplacen paine (ΔP) on $2\sigma/R$, jossa σ on pintajännitys ja R on kuplan säde. Tästä seuraa, että nanokuplan sisäinen paine kasvaa sen koon pientyessä. Nanomittakavan kuplan sisäinen paine voi olla niin suuri, että sen sisältämä kaasu on huoneenlämpötilassa ylikriittistä. Esimerkiksi hapen kriittinen paine (P_c) on 50.4 bar [35]. Tässä paineessa hapen tiheys on 67kg/m^3 ($T=25^\circ\text{C}$). Tämä n. neljä kertaa pienempi kuin havaitut nanokuplien sisäiset tiheydet. Tämä vihjaa, että nanokuplien tiheyteen voi olla myös muita vaikuttavia tekijöitä kuin kaasun ylikriittisyys. Kun nanokuplan koko on 50 nm ja pintajännitys (σ) on 72 mN/m, sen Laplace paine on 58 bar. Tällöin kuplan sisältämä kaasu on ylikriittistä ja nanokupla alkaa ominaisuuksiltaan muistuttaa osittain nestepisaraa. Nanokuplan suuri tiheys johtaa pienempään tiheyseroon ja siten pienempään nousunopeuteen verrattuna samankokoiseen kuplaan, joka sisältää kaasua. Tämä myös osittain selittää nanokuplien pitkäikäisyyttä.

Yhteenveto

Nanokuplat ovat pieniä, nanokokoluokan kaasukuplia vedessä. Nanokuplia muodostuu käsiteltäessä vettä erilaisilla menetelmillä. Nanokuplia on havaittu muodostuvan sekoitettaessa etanolia ja vettä, intensiivisessä mekaanisessa sekoituksessa sekä akustisen että hydrodynaamisen kavitaation seurauksena. Nanokuplien muodostuminen johtuu em. tapauksissa joko lioksen koostumuksen, paineen tai lämpötilan nopeista muutoksista. Nämä muutokset johtavat liuenneen kaasun paikallisiin liukoisuuden muutoksiin. Liuos on paikallisesti ylikylläinen, ja tämän takia osa kaasusta ei ole enää liukoisessa muodossa. Koska liukoisuuden muutokset ovat nopeita, ylimäärä ei ehdi poistua liuksesta muuten kuin muodostamalla pieniä kuplia.

Nanokuplien pienen koon takia niillä on joko pieni nousunopeus tai niiden liikettä hallinnoi Brownin liike. Tällöin ne pysyvät liuksessa pitkiäkin aikoja. Kun veden kaasupitoisuus on pienempi kuin kyllästymispiste (eli alle Henryn lain pitoisuuden),

pienet kaasukuplat liukenevat nopeasti. Kun vesi on kaasun suhteen kylläinen, nanokuplien koko ei juuri muutu. Ylikylläisessä liuoksessa kuplien koko kasvaa. Kun vesi liuenneen kaasun suhteen kylläinen ja olosuhteet pysyvät vakiona, esim. vesiputkessa, nanokuplien liukenemisestä johtuva koon pieneneminen on olematonta. Tällöin nanokuplat voivat olla stabiileja pitkiäkin aikoja. Osa nanokuplista voi tarttua astioiden pintoihin, mutta muuten kuplien pitoisuus pysyy vakiona.

Nanokuplien stabiiliutta voidaan hyödyntää eri sovelluksissa, kuten kaasuvälikampana kasteluvesissä. Tällöin kasveille voidaan siirtää vesi mukana tasaisemmin niiden tarvitsemää happea. Voi olla myös mahdollista käyttää nanokuplia vesijohtojen biofilmin hallintaan. Edellä mainittuja nanokuplien sovelluksia tutkitaan useissa Tutkimuskeskus Wanderin käynnissä olevissa hankkeissa. Nanokuplien innovatiivisten sovellusten tutkimusta voidaan myös jatkaa mahdollisissa tulevaisuuden hankkeissa. Tällä hetkellä nanokuplia ja niiden ominaisuuksia tutkitaan maailmalla paljon ja tämä voi johtaa myös kokonaan uusiin sovelluksiin.

Lähteet

- [1] Sun, L., Zhang, F., Guo, X., Qiao, Z., Zhu, Y., Jin, N., Cui, Y., Yang, W., Research progress on bulk nanobubbles, *Particuology*, 60, 99–106, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.partic.2021.03.003>.
- [2] Bu, X., Alheshibri, M., The effect of ultrasound on bulk and surface nanobubbles: A review of the current status, *Ultrasonics Sonochemistry*, 76, 105629, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105629>.
- [3] Jadhav, A. J., Barigou, M., Bulk nanobubbles or not nanobubbles: That is the question, *Langmuir*, 36(7), 1699–1708, 2020, <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b03532>.
- [4] Lee, J. I., Yim, B.-S., & Kim, J.-M., Effect of dissolved-gas concentration on bulk nanobubbles generation using ultrasonication, *Scientific Reports*, 10(1), 18816, 2020, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75818-8>.
- [5] Nirmalkar, N., Pacey, A. W., Barigou, M., Bulk nanobubbles from acoustically cavitated aqueous organic solvent mixtures, *Langmuir*, 35(6), 2188–2195, 2019, <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.8b03113>.
- [6] Yasuda, K., Matsushima, H., Asakura, Y., Generation and reduction of bulk nanobubbles by ultrasonic irradiation, *Chemical Engineering Science*, 195, 455–461, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.09.044>.
- [7] Ayela, F., Cherief, W., Colombet, D., Ledoux, G., Martini, M., Mossaz, S., Podbevsek, D., Qiu, X., Tillement, O., Hydrodynamic cavitation through “labs on a chip”: From fundamentals to applications, *Oil & Gas Science and Technology – Revue d’IFP Energies Nouvelles*, 72(4), 19, 2017, <https://doi.org/10.2516/ogst/2017010>.
- [8] Azevedo, A., Etchepare, R., Calgaroto, S., Rubio, J., Aqueous dispersions of nanobubbles: Generation, properties and features, *Minerals Engineering*, 94, 29–37, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.05.001>.
- [9] Fan, M., Tao, D., Honaker, R., Luo, Z., Nanobubble generation and its application in froth flotation (part I): Nanobubble generation and its effects on properties of microbubble and millimeter scale bubble solutions, *Mining Science and Technology (China)*, 20(1), 1–19,

- 2010, [https://doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60154-X](https://doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60154-X).
- [10] Ohmori, M., Haruta, K., Kamimura, S., Koike, H., Uchida, T., Takeyama, H., A simple method for nanobubble generation and stability of the bubbles, *Journal of Environmental Biotechnology*, 15(1), 41–44, 2015.
- [11] Agarwal, K., Trivedi, M., Nirmalkar, N., Does salting-out effect nucleate nanobubbles: Spontaneous nucleation?, *Ultrasonics Sonochemistry*, 82, 105860, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105860>.
- [12] Rosselló, J. M., Ohl, C.-D., On-demand bulk nanobubble generation through pulsed laser illumination. *Physical Review Letters*, 127(4), 044502, 2021, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.127.044502>.
- [13] Ferraro, G., Jadhav, A. J., Barigou, M., A Henry's law method for generating bulk nanobubbles. *Nanoscale*, 12(29), 15869–15879, 2020, <https://doi.org/10.1039/D0NR03332D>.
- [14] Mitchell, M., Muftakhidinov, B., Winchen, T., et al (n.d.). Engauge digitizer software [Tietokoneohjelma]. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3941227>.
- [15] Battino, R. (toim.), *Nitrogen and air* (1st ed). Pergamon Press, UK, 1982.
- [16] Battino, R. (toim.), *Oxygen and ozone* (1st ed). Pergamon Press, UK, 1981.
- [17] Gor, G. Y., Kuchma, A. E., Kuni, F. M., Gas bubble growth dynamics in a supersaturated solution: Henry's and sievert's solubility laws (arXiv:1205.5471). arXiv, 2012, <http://arxiv.org/abs/1205.5471>.
- [18] Brennen, C. E., *Cavitation and bubble dynamics*, Oxford University Press. U.K., 1995
- [19] Lauterborn, W., Ohl, C.-D., Cavitation bubble dynamics, *Ultrasonics Sonochemistry*, 4(2), 65–75, 1997, [https://doi.org/10.1016/S1350-4177\(97\)00009-6](https://doi.org/10.1016/S1350-4177(97)00009-6).
- [20] Tamminen, J., Sainio, T., Paatero, E., Intensification of metal extraction with high-shear mixing, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 73, 119–128, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2013.08.005>.
- [21] Tamminen, J., Koiranen, T., Mixing performance comparison of milliscale continuous high-shear mixers, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 93(12), 2245–2252, 2015, <https://doi.org/10.1002/cjce.22327>.
- [22] Davies, J. T., A physical interpretation of drop sizes in homogenizers and agitated tanks, including the dispersion of viscous oils, *Chemical Engineering Science*, 42(7), 1671–1676, 1987, [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(87\)80172-0](https://doi.org/10.1016/0009-2509(87)80172-0).
- [23] Epstein, P. S., Plesset, M. S., On the stability of gas bubbles in liquid-gas solutions, *The Journal of Chemical Physics*, 18(11), 1505–1509, 1950, <https://doi.org/10.1063/1.1747520>
- [24] Kyzas, G. Z., Mitropoulos, A. C., From bubbles to nanobubbles *Nanomaterials*, 11(10), 2592, 2021, <https://doi.org/10.3390/nano11102592>.
- [25] Henry, W., Experiments on the quantity of gases absorbed by water, at different temperatures, and under different pressures, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 93, 29–274, 1803. <https://doi.org/10.1098/rstl.1803.0004>.
- [26] Sander, R., Compilation of Henry's law constants (version 4.0) for water as solvent, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(8), 4399–4981, 2015, <https://doi.org/10.5194/acp-15-4399-2015>.
- [27] Attard, P., Direct measurement of the surface tension of nanobubbles (arXiv:1505.02217), arXiv, 2015, <http://arxiv.org/abs/1505.02217>.
- [28] Chaplin, M. (2022). Water structure and science. <https://water.lsbu.ac.uk/water/nanobubble.html>.
- [29] Tan, B. H., An, H., Ohl, C.-D., (2021). Stability of surface and bulk nanobubbles. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 53, 101428, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2021.101428>.
- [30] Senthilkumar, G., Rameshkumar, C., Nikhil, M. N. V. S., & Kumar, J. N. R. (2018). An investigation of nanobubbles in aqueous solutions for various applications. *Applied Nanoscience*, 8(6), 1557–1567. <https://doi.org/10.1007/s13204-018-0831-8>.
- [31] Yasui, K., Tuziuti, T., Izu, N., Kanematsu, W., Is surface tension reduced by nanobubbles

- (ultrafine bubbles) generated by cavitation?, *Ultrasonics Sonochemistry*, 52, 13–18, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.11.020>.
- [32] Fang, H., Ultrahigh density inside a nanobubble. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 63(8), 287031, s11433-020-1577-2, 2020, <https://doi.org/10.1007/s11433-020-1577-2>.
- [33] Teshima, H., Kusudo, H., Bistafa, C., Yamaguchi, Y., Quantifying interfacial tensions of surface nanobubbles: How far can young's equation explain?, *Nanoscale*, 14(6), 2446–2455, 2022, <https://doi.org/10.1039/D1NR07428H>.
- [34] Zhang, L., Chen, H., Li, Z., Fang, H., Hu, J., Long lifetime of nanobubbles due to high inner density, *Science in China Series G: Physics, Mechanics and Astronomy*, 51(2), 219–224, 2008 <https://doi.org/10.1007/s11433-008-0026-5>.
- [35] Lemmon, E. W., Bell, I. H., Huber, M. L., Linden, M. O., Thermophysical properties of fluid systems. In P. J. Lindstrom & W. G. Mallard (Eds.), *NIST chemistry WebBook*, NIST standard reference database number 69, 2023, <https://doi.org/10.18434/T4D303>.

Legiolert apuna legionellan havaitsemisessa

Elle-Maria Peltomäki, insinööri, tutkija, elle-maria.2.peltomaki@samk.fi

Legionella pneumophila -bakteerin pitoisuutta vesinäytteessä voidaan tutkia myös nopeammalla menetelmällä, kuin tavallisesti käytetyt standardimenetelmät, jotka vievät enemmän aikaa valmistukseen. Legiolert on IDEXXin valmistama tutkimustuote legionellabakteerin havaitsemiseen. Menetelmä on Afnorin validoima ja se on **tutkitusti yhtä luotettava**, kuin useimmin käytetyt standarditutkimusmenetelmät [1]. Legiolert -testauksella voidaan kuitenkin selvittää vain *L. pneumophila* -bakteerin määrä, ei muita legionellalajeja. Täten se soveltuu erityisesti **kartoitustyypiseen** tutkimukseen, ja tämän kautta tehtyjen löydösten avulla voidaan suorittaa jatkotutkimuksia muilla virallisilla menetelmillä, jotka tunnistavat muitakin legionellalajeja. Satakunnan ammattikorkeakoulun Tutkimuskeskus WANDERissa tätä menetelmää on käytetty onnistuneesti kartoitustyöhön erilaisissa kohteissa, kuten esimerkiksi uimahalleissa ja vanhusten palveluasumisyksiköissä.

Satakunnan ammattikorkeakoulussa tehdyssä tutkimuksessa suoritettiin verifointi Legiolert-menetelmälle. Tarkoituksena oli verifioida menetelmä Satakunnan ammattikorkeakoulun laboratoriokäyttöön, ja samalla käydä läpi tarkemmin tämän menetelmän toimintaperiaatetta. [2]

Legiolert ja sen toimintaperiaate

Legiolert on muihin virallisiin tutkimusmenetelmiin verrattuna varsin nopea tapa selvittää *L. pneumophila* -bakteerin pitoisuus vesinäytteessä [3]. Myös näytteenkäsittely on helppoa eikä vie kovinkaan paljon aikaa. Näytevesi siirretään 100 ml:n näyteastiaan, johon lisätään muun muassa jauhemainen kasvualusta, jonka avulla bakteeri kasvaa. Käsitelty näytevesi siirretään IDEXXin Legiolert -liuskaan, jossa vesi asettuu erikokoisiin kuoppiin. Liuska ajetaan lopuksi IDEXXin Quanti-Tray Sealer PLUS -sulkijalaitteen läpi, joka lämmön avulla sulkee liuskan niin, että vesi pysyy tiiviisti sen sisällä. Käsiteltyä liuskaa pidetään 7 vuorokautta 39° C (± 0,5° C) lämpötilassa, jonka jälkeen voidaan lukea lopulliset tulokset.

L. pneumophila -bakteerin tunnistaa liuskasta värjäytymisen perusteella. Erikokoisia kuoppia on liuskassa yhteensä 96, ja niissä olevan veden sameutumisen ja/tai tummaksi värjäytymisen perusteella voidaan laskea todennäköinen bakteeripitoisuus. Tässä yhteydessä laskentatapana käytetään niin sanottua MPN-menetelmää, joka tulee sanoista most probable number eli todennäköisin lukumäärä [4]. Se tarkoittaa bakteerien todennäköisintä määrää, joka voidaan laskea ja havaita näytteessä. Kyseessä on siis todennäköisyyteen perustuva menetelmä, joka laskee myös prosentuaalisia raja-arvoja sille, mikä lukema voisi olla. Laskenta suoritetaan siten, että lasketaan sameutuneiden ja/tai tummaksi värjäytyneiden kuoppien määrä. Näiden määrän perusteella katsotaan taulukosta positiivisten kuoppien summaa vastaava MPN-määrä. Mitä enemmän positiivisia kuoppia, sitä suurempi pitoisuus näytteessä on *L. pneumophila* -bakteeria. Kuvassa 1 nähdään esimerkkejä siitä, miltä Legiolert-liuskojen tulokset voivat näyttää.



Kuva 1. Vasemmalla kaksi negatiivista Legiolert -liuskaa. Oikealla liuska, jossa on useita positiivisia kuoppia.

Verifointiprosessi

Verifoinnin apuna ja lähtökohtana NMKL:n verifointiraportti on tärkeä, jotta prosessin sisältö, suunnittelu ja toteutus toimii vaaditulla tavalla. Raportin sisältämä kaavio ja ohjeistus toimii hyvänä pohjana ja ohjenuorana verifoinnille. [5]

Tavoitteena verifointiprosessissa on selvittää ja todentaa se, millainen veden laatu on ja paljonko legionellabakteeria näytteissä voisi olla. Tutkimuskeskus WANDERissa tehdyssä tutkimuksessa käytettiin aiemmin tehtyjä legionellabakteeritutkimusten

tuloksia, joissa oli käsitelty 20 eri porilaiskoulun vesinäytteet. Näiden lisäksi tehtiin laboratoriossa tutkimusta varsinaisen legionellabakteerikannan kanssa, ja tutkittiin eri bakteeripitoisuuksien vaikutuksia ja toimintaa.

Koulunäytteissä tulokset olivat pääosin negatiivisia, mutta joukkoon mahtui myös muutama positiivinen tulos. Yhdessä näytteessä 23 MPN/l ja toisessa 2674 MPN/l. Näistä jälkimmäinen lukema ylittää nykyisen talousvesiasetuksen toimenpiderajan, jonka mukaan legionellabakteerin pitoisuuden tulee olla alle 1000 MPN/l [6].

Laboratoriotestauksessa työ suoritettiin laimennossarjojen avulla. Työssä käytettiin IDEXXin Legiolert -liuskoja ja maljakasvatuksessa BCYE-maljoja, jotka sopivat hyvin legionellabakteerin kasvatukseen. Tavoitteena oli molemmilla tavoilla saada bakteeripitoisuuksista neljä erilaista tulossaakalaa: alle 5 MPN, 10–20 MPN, 50–100 MPN ja yli 100 MPN. Tällä skaalauksella haluttiin todentaa se, että Legiolert-menetelmä tunnistaa erilaisia bakteeripitoisuuksia.

Laboratoriotestauksessa legionellabakteeria kasvatettiin BCYE-maljoilla. Tästä bakteerimassaa siirrettiin BHI-liemeen, josta valmistettiin laimennossarja välillä -1 ja -8. Mitä pienempi numero, sitä laimeampi liuos. Laimennoksista tutkittiin tarkemmin neljää laimeinta, eli -5, -6, -7 ja -8, joista tehtiin myös Legiolertit ja erilliset BCYE-maljakasvatukset.

Liuskoilta saadut tulokset osuivat kohtalaisen hyvin annettuihin tulostavoitteisiin, vaikkakin pientä heittoa esiintyi. Maljatulokset osuivat paremmin asetettuihin tavoitteisiin.

Tulokset **liuskoista** olivat **seuraavanlaisia**:

- liuska -8: tavoite alle 5, tulos 2 pientä näytekuoppaa (2 MPN/ 100 ml)
- liuska -7: tavoite 10–20, tulos 8 pientä näytekuoppaa (8,1 MPN/ 100 ml)
- liuska -6: tavoite 50–100, tulos 34 pientä näytekuoppaa (35,2 MPN/ 100 ml)
- liuska -5: tavoite yli 100, tulos 77 pientä ja 5 isoa näytekuoppaa (333,9 MPN/ 100 ml)

Tulokset **maljoista** olivat **seuraavanlaisia**:

- malja -8: a-malja **2** pesäkettä ja b-malja **3** pesäkettä
- malja -7: a-malja **11** pesäkettä ja b-malja **12** pesäkettä
- malja -6: a-malja **61** pesäkettä ja b-malja **64** pesäkettä
- malja -5: a-malja **+200** pesäkettä ja b-malja **+200** pesäkettä

Tuloksia läpikäydessä ja analysoidessa oli selvää, että täysin yksi yhteen ne eivät mene. Loogisuutta kuitenkin löytyi erityisesti liuska-maljapareilla -7 ja -8, kun tuloksia käsiteltiin Khiin neliötestin avulla. Laboratorioympäristössä tutkittavana *L. pneumophila* ei ole helpoin bakteeri, sillä oikeanlaisten bakteeripitoisuuksien löytäminen voi olla haasteellista.

Johtopäätökset

Kaikkiaan työn kautta pystyttiin toteamaan, että **Legiolert on luotettava väline erityisesti kartoituskäyttöön**. Koska menetelmä tunnistaa vain *L. pneumophilan*, se ei sellaisenaan pysty kertomaan muiden legionellalajien määrää vedessä. Legiolertia on jo tutkimustyön kirjoitusaikana sekä sen jälkeen käytetty kartoitusmielessä erilaisissa tutkimuskohteissa, ja se on ollut tehokas keino selvittää legionellabakteerin olemassaolo ja alustavia määriä.

Tutkimustuloksia on saatu esimerkiksi Porissa vuoden 2023 aikana esiintyneistä legionellatapauksista. Porilaisesta palvelutalo Jokihelmestä löytyi alustavissa tutkimuksissa legionellabakteeria rakennuksen vesijohtovedestä. Samat tulokset saatiin myöhemmin myös viranomaisnäytteistä. [7] Samoin Ulvilasta uimahallista löytyi tammikuussa 2024 Legiolert-tutkimusten kautta legionellaa, joka myös todennettiin viranomaisnäytteiden kautta useaan kertaan [8].

Verifointiprosessi on osoittautunut toimivaksi ja sen kautta on saatu käyttöön arvokasta tutkimustulosta tuottava menetelmä. Menetelmän avulla **WANDER pystyy tarjoamaan laadukkaan ja luotettavan kartoitustutkimusmenetelmän**, jolla saadaan nopeasti selville mahdollinen *L. pneumophila* -bakteerin pitoisuus vedessä.

Lähteet

- [1] Afnor, Certificate No.: IDX 33/06-06/19, 2019, s. 10.
- [2] Peltomäki, E-M. Legiolert ja Colilert: ohjeet ja verifiointi Satakunnan ammattikorkeakoululle, 2023. Haettu 22.12.2023 osoitteesta <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2023060923238>.
- [3] IDEXX Legiolert, For detection of Legionella pneumophila, 2024. Haettu 13.3.2024 osoitteesta <https://www.idexx.com/en/water/water-products-services/legiolert/>.
- [4] ISO 9308-2. Veden laatu. Escherichia colin ja koliformisten bakteerien pesäkemäärän määrittäminen. Osa 2: Todennäköisimmän lukumäärän arviointi, 2014. Haettu 22.12.2023 osoitteesta <https://www.iso.org/standard/52246.html>.
- [5] NMKL Procedure No. 32, Verification of microbiological methods, 2017, s. 11.
- [6] Finlex, Sosiaali- ja terveysministeriön asetus talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista annetun sosiaali- ja terveysministeriön asetuksen muuttamisesta, 2023. Haettu 13.3.2024 osoitteesta <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2023/20230002>.
- [7] Laakso, A. Palvelutalon vesijohtovedestä löytyi hengenvaarallista legioonalaistautia aiheuttavaa bakteeria Porissa, Yle, 2023. Haettu 15.2.2024 osoitteesta <https://yle.fi/a/74-20021852>.
- [8] Hakala, A. Legionellapiina pitkittyy Ulvilan uimahallissa – Kaskelotissa ei voi uida ainakaan yli viikkoon, Yle, 2024. Haettu 14.3.2024 osoitteesta <https://yle.fi/a/74-20078650>.

Aistinarvio elintarviketuotannossa

Meija Kivisaari, FM, tutkija, meija.kivisaari@samk.fi

Elintarvikkeiden laatua voidaan tutkia aistinvaraisesti. Aistinvarainen tutkimus voidaan tehdä joko laboratoriossa tai kysymällä kuluttajien mieltymyksiä. Aistittavia asioita ovat yleensä ulkonäkö, haju, maku ja rakenne.

Tutkimuskeskus WANDERin tutkimuksessa aistinarviolla arvioidaan nanokuplavedellä kasteltujen mansikoiden, tomaattien ja lehtivihannesten laatua verrattuna normaalikastelulla tuotettuihin tuotteisiin. Aistinarvioon käytetään analyttistä laboratoriomittausta, jossa koulutettu raati arvioi laadullisesti eroja eri tavoin kasvatettujen marjojen ja vihannesten välillä. Raati koostuu Satakunnan ammattikorkeakoulun henkilökunnasta, joka on koulutettu maistamaan perusmakuja: makeaa, suolaista, karvasta, hapanta ja umamia.

Aistinarvio perustuu kansainvälisiin standardeihin [1] [2] ja sen luotettavuutta voidaan arvioida tilastollisesti. Arvioijalta edellytetään hyviä aisteja, hyvä keskittymiskykyä sekä kykyä erottaa ja kuvailla ominaisuuksia. Aistinarvioijan tulee olla kiinnostunut aistinarviosta ja avoin uusien makuja kohtaan. Aistinarvio tehdään rauhallisessa paikassa, jossa häiriöt on minimoitu.

Artikkelin tavoitteena on esitellä aistinarviota menetelmänä ja sen toteutusta osana tutkimusta.

Nanokuplat maatalouden alkutuotannossa

Tutkimuskeskus WANDER yhdessä muiden toimijoiden kanssa toteuttaa 1.1.2022 – 31.12.2024 hankkeen ”Maatalouden alkutuotannon tehostaminen ja turvaaminen nanokokoluokan kaasukuplien tuottamiseen perustuvan teknologian avulla – NABLE”. Hanke on Hämeen ELY-keskuksen rahoittama EIP-hanke.

Tavoitteina on kehittää teknologiaa, millä tuotetaan nanokokoluokan kaasukuplia kasteluveteen ja tutkia käytännön kokeilla teknologian toimivuutta ja

soveltuvuutta kolmessa EIP-innovaatioryhmässä mukana olevassa alkutuotannon yrityksessä. Tutkimuksessa selvitetään teknologian vaikutusta kasteluveden ja kasteluvesijärjestelmän mikrobiologiaan ja biofilmeihin. Tavoitteena on myös tukea elintarviketuotannon toimijoita vihreässä siirtymässä. Kemikaalikuormaa pyritään pienentämään ja hiilijalanjälkeä minimoimaan kemikaalittomalla teknologialla. Tutkimus tavoittelee hygienian ja säilyvyyden parantamista elintarviketuotannossa.

Kasvien alkutuotannon tehostaminen ympäristöystävällisin keinoin haastaa nykyisen, runsaaseen lannoitteiden käyttöön perustuvan tehotuotannon. Laboratorio- ja kenttäkokeiden mukaan sadon tuottoa voidaan parantaa ilman ylimääräistä lannoitteiden käyttöä nanokuplia sisältävällä kasteluvedellä. Tässä kasvatusmenetelmässä läpimitataan alle 200 nm kokoisia nanokuplia sisältävän kasteluveden käyttö voi edistää kasvien kasvua, lisätä kasvien ravinteita hyödyntävien geenien ilmentymistä juuristossa, lisätä kasvuhormonien tuotantoa biosynteesin kautta ja auttaa kasvien juuria absorboimaan ravinteita paremmin.

Ravinteiden imeytymistä parantamalla voidaan vähentää lannoitteiden kokonaismäärää eikä maaperään jää imeytymättömiä ravinteita yhtä paljon kuin perinteisillä kasvatuskeinoilla. Nanokuplien stabiilisuus takaa pitkäaikaisen vaikutuksen maaperän kemiaan. Tällä tutkimuksella on tarkoitus tarjota elintarviketuotannon yrittäjille kenttätutkimukseen perustuvaa kokeellista tietoa nanokuplaveden hyödyistä. [3]

Aistinarvio menetelmänä

Aistinarvio on tieteellinen tutkimusmenetelmä, joka perustuu muun muassa kansainvälisiin ISO-standardeihin [1] [2]. Aistinarvio on tullut 1900-luvulla osaksi elintarvikkeiden laadunvarmistusta ja hinnoitteluperusteita. Aistittavia asioita ovat yleensä ulkonäkö, haju, maku ja rakenne. Tieteenalana aistinarvio on alkanut kehittyä toisen maailmansodan aikana, jolloin sitä käytettiin armeijan ruoan laadun kehittämistyössä.

Aistinvaraiset tutkimusmenetelmät kuuluvat nykyään elintarvikealan yliopisto-opintoihin. Tutkimus jakautuu toisaalta perinteiseen laboratoriossa toteutettuun aistinvaraiseen tutkimukseen ja toisaalta elintarvikkeiden hyväksyttävyydestutkimuksiin sekä kuluttajien mieltymyksen arvioimiseen. Laboratorioanalyysissä käytetään koulutettua raatia tuottamaan tietoa aistittavasta elintarvikkeesta. Hyväksyttävyydestutkimuksissa aistimassa ovat

tavalliset kuluttajat. Aistinvarainen tutkimus on monitieteinen tutkimusala, joka yhdistää käyttäytymistieteitä, ravitsemustieteitä, fysiologiaa, kuluttajatieteitä ja elintarviketieteitä. [4]

Analyttisiin laboratoriomittauksiin on käytettävissä monia menetelmiä, joista useat kohdistuvat näytteiden välisen eron mittaamiseen. Tällaisia testejä ovat esimerkiksi kolmitesti, pari-kolmitesti ja parivertailutesti. Näiden testien avulla selvitetään, voidaanko näytteiden välillä havaita eroa nimetyn ominaisuuden suhteen. Mikäli halutaan määrittää eron suuruutta, tulee käyttää kirjallisuudessa kuvattuja asteikkoja ja kuvailevia menetelmiä. Menetelmä valitaan tapauskohtaisesti ja sen mukaan mitä aistinarviolla halutaan mitata. Tuloksia voidaan tulkita tilastollisesti niin erotusteissä kuin eron suuruuden analyyseissäkin. [4]

Aistinarvion tavoite

Tutkimuksessa kasvatetaan mansikoita, tomaatteja ja lehtivihanneksia rinnakkain perinteisillä tavoilla ja happinanokuplakastelulla. Sadosta tutkitaan monia muuttujia kasvun tehostumisen arvioimiseksi. Kasvun tehostuminen voi tuoda mukanaan myös ei-toivottuja ilmiöitä kuten nopeamman kasvun vaikutuksia tuotteiden aistittaviin ominaisuuksiin. Pelkkä tuotteen suurempi koko voi aiheuttaa kuluttajassa positiivisia mielleyhtymiä, mutta suurempi koko tai nopeampi kasvuvauhti voivat vaikuttaa tuotteen makuun. Kuvassa 1 nähdään mansikoiden kasvatusasetelma.

Aistinarviokokeiden tarkoituksena on selvittää, onko kastelutavalla vaikutusta tuotteen makuun tai muihin aistittaviin ominaisuuksiin. Mikäli vaikutusta havaitaan, voidaan arvioida mihin suuntaan maussa tai muissa aistittavissa ominaisuuksissa nanokuplakastelulla on vaikutusta. Odotusarvo tutkimuksessa on, että kastelutapa ei vaikuta aistittaviin ominaisuuksiin ja verrattavat tuotteet ovat yhtä maukkaita. Mansikoiden kohdalla voidaan arvioida esimerkiksi marjojen makeutta ja salaatin kohdalla arvioitava tekijä voi olla salaatin karvaus.



Kuva 1. Mansikoiden kasvatus noin viikkoa ennen aistinarviota.

Aistinarvioraadin testaus

Aistinarvioraadin hankkiminen ja kouluttaminen aloitettiin toukokuussa 2023. Satakunnan ammattikorkeakoulun henkilöstön vapaaehtoiset testattiin perusmakujen aistimisen suhteen aistinarvioliuoksilla. Liuokset valmisti KVVY Tutkimus Oy ja ne tehtiin vastaamaan elintarvikkeiden aistinarviossa tarvittavaa tasoa. Testauksessa testattiin makean aistiminen sokerivedellä (pitoisuus 8,0 g/l sakkaroosia), happaman aistiminen sitruunahappoliuoksella (pitoisuus 0,7 g/l sitruunahappoa), suolaisen aistiminen pöytäsuolaliuoksella (pitoisuus 1,0 g/l NaCl), karvaan aistiminen kofeiiniliuoksella (pitoisuus 0,7 g/l kofeiinia) ja umamin maistaminen natriumglutamaattiliuoksella (pitoisuus 4,0 g/l natriumglutamaattia). Liuokset oli tehty käänteisosmoosiveteen ja käänteisosmoosivesi oli myös testisarjassa mukana.

Aistien testaus tehtiin kahtena peräkkäisenä päivänä. Testiliuosten avulla ei voinut harjoitella tunnistamista etukäteen, mutta mikäli epäonnistui testissä, sen saattoi

uusia. Jokaiselle testattavalle annettiin seitsemän koodattua liuosta maistettavaksi. Näissä liuksissa oli edustettuna kaikki perusmaut. Yksi perusmaku oli sarjassa vielä toisenkin kerran ja lisäksi maistettavana oli käänteisosmoosivesi. Suun huuhteluun oli tarjolla huoneenlämpöistä hanavettä. Aistinarvioijat olivat rauhallisessa hiljaisessa tilassa keskittymisen mahdollistamiseksi.

Aistien testaukseen osallistui yhteensä 25 vapaaehtoista. Hyväksytyssä suorituksessa piti kaikki seitsemän liuosta tunnistaa oikein. Testin sai halutessaan uusia. Aistinarviotestin suoritti hyväksytysti 12 henkilöä eli läpäisyprosentti oli 48 %. Aistien testaus herätti paljon positiivista kiinnostusta ja keskustelua. Osallistujien keskuudessa maistamisen vaikeus tuli monelle yllätyksenä ja testauksen läpäisseet kertoivat onnistumisestaan hyvin tyytyväisinä. Testauskutsu ei ollut tavoittanut kaikkia ja monet kiinnostuivat siitä vasta kuullessaan testattujen kokemuksia. Seuraavalle mahdolliselle testaukselle on jo ollut kysyntää.

Mansikoiden aistinarvio

Mansikoiden aistinarvio alkoi mansikoiden aistinarviolla kesäkuussa 2023 juuri ennen juhannusta. Aistinarvioon kutsuttiin kaikki 12 testin läpäissyttä arvioijaa ja paikalle pääsi 10 arvioijaa. Kuvassa 2 mansikoiden aistinarvio on käynnissä.



Kuva 2. Mansikoiden aistinarvio.

Arvioitavina oli viisi näytesarjaa, joissa kaikissa oli kaksi näytettä. Arvioinnissa tuli arvioida maistamalla ja haistamalla, ovatko sarjan näytteet keskenään samanlaisia vai erilaisia. Mikäli arvioija vastasi ”erilaisia”, hän saattoi kirjoittaa minkä tekijän suhteen näytteet poikkesivat toisistaan tai muuten kuvailla eroa. Käytetty testi oli parivertailutesti [1] ja toteutusohjeiden mukaan näytesarjoissa puolessa pareista on eri näytteet ja puolessa sama näyte kahdesti. Näytteet satunnaistetaan arviointia varten parien sisäisesti ja sarjojen välisesti. Näytepareja suositellaan olevan korkeintaan 4–5 testissä kerrallaan. [4]

Aistinarviossa saatiin vastauksia yhteensä 50 kpl, joista oikeita vastauksia oli 27 kpl ja vääriä 23. Oikeaksi vastaukseksi laskettiin vastaus, jossa arvioija pystyi erottamaan eri kastelutavalla kasvatetut mansikat aistinvaraisesti. Binomijakauman merkitsevyystasolla 0,01 tulisi oikeita vastauksia olla vähintään 35 kpl, jotta näytteissä voitaisiin katsoa olevan eroa [4]. Tehdyn aistinvaraisen testauksen perusteella voidaan todeta, että eri kastelutavoilla kasvatetuissa mansikoissa ei havaittu eroa binomijakauman merkitsevyystasolla 0,01. Tulos oli odotusarvon mukainen eli molemmilla tavoilla kastellut mansikat todettiin aistinarviossa yhtä maukkaita.

Tulevaisuus

Tutkimus jatkuu vielä vuoden 2024 loppuun ja aistinarvioita on tarkoitus jatkaa. Keväällä 2024 aistitaan salaatin laatua ja myöhemmin on edessä tomaattien aistinarvio. Aistinarviota on tarkoitus jatkaa käyttämällä erotustestejä eri tavoin kasvatettujen tuotteiden erojen selvittämiseen.

Aistinarvio ei ole ongelmaton ja mansikan aistinarvion yhteydessä havaittiin kehittämistarpeita. Käyttämämme raati on kooltaan melko suppea ja luotettavampien tulosten saamiseksi olisi koulutettava ja testattava lisää aistinarvioijia. Käyttämämme tilat olemme pyrkineet järjestämään häiriöttömiksi ja rauhallisiksi, mutta tässäkin olisi parannettavaa. Mansikat maistettiin satokauden alussa, jolloin marjojen kypsyys ei ollut parhaimmillaan. Aistinarviota olisi hyvä tehdä satokauden eri vaiheissa, mikäli sillä on vaikutusta tuotteen laatuun.

Kokonaisuutena aistinarvio on herättänyt Satakunnan ammattikorkeakoulun henkilöstössä kiinnostusta. Aistinarvio on ollut henkilöstölle vieras asia ja lisää tietoa sen toteuttamisesta on haluttu. Vanha sanonta ”Makuasioista ei voi kiistellä” on tullut uuteen valoon tutkimuksessa, jossa makuasioita pyritään mittaamaan. Myös se,

että kaikki eivät maista samalla tavalla, on herättänyt keskustelua. Tiedottamiseen tulee kiinnittää enemmän huomiota niin uusien raatilaisten löytämisessä kuin aistinarviotiedon lisäämisessäkin.

Artikkeli on kirjoitettu osana NABLE-hanketta, joka on Hämeen ELY-keskuksen rahoittama EIP-hanke. NABLE-hankkeessa pyritään tehostamaan ja turvaamaan maatalouden alkutuotantoa nanokokoluokan kaasukuplien tuottamiseen perustuvan teknologian avulla.

Lähteet

- [1] ISO 5495:2005/AMD 1:2016 Sensory analysis. Methodology. Paired comparison test.
- [2] ISO 10399:2017 Sensory analysis. Methodology. Duo-trio test.
- [3] Ying Wang, Shuo Wang, Jingjing Sun, Hengren Dai, Beijun Zhang, Weidong Xiang, Zixin Hu, Pan Li, Jinshui Yang, Wen Zhang, Nanobubbles promote nutrient utilization and plant growth in rice by upregulating nutrient uptake genes and stimulating growth hormone production, 2021, [Online], Haettu 21.12.2023 osoitteesta: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149627>.
- [4] Tuorila, H. ja Appelby, U. (toim.), Elintarvikkeiden aistinvaraiset tutkimusmenetelmät, Oy Yliopistokustannus, HYY yhtymä, Helsinki 2008, s. 17–20, 71–83, 272

Tutkimuskeskus WANDER on veden, veden kanssa kosketuksissa olevien materiaalien sekä sisäympäristön hygieniaa parantavien ratkaisujen johtava asiantuntija Suomessa. Toiminta perustuu poikkitieteellisen tutkijaryhmän vahvaan osaamiseen.

WANDER on yksi Satakunnan ammattikorkeakoulun tutkimuskeskuksista ja toimii Rauman kampuksella. WANDERin tutkimuksessa erittäin olennainen tekijä on yhteistyö yritysten kanssa. Vuosien aikana yhteistyötä on tehty monenlaisten yritysten kanssa pienistä startup-yrityksistä isoihin kansainvälisiin megaluokan yrityksiin.

Tämä kokoomajulkaisu on läpileikkaus WANDERin käynnissä olevista rakennetun sisäympäristön terveellisyyden kannalta olennaisista tutkimuksista koskien vettä ja vesijärjestelmiä, kosketuspintoja sekä sisäilmaa.

ISSN 2323-8372 | ISBN 978-951-633-408-3 (PDF)