



VTT Technical Research Centre of Finland

Laskentatyökalu ilmaitse tapahtuvan infektioriskin arviointiin

Kulmala, Ilpo; Karvinen, Aku; Taipale, Aimo; Säämänen, Arto

Published in:
Sisäilmastoseminaari 2023

Published: 14/03/2023

Document Version
Publisher's final version

[Link to publication](#)

Please cite the original version:

Kulmala, I., Karvinen, A., Taipale, A., & Säämänen, A. (2023). Laskentatyökalu ilmaitse tapahtuvan infektioriskin arviointiin. In M. Ahola, & A. Merikari (Eds.), *Sisäilmastoseminaari 2023* (pp. 211-216). SIY Sisäilmätieto Oy. <https://www.sisailmayhdistys.fi/Julkaisut/Sisailmastoseminaari-julkaisut>

VTT
<https://www.vttresearch.com>

VTT Technical Research Centre of Finland Ltd
P.O. box 1000
FI-02044 VTT
Finland

By using VTT Research Information Portal you are bound by the following Terms & Conditions.

I have read and I understand the following statement:

This document is protected by copyright and other intellectual property rights, and duplication or sale of all or part of any of this document is not permitted, except duplication for research use or educational purposes in electronic or print form. You must obtain permission for any other use. Electronic or print copies may not be offered for sale.

LASKENTATYÖKALU ILMATEITSE TAPAHTUVIEN INFEKTIORISKIEN ARVIOINTIIN

Ilpo Kulmala, Aku Karvinen, Aimo Taipale ja Arto Säämänen

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

TIIVISTELMÄ

Hengitystieinfektiot voivat levitä eri tavoin, eikä eri tartuntareittien suhteellista osuutta useinkaan tunneta varmuudella. Business Finlandin rahoittamassa E3 Pandemic Response -hankkeessa on kehitetty työkalua ilmateitse tapahtuvan tartunnan riskinarviointiin. Siinä otetaan huomioon keskeiset seikat, kuten patogeenien tuottonopeus ja keskimääräinen pitoisuus sisäilmassa. REHVA:n mallista poiketen patogeenien tuotto lasketaan taudin ilmaantuvuuden, pisaroiden emissionopeuden sekä hengitystie-eritteiden patogeenipitoisuuden perusteella. Yksinkertaistuksista ja lähtöarvojen suurista vaihteluista huolimatta laskentatyökalu antaa mahdollisuuden infektioriskin systemaattiseen tarkasteluun, ja sen avulla voidaan tunnistaa rakennuksen tiloja, joissa infektioriski on suhteellisesti korkeampi kuin muissa osissa rakennusta.

JOHDANTO

Hengitystieinfektiot kuten COVID-19 voivat levitä eri tartuntareittien kautta, joista tavallisimmat ovat pisaratartunta, kosketustartunta ja ilmateitse leviävä aerosolitartunta. Perinteisesti on oletettu, että pisaratartunta on yleisin tartuntatapa. Tautia sairastavan henkilön yskiessä tai aivastellessa ilmaan leviää suuri joukko pisaroita, joiden koko vaihtelee laajalla alueella < 1 mikrometrinä aina 1000 µm:iin asti. Suuret, yli 100 mikrometrin kokoiset pisarat lentävät ilmassa lähtösuuntaansa kaareissa ja laskeutuvat nopeasti lattialle tai esineiden pinnoille. Osuessaan lähellä olevan henkilön kasvojen limakalvoille ne voivat aiheuttaa infektion. Patogeenien lukumäärä pisaroissa on verrannollinen tilavuuteen, joten suurissa pisaroissa on tautia aiheuttavia mikrobeja eniten. Pisaroiden lentomatka riippuu lähtönopeudesta sekä niiden koosta ja on yleensä alle 2 m luokkaa. Kosketuspinoille osuneet pisarat voivat aiheuttaa epäsuoran kosketustartunnan kun kontaminoituneita pintoja kosketellaan, jolloin patogeenit siirtyvät käsien kautta kasvojen limakalvoille.

Pärskimisen lisäksi partikkeleita syntyy ja leviää ympäristöön myös laulaessa, puhuessa ja jopa hengittäessä. Hengitysteistä erittyvien partikkeleiden tuottonopeus riippuu äänenkäytöstä niin että tuotto kasvaa äänen voimakkuuden myötä /1/. Pienimpiä, alle 15 mikrometrin kokoalueen partikkeleita on uloshengitysilmassa lukumääräisesti eniten /2/, mutta pienen tilavuutensa vuoksi patogeeneja niissä on vähemmän kuin suurissa pisaroissa. Tyypillisissä sisäilman olosuhteissa näistä pienistä pisaroista haihtuu vesi hyvin nopeasti ja jäljelle jää kiinteitä aerosoleja, jotka kulkeutuvat ilman liikkeen mukana kunnes poistuvat sisäilmasta ilmanvaihdon tai laskeuman kautta. Osassa näistä aerosoleista voi olla tautia aiheuttavia mikrobeja, jotka hengitettynä voivat päätyä syväälle hengitysteihin asti, missä infektion syntymiseen tarvitaan huomattavasti pienempi annos kuin ylähengitysteissä /3/. Ilmateitse tapahtuvan aerosolitartunnan mahdollisuus ulottuu siten koko huonetilavuuteen, kun taas pisaratartunnan riski on rajatumpi sekä suunnaltaan, etäisyydeltään sekä kestoltaan.

ILMATEITSE TAPAHTUVA AEROSOLITARTUNTA

Uloshengitysilman mukana kulkeutuvien pisaroiden kohtalo riippuu hiukkaskoosta. Alle 15 mikrometrin kokoisista pisaroista vesi haihtuu nopeasti, sekunnin murto-osissa, ja jäljelle jää kiinteitä ainesosia sisältäviä nukleaatioyhtimiä joiden koko on kolmasosa alkuperäisestä pisarasta /4/. Osa hengitetyistä aerosoleista deponoituu keuhkoihin, aina syvälle alveolialueelle asti, ja jos näissä aerosoleissa on tautia aiheuttavia viruksia voivat ne aiheuttaa infektion kun hengitetty annos on riittävän suuri. Infektoriskiä on perinteisesti arvioitu Wellsin esittämällä yhtälöllä, joka perustuu koe-eläimillä tehtyihin altistuskokeisiin /5/

$$IR = \exp(-0.693 D/D_{50}) \quad (1)$$

missä D on keuhkoihin kertynyt annos ja D_{50} annos joka aiheuttaa infektion puolelle koe-eläimistä. Yhtälöä on sittemmin käytetty laajasti kuvaamaan myös ihmisten kesken tapahtuvia tartuntoja.

Yhtälö 1 on yksinkertainen mutta siinä on termejä joiden suuruutta ei tunneta tarkasti ja jotka vaihtelevat suuresti. Esimerkiksi infektiota aiheuttava annos ei ole vakio vaan vaihtelee yksilöllisesti ihmisten herkyyden mukaan ja siihen voivat vaikuttaa useat eri tekijät. Sisään hengitetyn annoksen suuruus voidaan puolestaan laskea yhtälöstä

$$D = CtQf \quad (2)$$

Missä C on patogeenien pitoisuus sisäilmassa, t on altistusaika, Q on hengitysilmapvirta ja f keuhkoihin deponoitava fraktio. Näistä altistusaika ja hengitysilmapvirta tunnetaan tai voidaan arvioida suhteellisen tarkasti, mutta pitoisuuden arvioinnissa on suuria epävarmuuksia johtuen patogeenien tuoton vaihteluista.

Patogeenien pitoisuus sisäilmassa voidaan periaatteessa laskea tasapainotilanteessa seuraavasti:

$$C = \frac{N_I G}{(\lambda + \lambda_{IA} + \lambda_D + \lambda_{AC})V} \quad (3)$$

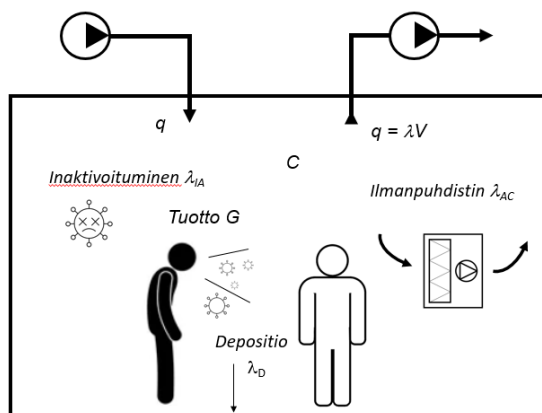
missä N_I on virusta emittoivien henkilöiden lukumäärä tilassa ja G virusten tuottonopeus. Nimittäjässä on tekijöitä jotka vaikuttavat virusten laimenemiseen tai inaktivoitumiseen sisäilmassa. Näitä ovat ilmanvaihtokerroin λ , depositio pinnoille λ_D , mikrobien inaktivoituminen ilmassa λ_{IA} sekä mahdollisen ilmanpuhdistimen tehollinen ilmanvaihtokerroin λ_{AC} , kuva 1.

Yhtälössä 3 tartuttavien henkilöiden todennäköinen lukumäärä N_I arvioidaan epidemiatilanteen perusteella seuraavasti:

$$N_I = pN \quad (4)$$

missä p on taudin esiintyvyys yhteisötasolla ja N henkilöiden lukumäärä tilassa.

Patogeenien tuottonopeus G lasketaan pisaroiden tuottonopeuden ja hengitystie-eritteissä olevien patogeenipitoisuuden (kpl/mL) tulona. Tuottonopeudessa otetaan huomioon alle 15 μm kokoiset pisarat, jotka kuivuvat nopeasti $< 5 \mu\text{m}$ kokoisiksi aerosoleiksi ja jotka ilmassa leijuessaan aiheuttavat altistumisriskin hengitettynä.



Kuva 1. Patogeenien sisäilman pitoisuuteen vaikuttavia tekijöitä.

Patogeenien emissioita laskettaessa otetaan huomioon pisaroiden tuottonopeus aktiiviteetista riippuen /6-8/. Näistä varsinkin viruspitoisuuksissa on suurta vaihtelua: laajoissa mittauksissa keskimääräinen COVID-19 tautia sairastavien ihmisten hengitystie-eritteiden viruspitoisuuden keskiarvo on ollut luokkaa 10^6 RNA kopiota/mL, vaihdellen välillä 10^3 - 10^{10} kpl/mL /9,10/. On siten ilmeistä että ilmaitse tapahtuvaa altistumista ja sairastumisriskiä on mahdotonta arvioida yksilötasolla. Mallit kuvaavatkin tilastollista riskiä tietyillä laskennallisilla lähtöarvoilla ja niiden hyöty on siinä että mallien avulla voidaan arvioida erilaisten tekijöiden vaikutusta infektioriskin suuruuteen sekä eri torjuntatoimenpiteiden tehokkuuksia ja kustannuksia.

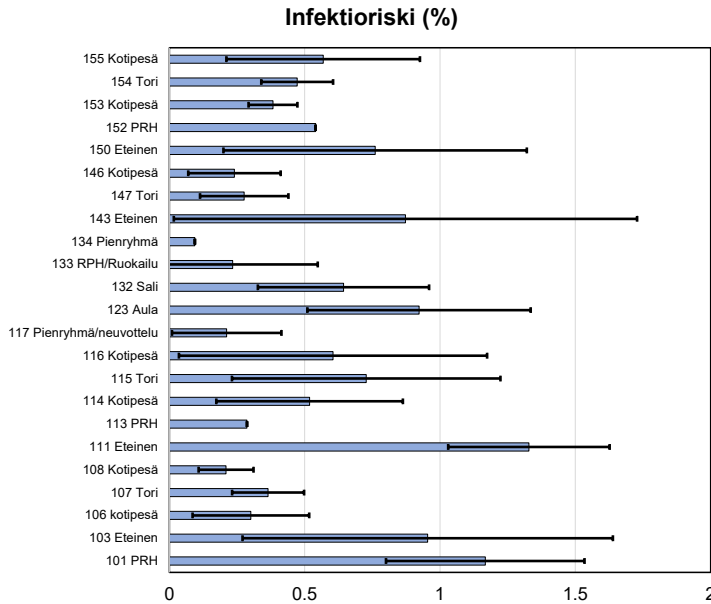
LASKENTAMALLIN SOVELTAMINEN PÄIVÄKOTIIN

Laskentamallia käytettiin hyväksi E3-hankkeessa arvioitaessa helsinkiläisten päiväkotien ilmaitse tapahtuvaa COVID-19 infektioriskiä. Kyselykaavakkeella selvitettiin päiväkotien päivärytmi tunnin tarkkuudella sisältäen eri tilojen aktiiviteetit ja henkilömäärät. Ilmanvaihdon ilmavirrat selvitettiin mitoitusarvojen perusteella. Osassa huoneista tehtiin tarkastusmittauksia ilmavirtojen luotettavuuden selvittämiseksi.

Esimerkkitapauksen päiväkodissa on noin sata lasta ja 17 henkilökuntaan kuuluvaa aikuista. Esimerkkikohteen pinta-ala on noin 1000 m^2 ja sen ilmanvaihto on järjestetty koneellisesti. Päiväkodin ilmanvaihtokerroin on 3.7 l/h . Ilmanvaihdossa on lämmön talteenotto ja tuloilma suodatetaan F7 luokan suodattimilla.

Kuvassa 2 on esitetty laskennallisesti infektioriski päiväkodin eri tiloissa. Kukin pylväkuvastaa tunnin keskiarvoa ja vaakajana tulosten keskihajontaa.

Tulosten perusteella voidaan todeta, että eri tilojen välillä on suuria vaihteluita. Suurimmat pitoisuudet ja siten riski saada infektio olivat eteisissä. Tämä johtuu siitä, että näiden tilojen ilmavirrat ovat verrattain pienet henkilöiden lukumäärään nähden. Lasten kotipesissä laskennalliset pitoisuudet vaihtelivat lapsien lukumäärästä ja aktiiviteetista riippuen. Alhaisimmat pitoisuudet olivat kotipesissä joissa nukuttiin tai levättiin ja joissa ilmavirrat henkilöä kohden olivat verrattain suuret.



Kuva 2. Laskennallinen infektoriski päiväkodin eri tiloissa tunnin altistusajalla.

Kuvan 2 tulokset on laskettu olettaen että viruskonsentraatio hengitystie-eritteissä on $5 \cdot 10^8$ kpl/ml mikä vastasi käytetyillä lähtöarvoilla virusemissiota 1000 - 10 000 RNA kopiota/h. REHVA:n laskentamallissa käytetään quantaa, ja sille on annettu 85 persentiilin osalta arvoja 5-21 kpl/h. Tästä voidaan arvioida, että REHVA:n yksi quanta vastaa tässä mallissa käytettyä infektoivaa annosta $D_{50} = 200 - 500$ viruksen RNA-kopiota. Laskettuja riskejä verrattiin myös REHVA:n laskentatyökaluun /11/, joka antoi 3-10 kertaa suurempia infektoriskejä kuin tässä esitetty malli. REHVA:n työkalussa oletetaan, että tilassa on vähintään yksi sairastunut ja viruksia emittoiva henkilö, mikä on jo sinällään ehdollinen todennäköisyys ja lisäsi laskettua riskiä selvästi.

Laskentamallissa oletetaan tasainen pitoisuus koko tarkasteltavassa tilassa. Tutkitussa päiväkodissa huoneiden pinta-ala oli verrattain pieni, alle 70 m^2 , ja ilmanvaihtuvuus suuri (luokkaa $3-6 \text{ h}^{-1}$). Lisäksi henkilöt (sekä tartuttajat että altistujat) liikkuvat jatkuvasti päiväkodin tiloissa, joten tilakohtainen päästö on tässä tapauksessa oletettu tasaisesti jakautuneeksi ja siten myös tasainen pitoisuus on todennäköinen. Oletus tasaisesta jakaumasta ei kuitenkaan välttämättä pidä paikkaansa suurissa tiloissa joissa henkilöt ovat enimmäkseen paikoillaan ja joissa pitoisuus voi vaihdella merkittävästi.

Laskentamalli kuvastaa kohtuullisen hyvin tilannetta jossa on sekoittava ilmanvaihto ja etäisyys tartuttavan henkilön ja altistuvien henkilöiden välillä riittävän suuri. Lähellä päästölähdettä aerosolipitoisuus ja samalla tartuntariski kasvaa, mitä esitetty laskentamalli ei ota huomioon. Myös pisaratartunnan todennäköisyys kasvaa lähietäisyydellä. Aiemmissa tutkimuksissa /6,7/ on arvioitu, että $0,6 \text{ m}$ etäisyydellä yskivästä henkilöstä pisaratartunnan todennäköisyys on moninkertainen aerosolitartuntaan verrattuna. Toisaalta suuret pisarat, joita syntyy pärskiessä tai kovaäänisesti käyttäytyessä, laskeutuvat nopeasti eivätkä aiheuta pitkän kantaman infektoriskeitä.

JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä E3 hankkeessa kehitetty laskentamalli antaa mahdollisuuden arvioida ilmaitse tapahtuvaa pitkän kantaman infektioriskiä sisätiloissa. Laskennassa tarvitaan tietoja sekä taudin ominaisuuksista että tilan ilmanvaihdesta, käyttöasteesta ja toiminnoista. Malli poikkeaa useimmista aiemmin esitetyistä laskentamallista siinä, että sisätiloissa olevien tartuttavien henkilöiden lukumäärä riippuu kuitenkin epidemiatilanteesta, jolloin realistisempia arvioita saavutetaan ottamalla esiintyvyys huomioon. Myös patogeenein tuotto otetaan periaatteessa yksityiskohtaisemmin huomioon kun se lasketaan ihmisen hengitystie-emissioiden ja -eritteiden patogeenisuuden avulla, jolloin mallia voidaan käyttää yleisesti eri tartuntatautien ilmaitse tapahtuvan infektioriskin arviointiin. Tämä edellyttää tosin tietoa taudin ominaisuuksista kuten infektiivasta annoksesta, mitä varsinkaan uusien epidemioiden alkuvaiheessa ei useinkaan ole saatavilla.

Laskentamallia on käytetty COVID-19 infektioriskin mallintamiseen päiväkodissa. Tulosten avulla saatiin selviä eroja eri tilojen välillä, mikä auttaa torjuntatoimien kuten ilmanpuhdistimien mitoittamisessa ja sijoittamisessa /12/.

KIITOKSET

Tutkimus on toteutettu osana Business Finlandin rahoittamaa E3-pandemianhallintahanketta. Kiitämme myös hankkeessa mukana olevia tutkimuslaitos- ja yrityskumppaneita sekä Helsingin kaupungin edustajia.

LÄHDELUETTELO

1. Alsved, M., Matamis, A., Bohlin, R. et al. (2020) Exhaled respiratory particles during singing and talking, *Aerosol Sci. Technol.* 54 (2020) 1245–1248.
2. Johnson, G., Morawska, L., Ristovski, Z. et al. (2011) Modality of human expired aerosol size distributions, *Journal of Aerosol Science*, 42 (12): 839-851.
3. Department of Health (2011) Routes of Transmission of the Influenza Virus: Scientific Evidence Base Review.
4. Liu L., Wei J., Li Y., Ooi A. (2017) Evaporation and dispersion of respiratory droplets from coughing. *Indoor Air* 27(1):179-190.
5. Wells, W. (1955) Airborne contagion and air hygiene: an ecological study of droplet infections, Harvard University Press, Cambridge MA USA.
6. Nicas M, Sun G. (2006) An integrated model of infection risk in a health-care environment. *Risk Anal*, 26(4):1085-1096.
7. Mizukoshi, A., Nakama, C., Okumura, J., & Azuma, K. (2021) Assessing the risk of COVID-19 from multiple pathways of exposure to SARS-CoV-2: Modeling in health-care settings and effectiveness of nonpharmaceutical interventions. *Environment international*, 147, 106338.
8. Lelieveld J, Helleis F, Borrmann S. et al. (2020). Model Calculations of Aerosol Transmission and Infection Risk of COVID-19 in Indoor Environments. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 17(21):8114.

9. Jones, T., Biele, G., Mühlemann, B. et al. (2021) Estimating infectiousness throughout SARS-CoV-2 infection course. *Science*, eabi5273,
10. Jacot, D., Greub, G., Jaton, K., Opota, O. (2020) Viral load of SARS-1 CoV-2 across patients and compared to other respiratory viruses. *Microbes Infect.* 2020 (22):617-621.
11. REHVA (2022) COVID-19 Ventilation Calculator V2.
<https://www.rehva.eu/covid19-ventilation-calculator>
12. Mattila, I., Taipale, A., Kulmala, I., Karvinen, A., Luoto A., Erkkilä, J., Kannisto, J., Sanmark, E., Lastovets, N., Sormunen, P. (2023) Huonekohtaisten ilmanpuhdistimien mitoituksen optimointi, case päiväkotii. Sisäilmastoseminaari 2023, SIY raportti 41.