

FILTRIRANJE ZRAKA IN RAZVOJ OBRAZNIH MASK IZ NANOVLAKEN ZA ZAŠČITO PRED VIRUSI

AIR FILTRATION AND THE DEVELOPMENT OF NANOFIBER FACE MASKS FOR PROTECTION AGAINST VIRUSES

AVTORJI / AUTHORS:

Maruša Gostiša¹, mag. farm.

Jurij Gostiša², mag. str.

doc. dr. Mirjam Gosenc Matjaž³, mag. farm.

prof. dr. Julijana Kristl³, mag. farm.

¹ Lekarna Ljubljana, Komenskega 11, 1000 Ljubljana

² Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo,
Katedra za energetsko strojništvo,
Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana

³ Univerza v Ljubljani, Fakulteta za farmacijo,
Katedra za farmacevtsko tehnologijo,
Aškerčeva 7, 1000 Ljubljana

NASLOV ZA DOPISOVANJE / CORRESPONDENCE:

E-mail: julijana.kristl@ffa.uni-lj.si

POVZETEK

Onesnaženje zraka z delci in pandemija covid-19 sta povzročila svetovno potrebo po učinkovitih ukrepih za zaščito zdravja ljudi. Membranska filtracija velja danes za najučinkovitejšo in najzanesljivejšo fizikalno metodo za zaščito pred vsemi vrstami delcev iz zraka, čeprav so obrazne maske s filtri z visokim kakovostnim koeficientom in protinfektivnimi lastnostmi še vedno izziv za proizvajalce mask in potrošnike. Prispevek nudi bralcem osnovni opis za širše razumevanje zaščite dihal, ki zajema vrste delcev v zraku, filtracijske mehanizme in testiranje učinkovitosti filtrov ter vrste obraznih mask in njihovo stopnjo zaščite. Nato se ozremo v bližnjo prihodnost, kjer je največ zanimanja za razvoj novih filtrov in obraznih mask za odstranjevanje virusov, kar je možno doseči predvsem z nanotehnološkimi pristopi.

KLJUČNE BESEDE:

delci v zraku, nanotehnologija, obrazna maska, učinkovitost filtriranja delcev, virus

ABSTRACT

Air-particle pollution and the covid-19 pandemic have resulted in a huge global need for specific and effective measures to protect human health. Membrane filtration is now considered the most efficient and reliable physical method against air pollutants, although face masks with filters with high quality factors and antiinfective properties are still a challenge for mask manufacturers and consumers. Here we provide a basic description for a broader understanding of respiratory protection, covering types of particles in the air, filtration mechanisms and testing of the filter effectiveness, along with the types of face masks and offered protection performance. We then look into the near future, where the greatest interest is for the development of new filters and face masks to remove viruses, which can be achieved above all through nanotechnological approaches.

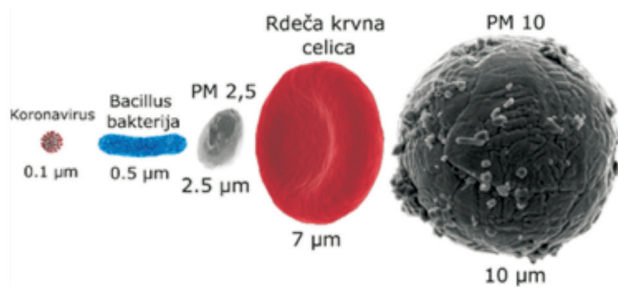
KEY WORDS:

face mask, nanotechnology, particle filtration efficiency, particulate matter, virus



1 UVOD

Naraščanje svetovne populacije in razvoj družbe neizogibno povečujeta obseg industrije in migracij, kar vodi v večjo onesnaženost zraka s plini in delci, ki predstavljajo veliko nevarnost za zdravje (1). Delci v zraku fizikalno predstavljajo aerosol, ki je opredeljen kot disperzni sistem inertnih in bioloških trdnih in tekočih delcev različnih velikosti. Po najnovejšem poročilu Svetovne zdravstvene organizacije (WHO) živi danes 91 % svetovnega prebivalstva v krajih, kjer kakovost zraka ne dosega njenih smernic (2). Raziskava o kakovosti zraka v Pekingu januarja 2013 je pokazala, da predstavljajo mikroorganizmi med vdihanimi delci v velikosti od 2,5 do 10 μm več kot 80-odstotni delež (3). Med njimi so najpogostejše bakterijske in glivne vrste, ki so odgovorne za različne alergije ter širjenje dihalnih in drugih bolezni. Število znanstvenih objav in védenje o atmosferskih delcih (*particulate matter*, PM) se je strmo povečevalo v zadnjih dveh desetletjih, skokovito pa ob izbruhu bolezni covid-19 leta 2020, ki jo povzroča virus SARS-CoV-2 (4). Vedno več je dostopnih podatkov o kakovosti zraka, številne znanstvene raziskave pa potrjujejo vpliv aerosolov na zdravje ljudi (4). Medtem ko so fizikalno-kemijske lastnosti anorganskih onesnaževal že relativno dobro raziskali, pa vemo o mikroorganizmih v zraku bistveno manj, še najmanj pa o virusih. Raziskovalci ugotavljajo, da vsi zelo majhni delci človeku niso nevarni, če le ne pridejo v organizem v prevelikem številu. Topni in razgradljivi delci se po vdihu počasi izločijo, medtem ko je pri težko topnih (npr. kovinski oksidi, azbest) in bioloških delcih situacija precej bolj zapletena. Virusi so mnogo manjši kot številni drugi delci v zraku, zato zahteva njihovo odstranjevanje poseben pristop (slika 1).



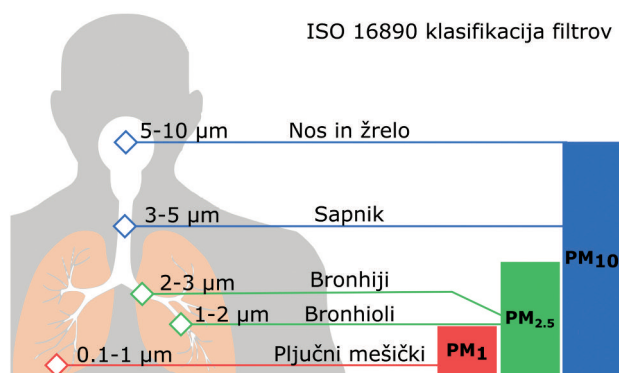
Slika 1: Relativna primerjava velikosti virusa z drugimi vrstami delcev v zraku; PM - atmosferski delci (prirejeno po 4).

Figure 1: Relative comparison size of a virus with other particle types in air; PM - particulate matter (adapted from 4).

Znanih je nekaj več kot 5.000 virusnih vrst, ki lahko okužijo vse vrste organizmov, od arhej in bakterij do gliv, rastlin in živali in ljudi. Virus SARS-CoV-2 je okrogle oblike s premerom 60 do 140 nm in negativnim nabojem na površini. Notranjost virusne kroglice izpolnjuje predvsem RNA, ki je virusni genom, obdan z zaščitno lipidno-beljakovinsko ovojnico, iz katere štrlijo »izrastki« proteina S, ki predstavljajo vezavno regijo, preko katere se virus veže na določene receptorje v membrani gostiteljskih celic. Virusi se razmnožujejo le v živih celicah, ker sami nimajo mehanizmov za lastno reprodukcijo. Mnogo virusov povzroča nalezljive bolezni, saj s svojim delovanjem negativno vplivajo na gostiteljske celice (5, 6).

Virusi se prenašajo preko dotikalnih površin in z vnosom v dihala preko rok ter s kapljičnim prenosom, pri čemer delež respiratornih kapljic, ki nastajajo med govorjenjem, kihanjem in kašljanjem, vsebuje viruse (6). Respiratorne kapljice s premeri nad 20 μm se odstranijo iz zraka zaradi gravitacije tako, da padejo na tla ali se prilepijo na površine in ne potujejo dlje kot 1 do 2 m, manjše kapljice pa lahko ostanejo v zraku mnogo daljši čas, tudi do več ur. V procesu trkov z drugimi delci in molekulami zraka privzamejo njegovo termično energijo, ki jim omogoči naključno gibanje v različnih smereh. Na tak način večajo območje, po katerem se gibljejo. K širitvi okuženega zraka prispevajo tudi zračni tokovi v prostoru in termika, pri kateri se toplejši zrak dviga. Ko tak zrak z okuženimi kapljicami vdihnemo, aerosoli potujejo vzdolž dihalne poti. Kje se ustavijo, je odvisno predvsem od njihove velikosti in gostote. Delci, večji od 10 μm , se običajno odložijo že na začetku dihalne poti, delci, manjši od 1 μm , pa prispejo do pljučnih mešičkov (slika 2) (7). Z zmanjševanjem velikosti kapljic zaradi izhlapevanja vode, odvisno od relativne vlage in temperature, se podaljšuje trajanje njihovega lebdenja v zraku (8). Kako se torej zaščititi pred tem? Dokazano je, da je uporaba fizičnih ovir, kot so zaščitne maske za dihala, učinkovit pristop za zmanjšanje širjenja bakterijskih in tudi virusnih infekcij z izdihanimi kapljicami, predvsem kadar jih posamezniki uporabljajo v zaprtih prostorih in je razdalja med njimi majhna (9). Kot odziv na izbruh virusa SARS-CoV-2 se je uporaba obraznih mask močno povečala (8). Danes je na voljo malo podatkov o zmogljivosti tkanin in drugih membran, ki jih uporabljajo za izdelavo obraznih zaščitnih mask, zlasti o njihovi učinkovitosti filtriranja delcev z velikostjo od nekaj 10 nm do 1 μm (2, 9, 10).

Pogosto so maske sestavljene iz več različnih slojev netkanih materialov, pri čemer ima vsak sloj določeno lastnost in funkcijo. Skozi medicinsko obrazno masko zrak vstopa in izstopa. Zunanji sloj (običajno moder ali črn) je nepre-



Slika 2: Nalaganje delcev iz zraka vzdolž dihalne poti glede na velikost; PMx – velikost delcev (prirejeno po 7).

Figure 2: Deposition of air particles along the airway according to size; PMx – particule size (adapted after 7).

močljiv in odbija tekočino. Srednji sloj preprečuje delcem ali patogenom nad določeno velikostjo prodiranje v katero koli smer. Sloj najbližje koži ujame vdihane delce z zunanje strani, z notranje pa izdihane kapljice. Več slojev skupaj učinkovito ščiti tako uporabnika kot okolico s filtriranjem delcev in patogenov. Ideja in namen medicinskih mask za obraz je filtriranje zraka in s tem preprečevanje prenosa vseh vrst kapljic in delcev v pljuča, vključno bakterij in virusov. Dobri filtri so tisti, ki učinkovito odstranjujejo delce vseh velikosti, povzročijo na filtru nizek padec zračnega tlaka, imajo visoko mehansko trdnost, so lahki in udobni za nošenje ter tudi poceni (2, 9).

2 MEHANIZMI FILTRIRANJA ZRAČNIH DELCEV IN OMEJITVE ZA VIRUSE

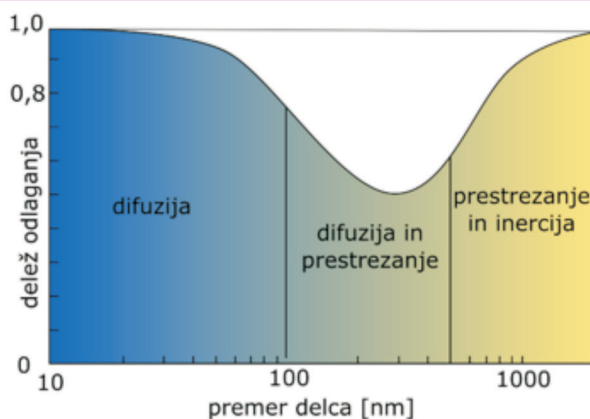
Filtre za filtracijo delcev iz zraka sestavljajo tkanine ali drugi vlaknasti materiali, ki s svojo strukturo in lastnostmi ovirajo prehod delcev skozi. V zadnjem času so predmet raziskav predvsem filtrirne vreče (*fabric filter*) in vlaknaste membrane (9, 11). Osnova filtrirnih vreč temelji na filtriranju delcev po načelu velikosti (*size-exclusion principle*). V primerjavi z njimi lahko vlaknaste membrane, ki so pripravljene iz naključno razporejenih vlaken eno na drugo, ujamejo delce tudi po drugih mehanizmi, predvsem preko elektrostatičnega naboja. Na učinkovitost odstranjevanja delcev iz zraka vplivajo lastnosti delcev samih, kot so kemijska sestava delcev, velikost in oblika, ter hitrost pretoka

zraka in lastnost površine, kamor se delci odlagajo. V splošnem velja, da učinkovitost filtra narašča z naraščanjem mase čistega filtra, se pa zmanjšuje z naraščanjem hitrosti gibanja zraka (11).

Filtrirne vreče večinoma uporabljajo v velikih industrijskih obratih za izločanje trdnih delcev iz plinov. Vlaknasti filtri so namenjeni uporabi v delavnem okolju, skozi katerega prehaja zrak. Za razliko od filtrirnih vreč prihaja pri slednjih do nalaganja delcev vzdolž celotne debeline filtra in ne le na površini. Kateri mehanizmi nastopajo pri odstranjevanju delcev iz zraka, prikazuje slika 3 (12).

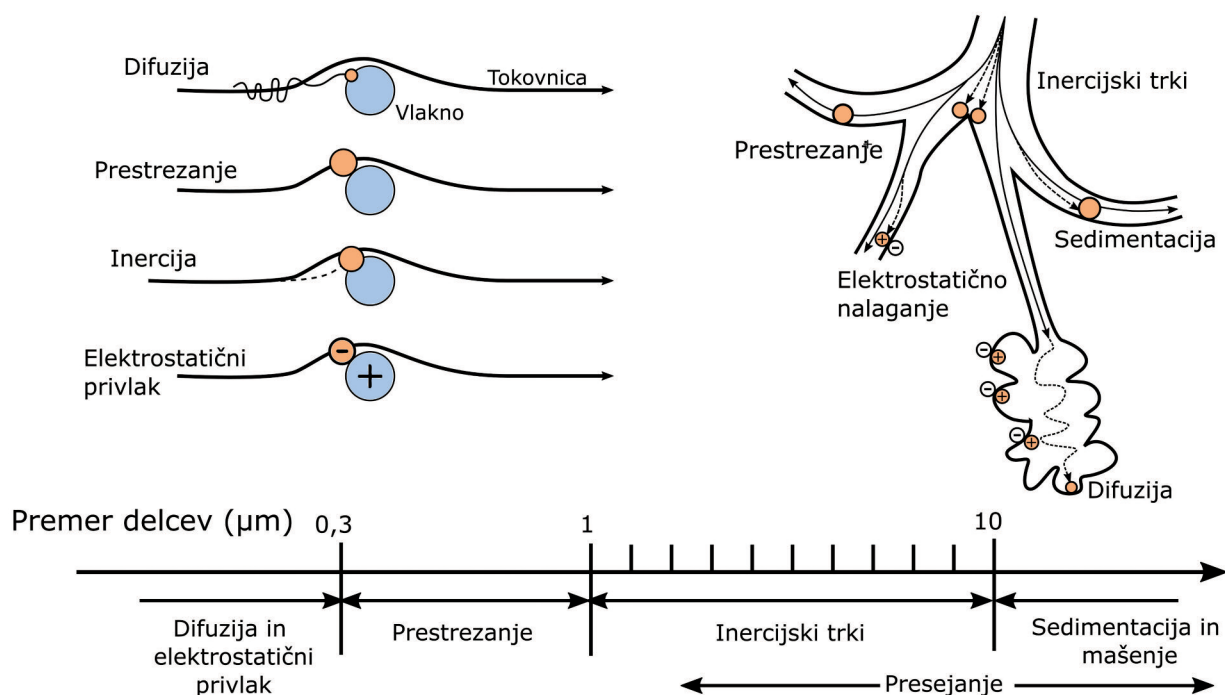
Do prestrežanja pride, ko se delec, ki potuje s tokom zraka, zaleti v vlakno in tam naloži. Verjetnost, da se delec zaleti v vlakno filtra, se veča z večanjem premera delca (slika 4) (12). Zaradi vpliva inercije oz. vztrajnostnih sil delca, se leta ne giblje po tokovnici zraka, temveč v svoji smeri gibanja, dokler se ne zaleti ob vlakno in se na njem deponira. Vpliv mehanizma inercije se veča s povečevanjem mase in hitrosti delca. V primeru tipične hitrosti zraka pri filtraciji postane mehanizem inercije prevladujoč za delce s premerom, večjim od 1 µm. Difuzija delcev je posledica Brownovega gibanja molekul zraka. Zelo majhni delci, ki potujejo z zračnim tokom, so ob gibanju skozi vlakna podvrženi trkanju z molekulami zraka, kar povzroči naključno spreminjanje smeri in je lahko razlog, da se delec zaleti ob vlakno in na njem deponira. Učinek tega mehanizma se povečuje z manjšanjem velikosti delcev in zmanjševanjem hitrosti gibanja zraka. Tako se skoraj vsi nanodelci s premerom < 100 nm v filtru naložijo z difuzijo (11, 12).

V določenih primerih lahko poleg navedenih mehanizmov na zadrževanje delcev vplivajo še elektrostatične interakcije,



Slika 3: Mehanizmi zadrževanja delcev na filtru v odvisnosti od njihovega premera (prirejeno po 12).

Figure 3: Mechanisms of particle retention on a filter depending on their diameter (adapted after 12).



Slika 4: Osnovni mehanizmi filtriranja delcev iz zraka na filtru, nalaganje v pljučih ter prevladujoč mehanizem pri določeni velikosti delca (12).

Figure 4: Basic mechanisms of air particle filtration at filters, deposition in the lungs, and the predominant mechanism at a certain particle size (12).

ki povzročijo, da se delec in vlakno z nasprotnim nabojem privlačita (slika 4). Če je nabit samo delec ali samo vlakno, pa za medsebojni privlak zadostuje že, da je nenabit element polariziran. Zbiranje delcev na vlaknu zaradi elektrostatične sile se z večanjem hitrosti zraka zmanjšuje. Ker elektrostatična polja povečajo učinkovitost filtracije brez povečanja upora zračnemu toku in hkrati ne povečajo padca tlaka, so taki filtrirni sistemi še posebej energetske učinkoviti. Po daljši uporabi lahko nastopi senčenje nabojev, kar zmanjša sposobnost elektrostatičnih interakcij.

Mehanizmi filtracije si sledijo od večjih k manjšim delcem: sedimentacija, inercijski trki, prestrezanje, difuzija in nazadnje elektrostatični privlak (12). Za delce s premerom več kot 10 µm prevladuje sedimentacija zaradi gravitacije, od 1 do 10 µm prevladujeta prestrezanje in inercija, pri aerosolih velikosti do 100 nm prevladujeta mehanizma prestrezanja in difuzije, za še manjše delce pa je možno učinkovito prestrezanje le z elektrostatičnim privlakom. Slednji je še posebej učinkovit pri nizkih hitrostih zraka, ki so značilne za dihanje skozi obrazne maske.

Učinkovitost naštetih mehanizmov filtracije je odvisna predvsem od velikosti delcev, hitrosti pretoka zraka in gostote vlaken. Zanimivo je, da so pri preverjanju učinkovitosti filtracije nanodelcev dokazali, da obstaja med 100 in 500

nm »interakcijsko okno«, v katerem učinkovitost filtracije opazno pade (slika 3). Tu je skupni učinek difuzije in prestrezanja najmanjši, torej je tudi odstotek delcev, ki se v filtru zadržijo, najmanjši (2). Ta ugotovitev ima velik vpliv na filtriranje virusov in nanodelcev samih, tudi če so agregirani ali hidratirani. Pomembno je natančno poznavanje fizikalnih načel filtracije, saj relativna učinkovitost filtrov za zadrževanje virusov ni popolnoma znana, še zlasti odstranjevanje v območju njihovih velikosti (13).

3 STANDARDI IN NORMATIVI ZA ZRAČNE FILTRE IN OBRAZNE MASKE

3.1 ZAKONODAJA ZRAČNIH FILTROV PRI SPLOŠNEM PREZRAČEVANJU

Mednarodna organizacija za standardizacijo (ISO) je postavila svetovni standard ISO 16890 za klasifikacijske in preizkusne postopke za določitev glavnih značilnosti zračnih filtrov v splošnih prezračevalnih sistemih (7). Ameriška agencija za okolje, Svetovna zdravstvena organizacija in Evropska unija so prvič skupaj določile tri razrede delcev v

Preglednica 1: Velikostni razredi delcev v zraku, njihova standardna oznaka, območje filtriranja, primeri delcev in mesto nalaganja vzdolž dihalne poti po standardu ISO 16890.

Table 1: Air particle size classes, their standard designation, filtration area, particle examples and place of loading in the lungs according to ISO 16890 standard.

Premier delcev	Oznaka	Območje filtriranja [μm]	Primeri delcev v skupini	Mesto nalaganja v dihalih
$\leq 10 \mu\text{m}$	PM ₁₀	$0,3 \leq x \leq 10$	prašni delci, bakterije, glive, mikro- in nanodelci, virusi	centralni dihalni sistem (nos in grlo)
$\leq 2,5 \mu\text{m}$	PM _{2,5}	$0,3 \leq x \leq 2,5$	manjši delci, bakterije, glive, mikro- in nanodelci, virusi	periferni dihalni sistem (sapnik, bronhialne cevi)
$\leq 1 \mu\text{m}$	PM ₁	$0,3 \leq x \leq 1$	virusi, delci, nastajajoči pri nepopolnem izgorevanju, nanodelci	pljučni mešički, lahko tudi v krvni obtok

zraku z velikostjo med $0,3 \mu\text{m}$ in $10 \mu\text{m}$ (preglednica 1). Standard ISO 16890 temelji na tem, kje se delci iz zraka, ki ga dihamo, odložijo vzdolž dihalne poti. Zračne filtre po tem standardu vrednotijo v laboratoriju glede na njihovo zmožnost odstranjevanja delcev iz zraka, kar podaja učinkovitost filtracije (7).

Zaradi škodljivosti, dolgotrajnosti lebdenja v zraku in pogostosti potrebujejo največ pozornosti delci, ki so manjši ali enaki $1 \mu\text{m}$. Najlažji in najmanjši delci so najštevilčnejši in najnevarnejši, ostanejo v zraku najdlje, ker lebdiijo, in se širijo skupaj z gibajočim se zrakom. Ti delci po vdihu prodrejo najgloblje v pljuča. Delci z velikostjo $1 \mu\text{m}$ prispevajo k skupni masi zraka le nekaj odstotkov, k skupnemu številu vseh delcev pa več kot 90 %. Za izboljšanje kakovosti zraka v zaprtih prostorih in preprečevanje okužb so učinkoviti filtri v medicinskih maskah za obraz. Standard ISO 16890 podaja učinkovitost filtracije za PM₁, PM_{2,5} in PM₁₀, torej pokriva mikrometrsko področje, kamor sodijo po velikosti bakterije in glive, virusi in nanodelci pa v tem standardu niso omenjeni (7).

3.2 STANDARDI IN ZAHTEVE ZA MEDICINSKE MASKE ZA OBRAZ

Pri dihanju, govorjenju, kašljanju, kihanju in podobno nastanejo manjše ali večje kapljice, večinoma velikosti med $0,5 \mu\text{m}$ in $12 \mu\text{m}$, ki pa se na zraku hitro sušijo in manjšajo (10). Zahteve za medicinske maske za obraz ureja evropska zakonodaja v standardu EN 14683:2019+AC:2019: Medicinske maske za obraz (14). V splošnih zahtevah je navedeno, da so medicinske maske za obraz medicinski pripomočki, običajno sestavljeni iz filtrirne plasti, ki je nameščena, vezana oz. oblikovana med plastmi tkanine. Medicinske maske med namensko uporabo ne smejo razpasti, se razcepiti ali raztrgati. Pri izbiri filtrskih in slojnih

materialov je pomembna mikrobná čistost. Maske morajo biti narejene iz materialov, ki omogočajo prileganje preko nosu, ust in brade uporabnika ter morajo zagotoviti tesno prileganje ob straneh. Lahko so različnih oblik in imajo dodatne elemente, ki zaščitijo uporabnika pred brizganjem in kapljicami. Zahteve za delovanje respiratornih mask so dodatno opredeljene v standardu EN 149:2001+A1:2009: Pripomočki za zaščito dihal (15). Funkcionalne zahteve za medicinske maske vključujejo podpoglavja za naslednje preizkuse:

- *Splošno* velja, da je vse preizkuse treba izvesti na končnih izdelkih ali vzorcih, odvzetih iz serije končnih izdelkov.
- *Učinkovitost bakterijske filtracije (bacterial filtration efficiency, BFE)* – medicinske maske za obraz morajo ustrezati minimalni vrednosti BFE za določeno vrsto mask.
- *Zračnost (breathability)* – medicinske maske za obraz morajo ustrezati minimalni vrednosti zračnosti (tlačna razlika) za določeno vrsto maske.
- *Odpornost proti prodiranju tekočine* – medicinske maske za obraz morajo po preizkusu na odpornost proti prodiranju tekočine ustrezati najmanjši vrednosti, ki je navedena za tip maske IIR.
- *Mikrobna obremenitev (bioburden)* – medicinske maske morajo biti skladne s standardom ($\leq 30 \text{ CFU/g}$).
- *Biokompatibilnost* medicinskih mask za obraz kot površinskih pripomočkov z omejenim stikom mora biti dokazana in dokumentirana v skladu s standardom.

V preglednici 2 so predstavljene vrste medicinskih mask za obraz po standardu EN 14683:2019. Maske so razvrščene v tri kategorije, tip I, tip II in tip IIR, glede na učinkovitost filtracije bakterij z zahtevanimi vrednostmi za posamezno razvrstitev (14).

Poimenovanje mask na trgu in v medijih je različno (npr. zaščitne, medicinske, kirurške, obrazne), kar pogosto povzroča zmedo. Priporočljivo je, da pred odločitvijo za nakup



Preglednica 2: Funkcionalne zahteve za medicinske maske za obraz različnih vrst (14).

Table 2: Functional requirements for medical face masks of different types (14).

Test	Tip I ^a	Tip II	Tip IIR
Učinkovitost filtracije bakterij (%)	≥ 95	≥ 98	≥ 98
Tlačna razlika (Pa/cm ²)	< 29,4	< 29,4	< 49,0
Odpornost na prodiranje tekočin (kPa)	Ni zahtevano	Ni zahtevano	≥ 16,0
Mikrobna obremenitev (CFU/g)	≤ 30	≤ 30	≤ 30

^a Medicinske maske za obraz tipa I smejo uporabljati samo pacienti in druge osebe za zmanjšanje tveganja za širjenje okužb, zlasti v epidemičnih ali pandemičnih razmerah. Maske tipa I niso namenjene zdravstvenim delavcem v operacijski dvorani ali v drugih zdravstvenih okoljih s podobnimi zahtevami, pač pa se v ta namen uporabljajo maske tipov II in IIR. Obrazne maske tipa IIR so odporne tudi na prodiranje tekočine; CFU/g – (colony forming units/g) je enota za ocenitev števila živih bakterij, ki tvorijo kolonije v 1 g vzorca.

maske poiščemo podatek o njeni učinkovitosti filtracije in tlačni razliki ali še bolje njen kakovostni količnik (podpoglavje 3.4.5). Različne vrste obraznih mask se razlikujejo po izgledu in izvedbi ter običajno zagotavljajo različno zaščito (slika 5). Medicinske maske za obraz zagotavljajo zaščito pred vdihavanjem zračnih patogenov mikrometrskih velikosti, veliko slabše pa virusov. Le obrazne maske, ki ustrezajo navedenim funkcionalnim zahtevam, spadajo med osebno zaščitno opremo, ki potencialno zagotovi zaščito pred virusnimi okužbami oz. zmanjšajo širjenje virusov SARS-CoV-2 v svetu (16).

3.3 STANDARDI IN ZAHTEVE ZA RESPIRATORNE MASKE

Zahteve za respiratorne maske (*respirators*) ureja evropski predpis s standardom EN 149:2001+A1:2009: Pripomočki za zaščito dihal (15). V skladu s tem standardom so maske razvrščene v tri razrede glede na njihovo učinkovitost: FFP1, FFP2 in FFP3 (*filtering face piece*) (slika 5). Bistvena razlika med medicinskimi maskami za obraz in respiratornimi maskami je v velikosti odfiltriranih delcev, in sicer prve odfiltrirajo delce ≥ 3 μm, respiratorne maske pa ≥ 0,3 μm (16, 17). Slednje imajo izpopolnjeno filtrirno površino na sredini in odprtine za izdihan zrak ob straneh ter se tesno prilegajo obrazu. Za uporabnika so bolj neudobne kot medicinske maske, otežujejo dihanje in pospešujejo znojenje. Respiratorne maske se po označevanju in filtracijskih parametrih razlikujejo po posameznih regulatornih področjih. Maske FFP1 predstavljajo prvi razred mask z najnižjo filtrirno učinkovitostjo, večinoma jih uporabljamo za delo v prašnem okolju. Maske FFP2 uporabljamo za zaščito pred vdihavanjem v industrijskih obratih in kot zaščito pred virusom gripe, SARS-a in bakterijskimi sevi kuge ter tuberkuloze. Maske FFP3 imajo največjo filtrirno sposobnost in omogočajo odstranitev 99 % zelo majhnih delcev (11).

Na sliki 5 so prikazane zahteve za posamezne vrste medicinskih in respiratornih mask z oznakami za različne trge: kitajski, ameriški in evropski. Usklajeno poimenovanje zaenkrat ne obstaja kakor tudi ne zahtevane enotne vrednosti parametrov. Na vseh trgih najdemo zaščitne maske treh vrst, a so poimenovanje in standardne vrednosti različne. Vedno raste učinkovitost filtracije od prve do tretje kategorije. Med geografskimi področji je največje odstopanje pri respiratornih maskah, tako po poimenovanju kot učinkovitosti filtracije. Le maske z visoko učinkovitostjo filtracije tudi izredno majhnih delcev bodo prispevale k izboljšanju kakovosti vdihanega zraka. Ob poznavanju mehanizmov filtracije lahko zaključimo, da sedanji medicinski pripomočki za filtracijo zraka dobro zaščitijo pred mikrometrskimi aerosoli, manj pa pred nanodelci in virusi.

3.4 TESTIRANJE KAKOVOSTI FILTROV IN MASK

Glavni preizkusi, ki jih uporabljamo za oceno učinkovitosti obraznih mask, so filtracija, zračnost in dihalna odpornost (*filtration, breathability, breathing resistance*) (11, 15, 17). Pri medicinskih maskah za obraz morajo testirati materiale za izdelavo, medtem ko pri respiratornih maskah opravijo preizkuse na izdelanih maskah. Preizkuse izvajajo pri definiranih pogojih (temperatura, relativna vlaga in pretok zraka) (18). Na učinkovitost filtra pri ločevanju delcev iz zračnega toka vplivajo sestava in oblika delcev, pretok in vrsta filtrirne površine. Znani so različni preizkusi, s katerimi dokažemo učinkovitost filtracije (10, 16, 17). Glede na vrsto in velikost delcev poznamo učinkovitost filtracije delcev (*particulate filtration efficiency*, PFE), učinkovitost bakterijske filtracije (BFE) in učinkovitost virusne filtracije (*virus filtration efficiency*, VFE). Številne znanstvene raziskave kažejo, da se anorganski in biološki delci ujamejo s podobnimi mehanizmi (18). Sama učinkovitost filtracije se večja z večanjem mase filtra in manjša z večanjem hitrosti gibanja zraka (18).

Tip maske	Standard	Učinkovitost filtracije		
Medicinska maska 	KITAJSKA: YY 0469	3,0 µm ≥ 95 % 0,1 µm ≥ 30 %		
	ZDA: ASTM F2100	Level 1	Level 2	Level3
		3,0 µm ≥ 95 %	3,0 µm ≥ 98 % 0,1 µm ≥ 98 %	3,0 µm ≥ 98 % 0,1 µm ≥ 98 %
	EVROPA: EN 14683	Tip I	Tip II	Tip III
		3,0 µm ≥ 95 % 0,1 µm: ✗	3,0 µm ≥ 98 % 0,1 µm: ✗	3,0 µm ≥ 98 % 0,1 µm: ✗
Respiratorna maska 	ZDA: NIOSH (42 CFR 84) KITAJSKA: GB2626	N95/KN95	N99/KN99	N100/KN100
		0,3 µm ≥ 95 %	0,3 µm ≥ 99 %	0,3 µm ≥ 99,97 %
	EVROPA: EN 149:2001+A1:2009	FFP1	FFP2	FFP3
		0,3 µm ≥ 80 %	0,3 µm ≥ 94 %	0,3 µm ≥ 99 %

Slika 5: Zahteve za posamezne vrste mask za obraz za trg Evrope, Združenih držav Amerike ali Kitajske in njihova učinkovitost filtracije; X – brez zahtev (14).

Figure 5: Requirements for individual types of face masks for the European, United States or Chinese market and their particle filtration efficiency; X – no requirements (14).

Tako za izvedbo preizkusov kot omejevanje okužb je pomembno poznati relativno vlažnost okolja, ki različno vpliva na preživetje mikroorganizmov. Mehanizem, na katerem temelji ta odnos, ni znan, zlasti ne za viruse. S tradicionalnimi pristopi na osnovi celičnih kultur so raziskali učinke relativne vlage na sposobnost preživetja bakterij in virusov tako v aerosolih kot v mirujočih kapljicah. Rezultati so pokazali, da je sposobnost preživetja bakterij na splošno manjša z nižanjem relativne vlage. Virusi relativno dobro ohranijo biološko aktivnost pri nizki (pod 33 %) in visoki vlagi (nad 80 %), medtem ko se njihova aktivnost zmanjša pri vmesnih vrednostih (19). Najpogostejši preizkusi za vrednotenje filtrov so navedeni spodaj.

3.4.1 Učinkovitost filtracije delcev

Standard učinkovitosti filtracije delcev (PFE) predstavlja frakcijo delcev, ki jih filter ali maska zadrži pri konstantni hi-

trosti pretoka zraka. Za kvantitativno opredelitev učinkovitosti filtracije materialov za maske uporabljajo 0,1-mikrometrške polistirenske delce ali delce natrijevega klorida določenih velikosti pri hitrostih zračnega toka 0,5 do 25 cm/s. S števcem delcev preštejejo tiste delce, ki sipajo svetlobo v območju velikosti 0,1 do 5,0 µm. Učinkovitost filtracije delcev, E_{PM} , izračunamo kot razmerje delcev pred in po filtriranju skladno z enačbo:

$$E_{PM} (\%) = \frac{c_0 - c_1}{c_0} \times 100,$$

kjer c_0 (µg/m³) in c_1 (µg/m³) predstavljata masno koncentracijo ali povprečno število delcev pred in po uporabi zračnega filtra (14–18).

3.4.2 Učinkovitost filtracije bakterij

Medicinskim maskam določijo učinkovitost filtracije bakterij po standardu EN 14683:2019 (15). Za simulacijo bakterij-

ske okužbe uporabljajo aerosol *Staphylococcus aureus*. Nadzorovano črpajo suspenzijo bakterijske kulture s 5×10^5 CFU/ml skozi razpršilec s stalnim pretokom in tlakom zraka. Višji odstotek učinkovitosti filtracije označuje višjo raven zaščite za pacienta in zdravstveno osebje pred boleznimi, ki se prenašajo z aerosoli (18).

3.4.3 Učinkovitost filtracije virusov

Učinkovitost filtracije virusov ni standardna metoda, vendar jo sedaj uporabljajo proizvajalci mask. Za preizkus uporabljajo enak postopek in nastavitve, kot jih priporoča standard EN 14683 za učinkovitost filtracije bakterij, s to razliko, da uporabijo virusni aerosol in ne bakterijskega. Virusni aerosol so v zraku razpršene kapljice vode, ki vsebujejo viruse in ne posameznih delov virusa (17).

3.4.4 Padec tlaka na filtru

Poleg učinkovitosti filtracije je izredno pomembna tudi dobra permeabilnost filtra za zrak. To opredelimo kot razliko tlaka (med dovodnim in odvodnim tlakom zraka v napravi, ki tehnično posnema nošenje maske) (13, 16). Padec tlaka se povečuje z večanjem debeline filtra ali z manjšanjem njegove prepustnosti (20). Merilo dihalnega upora ocenijo po standardu EN 149:2009 (14), predstavlja pa značilen parameter, ki ga je treba oceniti in navesti na izdelku.

3.4.5 Kakovostni količnik

S kakovostnim količnikom (*quality factor*, QF) ovrednotimo celotno lastnost filtracijskih materialov, kjer za izračun upoštevamo eksperimentalne podatke: E predstavlja učinkovitost odstranjevanja delcev, ΔP pa padec tlaka zaradi filtra:

$$QF = -\ln(1 - E)/\Delta P$$

Višji kakovostni količnik je povezan tudi z boljšim filtriranjem. Definicija QF pokaže večjo učinkovitost filtracije pri manjšem padcu tlaka. Če povečamo količino vlaken v filtru oz. maski, se zmanjša velikost por (prosta pot za zrak in delce) in izboljša učinkovitost odstranjevanja, a žal hkrati poveča zračni upor. Posledično je izredno pomembno, da najdemo ravnovesje med učinkovitostjo odstranjevanja delcev in zračnim uporom. Za večji QF je možno tehnološko optimirati razmerje med površino in debelino vlaken ter prostor med njimi, da čim manj ovira pretok zraka.

Preglednica 3: Parametri in lastnosti obraznih mask.

Table 3: Parameters and properties of face masks.

- Učinkovitost odstranjevanja delcev
- Primeren padec tlaka
- Kakovostni količnik
- Protiinfektivne lastnosti
- Biokompatibilnost
- Udobno nošenje
- Izgled
- Večkratna uporaba
- Toplotna stabilnost
- Možnost recikliranja
- Sprejemljiva cena
- Negorljivost

4 FILTRI IN MASKE V RAZVOJU

Pomanjkljivost konvencionalnih obraznih mask je vezana na nezadostno zadrževanje delcev $\leq PM_{10}$, velik padec tlaka ter visoko osnovno maso (2, 10, 11, 15, 20). El-Atab in sod. poročajo, da obrazna maska N95 zagotavlja visoko raven zaščite pred bakterijami, a je učinkovitost filtracije za delce, manjše od 300 nm, le približno 85-odstotna. Ker znaša premer virusa, ki povzroča bolezen covid-19 65 do 125 nm, širina por v filtru pa približno 300 nm, obstaja potreba po razvoju učinkovitejših mask (21). Poleg navedenih parametrov je pomemben vidik dobre zaščitne maske, ki ga je vredno upoštevati pri razvoju, nabavi ali uporabi vseh vrst obraznih mask, udobno nošenje (22). Ugotovili so, da je udobnost maske oz. njena nosljivost neposredno odvisna od sposobnosti maske za prepustnost vodne pare in zraka ter učinkovit prenos toplote (10, 18). Ocenjujejo, da je treba razviti filtre z nižjo porabo energije za premagovanje upora maske, hkrati pa doseči visoko učinkovitost filtriranja. Dokazano je, da višja učinkovitost mask dobro korelira z zmanjšanjem premera vlaken, kar dosežejo z različnimi nanotehnološkimi pristopi, ki še niso v celoti izkoriščeni, kot ugotavljajo znanstveniki. Nanomateriale lahko uporabimo za izboljšanje filtracijskih sposobnosti in zračnosti z namenom, da izboljšamo kakovost mask (18). K celovitemu udobju prispevajo tudi povečanje prostora med masko, nosom in ustnicami, zadostna prožnost ušesne zanke in masa maske.

Med procesom filtracije prehaja skozi masko zrak, ki je toplel, vlažen in poln mikroorganizmov, zato obstaja velika

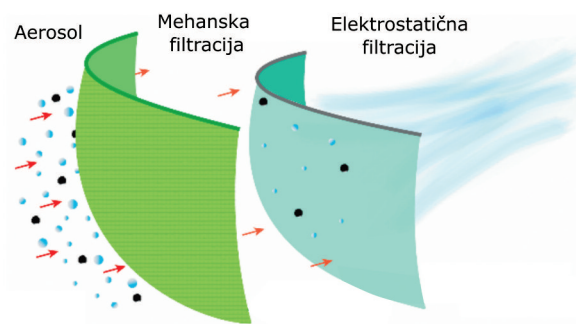
verjetnost za razrast bakterij in plesni v njih. Za zmanjšanje števila mikroorganizmov so pričeli v vlakna vgrajevati snovi s protimikrobnim delovanjem (22). Za izboljšanje filtracije razvijajo in preizkušajo nove materiale in nove tehnologije.

4.1 MATERIALI ZA PRIPRAVO FILTROV IN ZAŠČITNIH MASK

Glede na izvor razdelimo polimerne materiale v tri skupine: naravne, sintezne in biotehnoške (23). Naravni materiali, vključno s polisaharidi, kot so celuloza, škrob in hitozan, in beljakovinski materiali, kot so kolagen, elastin in svilu, so idealni biološko razgradljivi polimeri. Celuloza je naravni material, ki omogoča le mehansko zajetje delcev, ker sama po sebi ne poseduje elektrostatičnega naboja. Nasprotno hitozan, kolagen, elastin in svilu posedujejo naboj in lahko dosežejo zajetje delcev tudi z elektrostatičnim mehanizmom (24, 25). Tovrstni naravni materiali so sorazmerno težko predvidljivi, imajo šibke mehanske lastnosti in nizko obstojnost v vlažnem okolju. V izogib navedenim pomanjkljivostim naravne materiale običajno spremenijo s fizikalnimi, kemičnimi in encimskimi reakcijami (26). V praksi so danes bolj zastopani sintezni polimerni materiali, kot so polipropilen, polikaprolakton, polivinil alkohol, polimlečna kislina, kopolimer mlečne in glikolne kisline in drugi (27). Med nove materiale, ki ustrezajo postopku elektrostatskega sukanja, sodijo tudi poliviniliden fluorid, poliakrilonitril, polikarbonat in acetilceluloza. Proučujejo tudi kompozitno sestavo, kot je npr. hitozan/polivinil alkohol, ki zaradi zmerne elektrostatičnega naboja izkazujejo boljšo učinkovitost (27, 28). Filtri iz acetilceluloznih nanovlaken z različnimi povprečnimi premeri izkazujejo boljše rezultate kot komercialni filtri.

Na tržišču najdemo kemijsko enake polimere različnih molekulskih mas in substitucijskih stopenj, zato jih je vredno raziskati. Larsen in sod. so proučevali polipropilen (PP) treh različnih vrst in poiskali tisto, ki izkazuje najboljšo filtracijsko učinkovitost na primeru mask N95 (29).

Navedeni materiali, ki jih uporabljajo za izdelavo filtrov za obrazne maske, omogočajo pripravo vlaken različnih premerov (10 do 50 μm) (30, 31). Ker so debelina teh vlaken in pore med njimi relativno velike, so vlakna ustrezna za prestrezanje bakterij, za prestrezanje virusov in drugih submikronskih delcev pa ne. Rešitev predstavljajo tehnologije, s katerimi pripravimo na osnovi teh vlaken dodatno plast ultratankih vlaken z mnogo manjšimi vmesnimi prostori, ki zgolj malenkostno spremenijo upor zraka v filtru. Zaradi vseh lastnosti, ki jih želimo doseči pri izdelavi obraznih mask, je smiselno uporabiti več slojev iz različnih materialov, ki omogočijo zajetje delcev tako zaradi mehanske pregrade



Slika 6: Primer filtracije skozi dvoslojno obrazno masko, ki vključuje različne mehanizme filtracije (16).

Figure 6: Example of a two-layer face mask filtration approach involving different filtration mechanisms (16).

kot tudi elektrostatičnega naboja, in hkrati zadostiti pričakovanjem potrošnikov; koncept je predstavljen na sliki 6 (16).

Pri izboru materialov in postopkov ne smemo prezreti usmerjenosti v alternativno (zeleno) tehnologijo, ki je prijaznejša do okolja z vidika varstva okolja v primerjavi s funkcijsko enakimi tehnologijami, ki prevladujejo v današnji praksi. Z vidika polimerov in topil izbiramo med tistimi, ki so biološko razgradljivi in topni v okolju prijaznih topilih, izdelane maske pa je možno reciklirati (2, 32).

4.2 IZDELAVA ZRAČNIH FILTROV IZ NANOVLAKEN Z METODO ELEKTROSTATSKEGA SUKANJA

Najpogostejši postopek za izdelavo ultratankih polimernih vlaken (nanovlaken) je elektrostatsko sukanje raztopine polimera ali kombinacije polimerov (30). Z besedo nanovlakna imenujemo zelo tanka in dolga vlakna, s premerom manj kot 1000 nm in veliko specifično površino. Elektrostatsko sukanje je metoda za izdelavo membran z vlakni različnih premerov, morfologij, polarnosti in poroznosti. Nanovlakna omogočajo nastanek mehkih in prožnih membran z dobrimi mehanskimi lastnostmi, kot sta natezna trdnost in elastičnost (33–35).

Osnovne komponente elektrostatskega sukanja so visokonapetostni vir energije, črpalka z brizgo, šoba ter zbiralo. Proces sukanja se prične, ko vzpostavimo vir električne napetosti med šobo in zbiralom. Nato se v raztopini polimera ustvari električni naboj, ki povzroči, da sferična kapljica, ki nastane na izstopu šobe, spremeni svojo obliko v Taylorjev stožec. Slednji nastane zaradi prisotnosti naraščajočih odbojnih sil med istovrstnimi naboji na površini ka-



pljice in privlačnih sil med nasprotno nabitim zbiralom. Ko sila električne napetosti preseže silo površinske napetosti kapljice, se z vrha Taylorjevega stožca tvori curek, ki potuje proti zbiralu. Na tej poti topilo odpareva, curek se tanjša ter se prične vrtinčiti, kar je posledica skupnega vpliva električnega polja in odboja med površinskimi naboji. Na zbiralu se naberejo suha in izredno lahka nanovlakna, urejena naključno. Na morfologijo elektrosukanih nanovlaken vplivajo različni dejavniki, še posebej vrsta in koncentracija polimera v raztopini, topilo, električna napetost, hitrost toka raztopine skozi šobo, razdalja med šobo in zbiralom, lastnosti raztopine (polarnost, površinska napetost, električna prevodnost) ter vpliv okolja, kjer se izvaja elektrostatsko sukanje (temperatura, relativna vlažnost, premikanje zraka) (34).

Z ozaveščanjem o varovanju okolja se hkrati razvija elektrostatsko sukanje polimernih talin, torej tehnologija brez uporabe topil, ki sicer pogosto predstavljajo probleme (toksičnost topil, zaostanek topil v vlaknih in med njimi). V literaturi omenjajo kot primerne polimere, ki jih lahko uspešno oblikujemo v filtre preko talin, polietilen, polipropilen, polikaprolakton, poliuretan, polimlečno kislino in druge (31,2). Učinkovitost filtracije delcev in padec tlaka sta najpomembnejša parametra zračnih filtrov. Raziskave so pokazale, da so filtri iz nanovlaken bolj učinkoviti za filtriranje aerosolov zaradi njihove večje specifične površine kot filtri iz mikrovlaken, ker prvi zagotavljajo boljši stik med delci v zraku in vlakni (32). Za pripravo vlaken v nanometrskem območju so razvili pristop samosestavljanja molekul s specifično molekularno zasnovo, ki omogoča ustrezno strukturno ureditev (princip »LEGO«) (36). Torej že s skrbno izbranim materialom in tehnološkim postopkom lahko pripravimo filtre in obrazne maske, ki zadostijo vsem predpisanim standardom za odstranjevanje delcev iz zraka (37). Velik napredek je pričakovati tudi na področju odstranjevanja virusov in nanodelcev, saj raziskovalci intenzivno raziskujejo v smeri izbora in vgrajevanja varnih aktivnih sestavin.

4.3 MEMBRANE IZ NANOVLAKEN ZA VGRAJEVANJE V OBRAZNE MASKE IN UČINKOVITO ZADRŽEVANJE MIKROBOV

Velikost virusov redko presega 100 nm, kar je razlog za njihovo neučinkovito zadrževanje na filtrih. Da bi zagotovili ustrezno zadrževanje virusov, bi bila smiselna izdelava filtrov z velikostjo por 10 do 100 nm in z vgrajeno učinkovino, ki

izkazuje protimikrobno ali protivirusno delovanje (2, 10, 28, 38). Natančno bi bilo treba določiti debelino vlaken in por z vrstično elektronsko mikroskopijo, mehansko trdnost (Youngov modul), protiinfektivno učinkovitost, sposobnost adsorpcije virusov ter protivirusno delovanje nanovlaken (38–40).

V literaturi najdemo članke, v katerih opisujejo razvoj kompozitnih nanovlaken s protimikrobnimi ali protivirusnimi učinkovinami, ki so jih izdelali z metodo elektrostatskega sukanja ter jim določili učinkovitost filtracije, tlačni padec in kakovostni količnik (2, 13, 27, 28, 38, 40, 41). Dokazali so, da so vlakna z manjšim premerom privedla do večjega mehanskega zajema z difuzijo in prestrezanjem predvsem zaradi velike specifične površine nanovlaken. Za zajemanjem aerosolov velikosti delcev pod 100 nm, ki simulira koronavirus in nanoaerosolna onesnaževala, je difuzija postala pomemben mehanizem. Elektrostatični zajem že sam po sebi nekoliko izboljša zajem, prisotnost številnih tankih nanovlaken pa ga še poveča.

Kot aktivne spojine v nanovlaknih proučujejo delce cinkovega, titanovega, magnezijevega, aluminijevega ali bakrovega oksida, srebra in zlata ter protimikrobno delovanje dokazujejo s preizkusi inhibicije rasti na celičnih gojiščih. Za nanodelce srebra in zlata so dokazali, da izkazujejo protivirusno delovanje proti različnim vrstam virusov: virusu influence, HIV-1, virusu herpesa simpleksa tipa 1 (HSV-1) in virusu hepatitisa B (HBV) (14). Slednje kaže na smiselnost vgrajevanja kovinskih ionov v materiale za izdelavo membran za obrazne maske (2, 13, 28).

V večini drugih člankov izdelanim filtrom niso določili in definirali velikosti njihovih por ter s preizkusi določili njihovega protivirusnega delovanja, zato težko sklepamo o njihovi učinkovitosti za odstranjevanje virusov. Ravno zato bi bilo treba razviti metode in preizkuse za določitev vezave virusov na filtre. Smiselno bi bil razvoj metode, s katero bi lahko kvalitativno in kvantitativno določili, ali se je virus zadržal na filtrih in v kakšnem obsegu. Ena izmed možnosti je razvoj metode, s katero bi lahko določili, ali se virus veže na vlakna filtra in ali vgrajene protivirusne učinkovine sploh učinkujejo nanje. Druga možnost pa je merilna tehnika po analogiji kot za druge delce, ki bi omogočala določitev, koliko virusov je prešlo filter in se na njem ni zadržalo. S tem bi omogočili razvoj standardnih metod in posledično omogočili lažje interpretiranje rezultatov raziskav.

Nedavna pandemija in spodbujene številne raziskave po vsem svetu so pokazale potrebo po razvoju ustrežnejših mask, na osnovi inovativnih materialov in nanotehnoloških postopkov. Pričakujemo lahko razvojni prehod od sedanjih

relativno enostavnih do naprednih zaščitnih mask. Nekateri napredni filtri z odličnim kakovostnim količnikom imajo tudi posebne lastnosti, kot so toplotna stabilnost, antibakterijske lastnosti, so samočistilni, negorljivi in biološko razgradljivi. Dodatno najdemo v literaturi prve filtre za filtriranje zraka in učinkovito odstranjevanje delcev PM 0,1 (42).

5 ZAKLJUČEK

V zadnjih letih narašča prizadevanje za razvoj naprednih strategij za odstranjevanje aerosolov v vdihanem zraku. Z uvajanjem elektrostatskega sukanja v proces izdelave nanovlaken je možno izdelati električno nabite, ultralahke filtre. Membrane iz nanovlaken s svojimi lastnostmi omogočajo reševanje prenekaterih omejitev, ki jih predstavlja uporaba konvencionalnih materialov. Izdelava membran iz nanovlaken omogoča nadzor velikosti por, premera vlaken in s tem doseganje velike specifične površine in hkrati zagotavlja vse mehanizme filtracije. Take membrane znatno izboljšajo učinkovitost filtriranja virusov in drugih submikronskih delcev v zraku, pri tem pa le malo vplivajo na pretok zraka (majhen padec tlaka). Če povzamemo, je le uporaba ustrezne maske učinkovito sredstvo za zaščito delovnega okolja in posameznika pred virusi in drugimi kontaminanti. Pri izbiri maske moramo biti previdni, da izberemo ustrezno za določen namen uporabe. Ob prihodnjih pandemijah, povezanih z dihalci, pričakujemo dostopnost učinkovitejših obraznih mask.

Danes opažamo potrebo za razvoj filtrov s kombiniranim mehanizmom odstranjevanja virusov s filtriranjem aerosolov ter vključevanjem spojin s protivirusnim delovanjem. Ne glede na to se je treba še vedno zavedati vseh dejavnikov, ki vplivajo na ustreznost filtrov. Ključnega pomena pri vlaknastih filtrihi je njihova sposobnost za učinkovito odstranjevanje virusov iz zraka, nizek upor zračnega toka ter sposobnost prenosa toplote in vodne pare. Poseben poudarek je treba nameniti udobnosti mask, ker neudobne obrazne maske pri uporabnikih povzročajo nelagodje in povečajo verjetnost, da jih ne uporabljajo v skladu z navodili. V prihodnosti lahko pričakujemo večje poenotenje izrazov in standardnih vrednosti za enake vrste zračnih filtrov in mask na svetovnem nivoju. S tem bi značilno olajšali njihovo prepoznavnost, osebno uporabo, svetovanje v lekarnah in zdravstvenih ustanovah, pa tudi trgovanje.

6 VIRI

1. Fuzzi S, Baltensperger U, Carslaw K, Decesari S, Denier van der Gon H, et al. Particulate matter, air quality and climate: lessons learned and future needs. *Atmos. Chem. Phys.*, 2015, 15, 8217–8299.
2. Lv Dan, et al. Ecofriendly electrospun membranes loaded with visible-light-responding nanoparticles for multifunctional usages: highly efficient air filtration, dye scavenging, and bactericidal activity. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11.13: 12880–12889.
3. Cao C, Jiang W, Wang B, Fang J, Lang J, Tian G, Jiang J, Zhu TF. Inhalable Microorganisms in Beijing's PM2.5 and PM10 Pollutants during a Severe Smog Event. *Environ. Sci. Technol.* 2014; 48 (3): 1499–507.
4. Slika 1- Primerjeva velikosti različnih delcev in snovi: Dostop (april 2020) <https://smartairfilters.com/en/blog/comparison-mask-standards-rating-effectiveness/>
5. Tomašič T. Korona virus SARS-CoV-2 in bolezen covid-19. *Farm. Vestn.* 2020; 71 (2): 107–111.
6. Morawska, L.; Cao, J. Airborne Transmission of SARS-Cov-2: The World Should Face the Reality. *Environ. Int.* 2020, 139, 105730.
7. ISO 16890: Air Filters for General Ventilation 2016; ISO Geneva, Switzerland, 2016. <https://www.scribd.com/document/415141099/ISO-16890-Pocket-Guide-english-final>
8. Kutter JS, Spronken MI, Fraaij PL, Fouchier RA, Herfst S. Transmission Routes of Respiratory Viruses Among Humans. *Curr. Opin. Virol.* 2018; 28, 142–51.
9. Maedler L., Friedlander S. K.: Transport of Nanoparticles in Gases: Overview and Recent Advances. *Aerosol and Air Quality Research*, 2007; 7 (3): 304–42.
10. Chua MH, Cheng W, Goh SS, Kong J, Li B, Lim JYC, et al. Face Masks in the New COVID-19 Normal: Materials, Testing, and Perspectives. *AAAS Research*, 2020 Article ID 7286735
11. Liu H, Cao C, Huang J, Chen Z, Chen G, Lai Y. Progress on particulate matter filtration technology: basic concepts, advanced materials, and performances. *Nanoscale*. 2020; 2(2):437–453.
12. Colbeck I, Lazaridis M. Filtration Mechanisms. In *Aerosol Science: Technology and Applications*, 1st ed.; Colbeck, I. Lazaridis, M., Eds.; John Wiley & Sons: New York, 2014; pp 89–118.
13. Leung W W F, Sun Q. Electrostatic Charged Nanofiber Filter for Filtering Airborne Novel Coronavirus (COVID-19) and Nano-Aerosols. *Sep. Purif. Technol.* 2020, 250, 116886.
14. European Standards. UNE EN 14683:2019+AC: 2019. *Medical Face Masks - Requirements and Test Methods* (2019) <https://www.en-standard.eu/>
15. EN 149:2001+A1:2009: Respiratory Protective Devices. *Filtering Half Masks to Protect against Particles. Requirements, Testing, Marking.* <https://www.en-standard.eu/bs-en-149-2001-a1-2009-respiratory-protective-devices>.
16. Konda A, Prakash A, Moss GA, Schmoldt M, Grant GD, Guha S. Correction to aerosol filtration efficiency of common fabrics used in respiratory cloth masks. *ACS Nano*, 2020; 14 (5): 6339–47.
17. European Medicines Agency. Alofisel product information. <https://www.ema.europa.eu/en/documents/product-information/alofisel-epar-product-information.pdf>



18. Lee Shu-An, Dong-Chir Hwang, He-Yi Li, Chieh-Fu Tsai, Chun-Wan Chen, Jen-Kun Chen. Particle size-selective assessment of protection of European standard FFP respirators and surgical masks against particles-tested with human subjects. *J Healthcare Eng.* 2016, 2016:8572493.
19. Lin K, Marr LC. Humidity-dependent decay of viruses, but not bacteria, in aerosols and droplets follows disinfection kinetics. *Environ. Sci. Technol.* 2020; 54 (2): 1024–1032.
20. Anja Pogačnik Krajnc A, Pirker L, Gradišar Centa U, Gradišek A, Mekjavic IB, Godnič M, Cebašek M, Bregant T, Remškar M. Size- and time-dependent particle removal efficiency of face masks and improvised respiratory protection equipment used during the COVID-19 pandemic. *Sensors* 2021; 21: 1567.
21. El-Atab N, Qaiser N, Badghaish H, Shaikh SF, Hussain MM. Flexible nanoporous template for the design and development of reusable anti-COVID-19 hydrophobic face masks. *ACS Nano* 2020, 14 (6), 7659–7665.
22. WANG, Na, et al. Electret nanofibrous membrane with enhanced filtration performance and wearing comfortability for face mask. *Journal of colloid and interface science*, 2018, 530: 695–703.
23. Armenrano I, Barbanera M, Carota E, Crognale S, Marconi M, Rossi S, Rubino G, Scungio M, Taborri J, Calabro G. Polymer materials for respiratory protection: processing, end use, and Testing Methods. *ACS Appl. Polym. Mater* 2021; 3 (2): 531–548.
24. Stefens B. Evaluating the sensitivity of the mass-based particle removal calculations for HVAC filters in ISO 16890 to assumptions for aerosol distributions. *Atmosphere* 2018; 9:85.
25. Zhu M, Xiong R, Huang C. Bio-based and photocrosslinked electrospun antibacterial nanofibrous membranes for air filtration. *Carbohydr Polym.* 2019 Feb 1;205:55-62.
26. Junter, G.-A.; Lebrun, L. Cellulose-Based Virus-Retentive Filters: A Review. *Rev. Environ. Sci. Bio/Technol.* 2017, 16 (3), 455–489.
27. Bortolassi AC, Guerra VG, Aguiar ML, Soussan L, Cornu D, Miele P, Bechelany M. Composites Based on Nanoparticle and PAN Electrospun Nanofiber Membranes for Air Filtration and Bacterial Removal. *Nanomaterials (Basel).* 2019 Dec 6;9(12):1740. doi: 10.3390/nano9121740
28. Li, Y.; Yin, X.; Si, Y.; Yu, J.; Ding, B. All-Polymer Hybrid Electret Fibers for High-Efficiency and Low-Resistance Filter Media. *Chem. Eng. J.* 2020, 398, 125626.
29. Larsen SG, Cheng Y, Daemen LL, Lamichhane NT, Hensley KD, Hong K et al. Polymer, Additives, and Processing Effects on N95 Filter Performance. *ACS Appl. Polym. Mater.* 2021, 3, 2, 1022–1031.
30. Barhoum A, et al. Nanofibers as new-generation materials: From spinning and nano-spinning fabrication techniques to emerging applications. *Applied Materials Today*, 2019, 17: 1-35.
31. Noushini A, Samali B, Vessalas Ki. Effect of polyvinyl alcohol (PVA) fibre on dynamic and material properties of fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 2013, 49: 374-383.
32. Lv D, Zhu M, Jiang Z, Jiang S, Zhang Q, Xiong R, Huang C. Green electrospun nanofibers and their application in air filtration. *Macromol. Mater. Eng.* 2018, 303, 1800336.
33. Rosic R, Kocbek P, Pelipenko J, Kristl J, Baumgartner S. Nanofibers and their biomedical use. *Acta Pharm* 2013; 63: Issue: 3, 295-304.
34. Pelipenko J, Kocbek J, Kristl J. Critical attributes of nanofibers: Preparation, drug loading, and tissue regeneration. *Int J Pharm*, 2015; 484: 57–74.
35. Janković B, Pelipenko J, Škarabot M, Mušević I, Kristl J. The design trend in tissue-engineering scaffolds based on nanomechanical properties of individual electrospun nanofibers. *Int J Pharm* 2013; 455 (1–2), 338-347.
36. Singh KV, Ravi KS, Sun W, Tan CS. Transparent nanofibrous mesh self-assembled from molecular LEGOs for high efficiency air filtration with new functionalities. *Small* 2016, DOI: 10.1002/sml.201601924
37. Jiajia, et al. Electrospun nanofibers: new concepts, materials, and applications. *Accounts of chemical research*, 2017, 50.8: 1976-1987.
38. Zhou J, Hu Z, Zabihi F, Chen Z, Zhu M. Progress and perspective of antiviral protective material. *Advanced Fiber Materials*, 2020, 2 (3), 123–139. <https://doi.org/10.1007/s42765-020-00047-7>
39. Zhua M, Huaa D, Zhongc M, Zhanga L, Wanga F, Gaod B, et al. Antibacterial and Effective Air Filtration Membranes by “Green” Electrospinning and Citric Acid Crosslinking. *Colloid and Interface Science Communications* 2018; 23 (3): 52-58.
40. Wang B, Wang Q, Wang Y, Di J, Miao S, Yu J. Flexible multifunctional porous nanofibrous membranes for high-efficiency air filtration. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2019, 11, 43409–43415.
41. Zhou J, Hu Z, Zabihi F, Chen Z, Zhu M. Progress and perspective of antiviral protective material. *Advanced Fiber Materials*, 2020, 2 (3), 123–139.
42. Chen R, Gan Z, et al. Thermoplastic Polyurethane Nanofiber Membrane Based Air Filters for Efficient Removal of Ultrafine Particulate Matter PM0.1. *ACS Appl. Nano Mater.* 2021, 4 (1), 182–189.