

Intenzitet izmene vazduha kao jedini pokazatelj efektivnosti sistema za distribuciju vazduha u cilju smanjivanja vazduhom izazvanog prenosa zaraznih bolesti putem kašlja u prostoriji sa plafonskom mešajućom ventilacijom: studija slučaja

Adequacy of air change rate as the sole indicator of an air distribution system's effectiveness to mitigate airborne infectious disease transmission caused by a cough release in the room with overhead mixing ventilation: a case study

Jovan PANTELIĆ, School of Public Health, University of Maryland, College Park, MD, USA i Kwok Wai THAM*, Department of Building, National University of Singapore, Singapore

Ključne reči:
unutrašnja sredina;
infekcija;
protok vazduha

U unutrašnjim sredinama sa značajnim rizikom od prenošenja zaraznih bolesti vazduhom, broj izmena vazduha u prostoriji se obično koristi kao jedini pokazatelj performansi rada sistema za dovod vazduha. Ako se pretpostavi da je unutrašnja sredina homogena sa stanovišta zagađivača, inditaktor broja izmena vazduha ukazuje na to da će povećanje protoka ubacnog vazduha proporcionalno smanjiti rizik prenošenja zaraznih bolesti vazduhom. Rezultati dobijeni iz nedavnih studija o širenju infektivnih vazduhom prenosivih čestica kašlja koje su sprovedene u komori za ispitivanje uslova sredine (FEC – field environmental chamber) na Nacionalnom univerzitetu u Singapuru, ukazuju da povećanje protoka ubacnog vazduha može izazvati povećanje rizika za prenošenje zaraze vazduhom za nekoliko položaja osobe koja kašlje i osetljive osobe u odnosu na rešetke za dovodni i odvodni vazduh. Metoda merenja brzine fotogramom čestica korišćena je za ispitivanje polja vazdušnog strujanja, a brojač čestica u vazduhu Grimm 1.108 korišćen je za merenje koncentracije kapljica u FEC komori. Rezultati te studije ukazuju da lokalno vazdušno strujanje predstavlja važan faktor koji utiče na raspršivanje čestica kašlja i na koncentraciju virusa koja može da se unese u pluća udisanjem tog vazduha. Pokazano je da povećanje protoka ubacnog vazduha može da dovede do povećanja koncentracije virusa u zoni disanja, koje se disanjem može uneti u pluća. To podrazumeva da broj izmena vazduha ne bi trebalo koristiti kao jedini pokazatelj efikasnosti sistema za dovod vazduha da smanji koncentraciju virusa u zoni disanja.

Key words:
indoor environment;
infection;
air flow

In indoor environments where airborne infectious disease transmission is of concern, air change rate is conventionally used as the sole indicator of air delivery system performance. This indicator, based on the total volume dilution reasoning, suggests that increase of the supply flow rate will reduce risk of airborne infectious disease transmission. Results obtained from recent studies on cough release conducted in the field environmental chamber (FEC) at the National University of Singapore indicate that increase of supply flow rate may cause increase in the airborne infection risk transmission for several positions of the cough source and the susceptible person in relation to the supply and return air grills. Particle image velocimetry (PIV) was used for airflow field investigation, while a Grimm 1.108 aerosol counter was used to measure droplet concentration in the FEC. Results from this study imply that a local airflow pattern is an important factor influencing dispersion of cough droplets and consequential exposure. It is demonstrated that increase in supply flow rate can lead to an increase in exposure under certain circumstances. This further implies that air change rate should not be used as the sole indicator of the air delivery system's ability to reduce exposure to airborne infectious droplets.

Uvod

Zarazne bolesti se mogu širiti kontaktom, kapljicama i vazduhom. Da bi se prenele vazduhom, male čestice koje u sebi sadrže virus (aerosoli) moraju da lebde u vazduhu i da ih osetljiva lica u prostoriji udahnu. U unutrašnjoj sredini bolesne osobe predstavljaju izvore zaraznih čestica koje one

oslobađaju prilikom različitih respiratornih aktivnosti (disanje, pričanje, kašljanje i kihanje). To je vrlo značajan problem u bolnicama, gde se bolesnici leče, i u kancelarijama sa velikom gustinom zaposlenih. Primena neinženjerskih kontrolnih strategija nije dovoljna da se zaustavi širenje bolesti (Chen i Liao 2008; Cheng i Liao 2013), jer njihovu efektivnost smanjuje vremenski razmak između trenutka kada osoba postane infektivna i vremena kada pokaže kliničke simptome (Fraser i dr. 2004). Korišćenje lične zaštite pred-

* Autor: bdgtkw@nus.edu.sg

stavlja poslednje sredstvo kada se koriste ostale strategije zaštite (Levy i dr. 2005). To znači da inženjerske zaštitne strategije, kao što su smanjenje koncentracije putem ventilacije (Bolashikov i Melikov 2009), filtriranje u sistemu za klimatizaciju (Kowalski i dr. 1999) i pokretni filteri (Zuraimi i dr. 2011), ultraljubičasto germicidno zračenje (UVGI; First i dr. 1999), treba primeniti paralelno sa neinženjerskim metodama.

Slika strujnog toka vazduha predstavlja jedan od najvažnijih faktora koji utiču na prenošenje infekcije vazduhom (Morawska 2006; Tang i dr. 2006; Li i dr. 2007). Sliku strujnog toka vazduha, odnosno strujnica vazduha u unutrašnjoj sredini generišu ventilacioni sistem, kretanje ljudi i pokretanja vrata (Eames i dr. 2009; Tang i dr. 2013). Ventilacioni sistemi mogu da kontrolišu sliku strujnog toka i zato oni predstavljaju glavnu inženjersku metodu kojom se kontroliše širenje patogenih organizama u bolnici (Streifel 1999; Kaushal i dr. 2004; Beggs i dr. 2008) a i drugim sredinama (Li i dr. 2007). Razni propisi, standardi i smernice definišu dizajn sredina sa mehaničkom ventilacijom. Oni koji se primenjuju na poslovne objekte (npr. ASHRAE 2007) obično definišu zahteve ventilacije u pogledu količine ubacnog vazduha po osobi koja boravi u toj sredini. Što se tiče zdravstvenih ustanova, smernice američkog Centra za kontrolu prevenciju bolesti (CDC) i Savetodavne komisije za kontrolu širenja zaraze u zdravstvenim objektima (HICPAC) (2003) za kontrolu zaraze u sredinama u zdravstvenim ustanovama preporučuju sledeće mere koje se primenjuju u prostorijama za izolaciju osoba zaraženih infektivnim bolestima koje se prenosi vazduhom: održavanje stalnog negativnog pritiska i obezbeđivanje ventilacije kako bi se osiguralo $\geq 12 \text{ h}^{-1}$ izmena vazduha na sat za renovirane i nove prostorije, $\geq 6 \text{ h}^{-1}$ za postojeće prostorije.

U nekoliko studija (npr. Qian i dr. 2006; Nielsen i dr. 2010; Qian i L., 2010) u kojima se gasni marker koristi kao zamenja za izdahnuće viruse rezultati pokazuju da se povećanjem protoka ubacnog vazduha smanjuje verovatnoća da se infekcija prenese na osobe koje borave u prostoriji. Rezultati iz tih studija potvrđuju da su specifikacije date u smernicama (npr. sobe za izolaciju) zasnovane na broju izmena vazduha, jer se povećanjem broja izmena vazduha smanjuje rizik od prenošenja zarazne bolesti vazduhom tako što se smanjuje koncentracija patogena u vazduhu. U studiji o bolničkim prostorijama autori Bolashikov i dr. (2012) navode da je u jednom od ispitanih scenarija, nasuprot očekivanjima, najveća koncentracija (PCL) iskašljanog CO_2 pri 12 h^{-1} bila mnogo viša u odnosu na vršnu koncentraciju pri 6 h^{-1} i 3 h^{-1} . U istoj studiji Bolashikov i dr. (2012) naveli su da kada je kašljanje usmereno nagore, najviša koncentracija CO_2 u zoni iz koje se udiše vazduh izmerena je pri 12 h^{-1} . Popio-Lek i dr. (2012) su uporedili najviši CO_2 PCL proizveden kašljem i uočili da 6 h^{-1} proizvodi viši PCL nego 3 h^{-1} kada je bila primenjena potisna ventilacija. Bolashikov i Melikov (2011) su pokazali da u slučaju disanja za poseban položaji izvora (inficirana osoba) i primaoca (prijemčiva osoba), povećanje protoka dovodnog vazduha sa 3 h^{-1} na 6 h^{-1} može da povećati koncentraciju zaraznih čestica zbog složenih interakcija strujanja u toj sredini.

Pored studija sa gasnim markerom (ispitnim gasom), mogućnost prenošenja zaraznih bolesti vazdušnim putem ispitivana je i primenom metoda višefaznog toka. Raspršivanje putem vazdušnih strujnica je važnije od raspršivanja kapljica kašlja turbulentnom disperzijom sa početnom veličinom (d_0) $d_0 \leq 45 \mu\text{m}$ (Chao i Wan, 2006). Promene slike strujnog toka usled promene ukupne isporučene zapremine vazduha izazvane uvođenjem personalizovane ventilacije u zoni disanja korisnika smanjila je izlaganje kapljicama kašlja horizontalno oslobođenih od izvora prema prijemniku (Pantelic i dr. 2009), ili izloženost izdahnutom vazduhu (Cermak i Melikov 2007). Pokazano je da varijacije distance između osobe koja

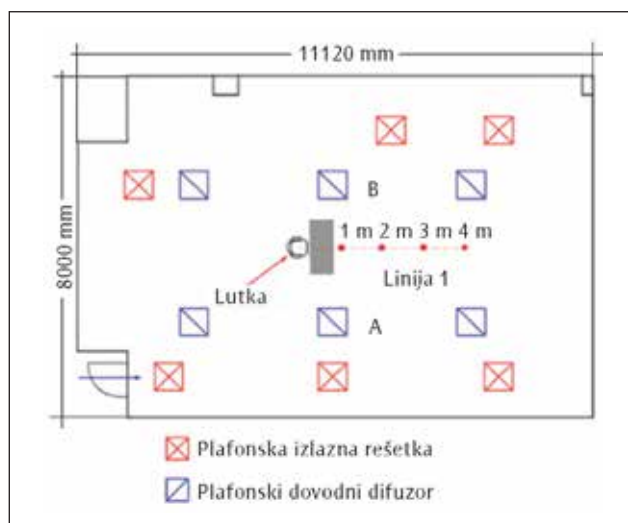
kašlje i mesta na kojem se odvodi vazduh iz prostorije imaju značajan uticaj na oblike raspršivanja (Wan i Chao 2007) u prostoru u kojem se vazduh odvodi rešetkama na plafonu. U prostoriji sa plafonskim difuzorima, na vertikalno mešanje kapljica nije uticalo povećanje broja izmena vazduha sa 6 h^{-1} na $11,6 \text{ h}^{-1}$ za kapljice sa d_0 između $1,5 \mu\text{m}$ i $12 \mu\text{m}$, a izmereno je veće taloženje kapljica sa d_0 između $28 \mu\text{m}$ i $45 \mu\text{m}$ (Chao i dr. 2008). Ti nalazi se slažu sa računskim rezultatima koje su dali Chen i Zhao (2010) da raspršivanje kapljica sa d_0 u rasponu od $0,1 \mu\text{m}$ do $200 \mu\text{m}$ u velikoj meri zavisi od strujnica vazduha i početne brzine izdisaja. Eames i dr. (2009) su ukazali da je važno razumeti uticaj broja izmene vazduha, ali i turbulencije u sistemima mehaničke i prirodne ventilacije i njihov uticaj na transport kontaminanata. Ti rezultati ističu da raspršivanje izdahnutih kapljica zavisi od slike lokalnog vazdušnog strujanja u unutrašnjoj sredini.

Smernice za projektovanje komercijalnih zgrada i zdravstvenih ustanova (npr. ASHRAE 2007, CDC i HICPAC 2003) definišu dovod vazduha u pogledu minimalne ili preporučene količine – broja izmena vazduha na sat. One podrazumevaju da će povećanje protoka ubacnog vazduha dovesti do smanjenja prenosa zaraze vazduhom. Dok neke prethodne studije potvrđuju tačnost tog pristupa, nekoliko novijih studija o sredini u zdravstvenim ustanovama navode da u nekim slučajevima povećanje intenziteta izmene vazduha može dovesti do povećanja izloženosti.

Cilj ovog rada je da ispita interakciju između vazdušnih strujnica u prostoriji i širenja zaraze putem kapljica kašlja u simuliranoj kancelarijskoj sredini sa plafonskim difuzorima. Ispituje se korisnost broja izmena vazduha kao jedinog pokazatelja efikasnosti rada sistema za distribuciju vazduha sa stanovista prenošenja zaraznih bolesti vazduhom u unutrašnjoj sredini. Kašalj je odabran kao respiratorna aktivnost koju treba istražiti, jer može proizvesti najveći broj kapljica (Duguid 1946; Chao i sur. 2009) i jedan je od najvažnijih mehanizama za širenje onečišćenih čestica iz zraka u zatvorenom prostoru (Morawska 2006).

Metod

U ovoj studiji eksperiment je odrađen u komori za simulaciju uslova sredine (FEC) dimenzija $11,12 \times 8 \times 2,6 \text{ m}$ (slika 1). Specijalna jedinica za obradu vazduha je do komore dovodila kombinaciju recirkulisanog i spoljašnjeg vazduha. Metoda raspadanja gasnog markera (Etheridge i Sandberg 1996) korišćena je za merenje ukupno, ventilaciju, i intenzitet curenja vazduha u komori.



Slika 1. Eksperimentalna komora i mesta na kojima se oslobađaju kapljice kašlja

SF₆ je korišćen kao gasni marker (ispitni gas). Cevi za uzimanje uzoraka su postavljene (a) na sredini komore 1,2 m od poda i (b) na dve odvodne rešetke postavljene na sredini komore FEC. Innova foto akustični infracrveni spektrometar (multigasni monitor, tip 1312) korišćen je za merenje koncentracije SF₆. Oslobođanje gasa SF₆ i merenje koncentracije ponovljeno je tri puta. Gas SF₆ je oslobođen u komori u različitim koncentracijama i oslobođanje je zaustavljeno nakon 2 minuta, kako bi se omogućilo da se gas SF₆ raspadne. Ispitivanje procenat curenja u komori koje su obavili Fadeyi i Tham (2009) pokazalo je da je stopu isticanja u komori FEC u velikoj meri moguće smanjiti zaptivanjem prozora, vrata, plafonskih i podnih pločica u komori i jedinici za obradu vazduha. Isti pristup je korišćen i u ovoj studiji i izmereno je da stopa isticanja iznosi 1,3 h⁻¹ kada se koristi ukupan broj izmena vazduha od 12 h⁻¹ i 0,7 h⁻¹, kada je ukupan broj izmena vazduha u komori FEC bio 6 h⁻¹. Za vreme eksperimenta prosečna temperatura vazduha u komori FEC bila je 23±0.5 °C. Sistem za regulaciju jedinice za obradu vazduha podešen je tako da održava relativnu vlažnost ispod 70%. Merjenja relativne vlažnosti tokom eksperimenata pokazuju da je prosečna relativna vlažnost iznosila 52±5%. Svetlo u komori FEC daje šest sijalica od po 10 W koje su postavljene na plafonu. Tri zida i pod su u kontaktu sa klimatizovanom unutrašnjom sredinom; jedan izolovani zid se graniči sa spoljašnjom sredinom i tavanica je izolovana i graniči se sa klimatizovanim prostorom ispod krova objekta. Taj raspored zidova koji gledaju na unutra i na spolja i svetiljke proizvode toplotno opterećenje od 2500 W. Temperatura vazduha sa brojem izmena vazduha od 6 h⁻¹ je za 5 °C bila niža od temperature vazduha u sobi, dok je temperatura vazduha sa brojem izmena vazduha 12 h⁻¹ bila niža od temperature vazduha u sobi za 2,5 °C. Vazduh je dovođen preko šest plafonskih perforiranih jednosmernih difuzora (nadole) (THB-200, Halton) i odvođen preko šest tavaničnih rešetki (slika 1). Difuzori i rešetke su postavljene u modularnoj spuštenoj tavanici (600×600 mm).

Termički maneken-lutka koja simulira disanje (BTM) i koja ima oblik ženske osobe visoke 1,68 m korišćena je za simulaciju osobe koja sedi u stolici za kancelarijskim stolom. Šake BTM-a se nalaze na radnoj površini stola. BTM je obučena u odeću koja odgovara vrednosti 0,7 clo (košulja kratkih rukava, pantalone, čarape i cipele), što predstavlja uobičajenu odeću koja se nosi u kancelarijama u tropskim predelima. Telo BTM-a se sastoji od 26 segmenata koji se zagrevaju i pojedinačno kontrolišu kako bi se održala temperatura površine jednaka temperaturi kože prosečnog čoveka. BTM je oslobađala otprilike 60 W osetne toplote koja podseća na toplotu koju oslobađa prosečna zdrava osoba u stanju termičke ugodnosti. Obrazac disanja u režimu laganog kancelarijskog rada simuliran je pomoću pulmonarne ventilacije sa zapreminom od 6 L/min (0,21 cu ft/min), sa 10 disajnih ciklusa u minutu, što je slično vrednosti koju su usvojili Zhu i dr. (2005). Ekvivalentan protok udisaja-izdisaja podešen je na 0,24 L/s. Izdisajni vazduh je zagrevan do temperature od 34 °C.

Mašina koja simulira kašalj napravljena je na Univerzitetu u Hongkongu, korišćena je za simulaciju višefaznog strujanja izdisajnih kapljica koje lebde u vazduhu i koje nastaju prilikom ljudskog kašlja. Raspodela inicijalnih veličina čestica koju navode Chao i dr. (2009) i brzina kašlja koju navode Zhu i dr. (2006) primenjeni su i na mašini za simulaciju kašlja. Na osnovu teorijskih razmatranja, Nicas i dr. (2005) su procenili da bi prečnik izdisajne kapljice brzo ispario do oko 50% od prvobitnog prečnika, što odgovara vrednosti od otprilike 10% prvobitne zapremine. Eksperimenti koje su obavili Holmgren i dr. (2011) potvrdili su to predviđanje. Da bi se valjano simuliralo smanjenje veličine izdisajnih kapljica od njihovih prvobitnih prečnika do prečnika jezgra kapljica, simulirana je izdisajna tečnost sa mešavinom vode (90%

ukupne zapremine) i glicerina (10% ukupne zapremine). Taj metod simulacije ljudske pljuvačke korišćen je u nekoliko ranijih studija (Chao i Wan 2006, Wan i Chao 2007, Chao i dr. 2008, Sze To i dr. 2009, Chao i dr. 2009, Pantelic i dr. 2009, Pantelic, Raphael i Tham 2012, Pantelic i Tham 2011). Mašina koja simulira ljudski kašalj korišćena u studiji nije imala nijedan grejni element i proizvedeno višefazno strujanje je imalo temperaturu od 23 °C (ravnoteža sa uslovima u prostoriji), što predstavlja ograničenje u ovoj studiji.

Tehnika merenja brzine fotogramom čestica (PIV) korišćena je za ispitivanje rezultujućeg polja brzine koje stvaraju interakcije kretanja vazduha između sistema za distribuciju vazduha i odavanje kašlja. Primenjena su dva različita pristupa za merenje ovih polja strujanja. Sistem PIV se sastojao od dvojnog lasera sa itrijum-aluminijum garnatom (YAG) dopiranim atomima neodimijuma, dvojnog impulsa 190 mJ (0.00018 Btu) sa frekvencijom od 15 Hz i talasnom dužinom od 532 nm, optike od laganog lima, sinhronizatora, CCD kamere (ZMP TSI Power View Plus) i računara. Analizirane su slike snimljene pomoću CCD kamere i izračunati su parametri polja strujanja pomoću Insight 3G softvera. Rekurzivna Nyquist-ova mreža koja je korišćena sa šemom kompenzacije centralne razlike, od grube veličine tačke od 64×64 piksela do male veličine tačke od 32×32 piksela. Tokom analize parova slika, manje od 3% vektora je odbačeno sa slike. Frekvencija lasera od 15 Hz bila je dosta iznad karakteristične frekvencije najvećih vrtloga (kovitlaca, vihora) koji su primećeni u različitim vrstama ventiliranih prostora (0.04–0.15 Hz), o kojima su pisali Hanzawa i dr. (1987). Laserski plašt debljine 1 mm proizveden je pomoću laserske optike CCD kamere koja je bila postavljena ortogonalno na taj plašt sa objektivom (sočivom).

Da bi se izmerilo polje vazdušnog strujanja koje stvara sistem za distribuciju vazduha, bilo je potrebno ubaciti čestice u vazдушnu struju. Te čestice reflektuju svetlo lasera u kameru i omogućavaju razlikovanje osvetljenih delova na slici, čije premeštanje na par slika čini osnovu za izračunavanje vektora brzine. Ubacivanje je postignuto raspršavanjem maslinovog ulja u raspršivaču TSI 9306 sa šest mlazeva sa izlaznim protokom od 16,6 L/min i srednjim prečnikom čestice od 0,35 μm i maksimalnim prečnikom čestice od 4 μm (Uputstvo za korišćenje Insight 3G Softvera iz 2009). Upotrebljene čestice imaju vreme odgovora reda od 10⁻⁷ -a (Hinds 1999) i podsećaju na čestice težnosti pod uslovima strujanja koje se odvija u komori FEC. Da bi se postiglo dobro mešanje čestica u dovodnoj struji, čestice maslinovog ulja su dodate vazdušnoj struji 2 m uzvodno od plafonskog ubacnog difuzora. Dve digitalne slike snimljene da bi proizvele vektorsko polje vazdušnog strujanja u prostoriji imale su vreme razdvajanja impulsa od 200 μs. Prostor svakog merenja iznosio je 250×150 mm. Usvojeno je pet stotina slika (što predstavlja 34 s stvarnog vremena) (nakon izvođenja testova sa 300, 400, 500, 600 i 700 slika) kako bi se izračunalo prosečno vektorsko polje.

Mašina koja simulira ljudski kašalj proizvela je višefazno strujanje koje se sastoji od vazduha i kapljica; zbog toga tokom ovih merenja nisu korišćene spoljne čestice. Budući da su kapljice kašlja reflektovale svetlo na CCD kameru, njihovi odgovarajući vektori brzine predstavljaju njihove interakcije sa unakrsnom strujom (objašnjeno kasnije u ovom članku) koju stvara sistem za distribuciju vazduha. Vreme razdvajanja impulsa za merenja kašlja iznosilo je 100 μs. To vreme razdvajanja impulsa su ranije koristili autori VanSiver i dr. (2011) i Chao i dr. (2009) u studiji ljudskog kašlja. Kapljice koje proizvodi mašina za simuliranje ljudskog kašlja reflektovale su više svetla na kameru, što je rezultiralo jasnim blještavim tačkama koje su korišćene za izračunavanje vektora brzine. To svojstvo je omogućilo da prostor merenja ima dimenzije 500×350 mm.

Spektrometar čestica (aerosola) Grimm 1.108 sa kanalima 16 veličina (merljiv opseg veličine 0,3–20 μm) korišćen je za merenje koncentracije aerosola u realnom vremenu u zoni udisanja BTM. Brzina uzorkovanja Grimm 1.108 iznosila je 1,2 L/min (0,042 cu ft/min). Frekvencija merenja od 1 Hz postignuta je aktiviranjem jednog po jednog kanala u osam veličina. Trideset sekundi pre nego što su oslobođene kapljice kašlja, izmerena je koncentracija aerosola u pozadini pomoću sonde za uzimanje uzoraka iz svih pravaca. Prosečna koncentracija pozadine je zatim oduzeta od koncentracije izmerene nakon oslobađanja kapljica kašlja. Budući da je polje brzine dobijeno metodom PIV pre merenja koncentracije aerosola, ta informacija je korišćena za odabir odgovarajuće izokinetičke sonde za uzorkovanje (Hinds 1999).

Ekperimentalni dizajn

Ekperimentalna postavka je napravljena tako da podseća na kancelarijsku sredinu sa dve osobe koje su okrenute jedna prema drugoj. Razdaljine između 1 m i 4 m izabrane su kako bi se proučavao rizik od prenošenja aerosola na osnovu smernica CDC i HICPAC (2003) za prenošenje zarazne bolesti, čime se navodi da se prenošenje aerosola u stvarnosti javlja na daljinama preko 1 m. Za vreme epidemije, jedna ili nekoliko osoba u prostoriji sa puno ljudi može da bude bolesno i da predstavlja izvor (izvore) zaraznih čestica. Od izdajskih aktivnosti osoba koje su zarazne, kašalj može da proizvede najveći broj kapljica. Oslobođene kapljice kašlja imaju početnu brzinu od oko 10 m/s. Oslobođanje kašlja u unutrašnjoj sredini slično je kretanju mlaza. Unakrsno strujanje proizvodi sistem za distribuciju vazduha. Sa varijacijom broja izmena vazduha, obrazac strujanja unakrsne struje se menja i te promene utiču na raspršivanje kapljica kašlja. To je posebno važno kada zaražena osoba kašlje direktno prema osetljivoj osobi u prostoriji, zbog toga što u tom slučaju postoji najveća izloženost zarazi. Eksperimenti su izvedeni sa dva broja izmena vazduha: 6 h^{-1} i 12 h^{-1} . Izloženost osetljive osobe u prostoriji koju je izazvao direktan kašalj ispitivana je na razdaljinama od 1, 2, 3 i 4 m, za kašalj koji je oslobođen 1,15 m visina sedećeg položaja od poda. Merenje koncentracije kapljica u zoni disanja izvršeno je pomoću Grimm 1.108 spektrometra. Koncentracija broja kapljica je merena u intervalima od po 1 s. Prosečan broj aerosola u prvih 30 sekundi pre ubrizgavanja kapljica uzet je kao osnovni nivo čestica, koji je kasnije oduzet od podataka o koncentraciji broja čestica koji su prikupljeni nakon ubrizgavanja kapljica kašlja. Svako merenje je trajalo 60 s, zbog toga što je na osnovu praćenja koncentracije aerosola u realnom vremenu utvrđeno da je 60 s dovoljno da se nivo koncentracije vrati na osnovni nivo u svim rmerodavnim scenarijima. Deset ponovljenih merenja je izvršeno na svakoj razdaljini i u analizi su korišćene njihove prosečne vrednosti. Procenjeno je da nesigurnost merenja izloženosti zarazi iznosi 13% (Pantelic 2010).

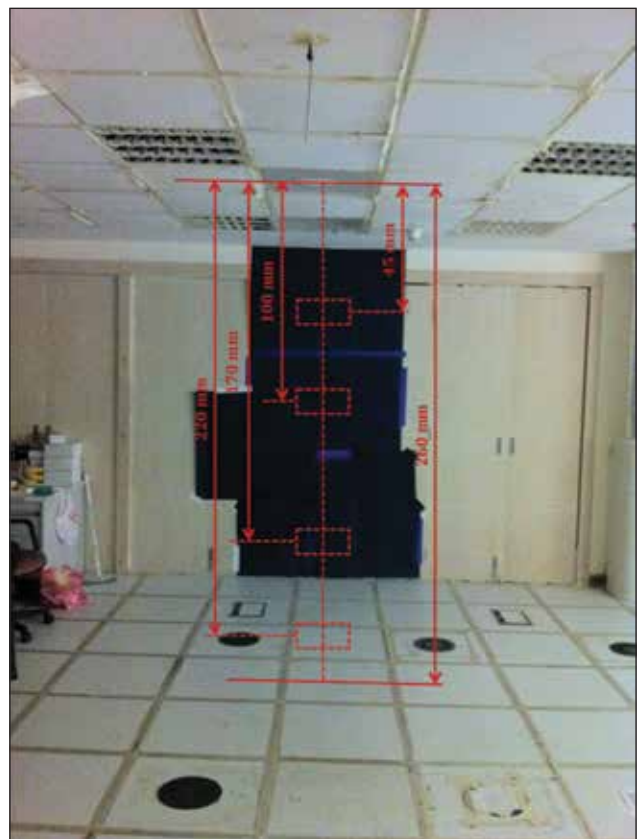
Rezultati

Vazdušne strujnice u eksperimentalnoj komori FEC koje stvara plafonski sistem za distribuciju vazduha dovodeći vazduh odgovarajući intenzitetu izmena od 6 h^{-1} i od 12 h^{-1}

Zone PIV-a merenja koje se nalaze ispod difuzora (označenog slovom "A" na slici 1) prikazane su na slici 2. Zone PIV-a merenja u poprečnom preseku između dva dovodna difuzora prikazana su na slici 3. Rezultati na slikama 4 i 5 dobijeni merenjem PIV-ijem pokazuju da se nakon ubacivanja kroz plafonski difuzor, vazduh kreće na dole prema podu. Kretanje vazduha na dole podseća na kretanje mlaza koji se oslobađa iz kvadratnog otvora. Za oba ispitana protoka ubacnog vazduha, nakon napuštanja difuzora (označenog slovom "A" na slici 1 i prikazanog na slici 2), vazduh se kreće nadole, slike 4(a)–(d) za 6 h^{-1} i slike 5(a)–(d) za 12 h^{-1} , dok njegova brzina opada sa rastojanjem od difuzora. Pri manjem protoku

ubacnog vazduha, kada vazdušna struja dođe do poda, slika 4(d) brzina vazduha značajno opada. Nakon dolaska do poda, vazdušna struja počinje da se kreće po podu vrlo malom brzinom. Vazduh koji napusti difuzor (označen slovom "B" na slici 1) postavljen simetrično na drugoj strani stola se slično ponaša, krećući se u smeru prema prvoj vazdušnoj struji i sudarajući se sa njom dok se kreće po podu. To sudaranje uzrokuje da se dve vazdušne struje pomešaju i stvaraju haotično polje brzine bez jasno definisanog pravca, slike 6(a) i 6(b).

Vazduh koji je pušten sa većim protokom održava veću brzinu pre nego što dospe do poda. Vazdušne struje se kreću slično kao i strujnice koje su nastale pri 6 h^{-1} izmena vazduha; međutim, zbog njihove veće sile, njihovu sudaranje stvara obrasce strujanja nagore, slike 7(a) i 7(b). To polje strujanja je znatno drugačije od onoga koje je uočeno pri manjem intenzitetu strujanja ubacnog vazduha. Vazdušno strujanje nagore koje se stvara u sredini komore nakon sudaranja simetričnih vazdušnih struja stupa u interakciju sa kapljicama kašlja. Budući da se strujanja dosta razlikuju, to znači da sila vazdušnog otpora koja deluje na kapljice kašlja ima različite intenzitete u svakom od slučajeva. Iako kancelarijski sto predstavlja prepreku koja bi mogla da deluje kao granica, i da se vazduh kreće duž njene ivice ili da zbog nje skrene, zapaženo je da je sto stajao na četiri noge koje su obezbeđivale podupirač za radnu površinu i da je predstavljao minimalnu prepreku za kretanje vazduha duž površine poda. To su potkrepila merenja vršena tokom preliminarnog ispitivanja kada sto nije stajao na sredini komore (rezultati nisu prikazani).



Slika 2. Poprečni presek komore FEC i mesta na kojima se nalaze zone merenja pomoću PIV-a. Difuzor je označen slovom "A" na slici 1

Kretanje kapljica kašlja odate od izvora u sedećem položaju direktno prema primaocu.

Slike 8 i 9 prikazuju kretanje po vremenskim sekvencama kapljica kašlja koje su iskašljane direktno prema osobi sa raz-

daljine od 2 m. Zbog prostornih ograničenja, prikazane su i analizirane samo slike dobijene za razdaljinu od 2 m. Usled različite količine svetla koje se reflektuje u kameru, razlike u koncentracijama su grubo ispitivane. Crvena boja na slici predstavlja zone sa najvećom refleksijom laserskog svetla koja predstavlja najveću koncentraciju kapljica u toj poprečnoj ravni. Zelena boja predstavlja srednju koncentraciju kapljica, dok svetloplave oblasti predstavljaju delove sa najmanjom koncentracijom kapljica. Tamnoplave oblasti predstavljaju delove gde kapljica nije bilo ili je njihova koncentracija bila suviše mala da bi proizvela odbijanje laserskog svetla koja se može detektovati. Slike predstavljene na taj način u daljem tekstu se pominju kao *pseudokolor slike*. Treba napomenuti da ukoliko uveličamo slike koje predstavljaju trenutke pre nego što su kapljice stigle do osobe, na slikama 8 i 9, može se videti da plava oblast, ispred lutke koja simulira čoveka, sadrži velike crvene tačke, koje ukazuju na to da su se velike kapljice kašlja kretale većom brzinom od manjih kapljica, zbog manjeg opadanja njihove pogonske sile (veći Stoksov broj, Stk) i da su stigle do zone disanja lutke ranije, ali u količini koja je nedovoljna da reflektuje značajnu količinu sveta. To ukazuje na to da na ponašanje oslobođenih kapljica kašlja ima značajan uticaj njihova veličina, što posledično doprinosi procesu izlaganja zarazi.

Te pseudokolor slike ukazuju na to da najveća koncentracija kapljica (prikazana crvenom bojom) tonu niže pri 6 h^{-1} nego pri 12 h^{-1} u trenutku koji je označen sa $t_0 = 0 \text{ s}$, slike 8(b) i 9(b).

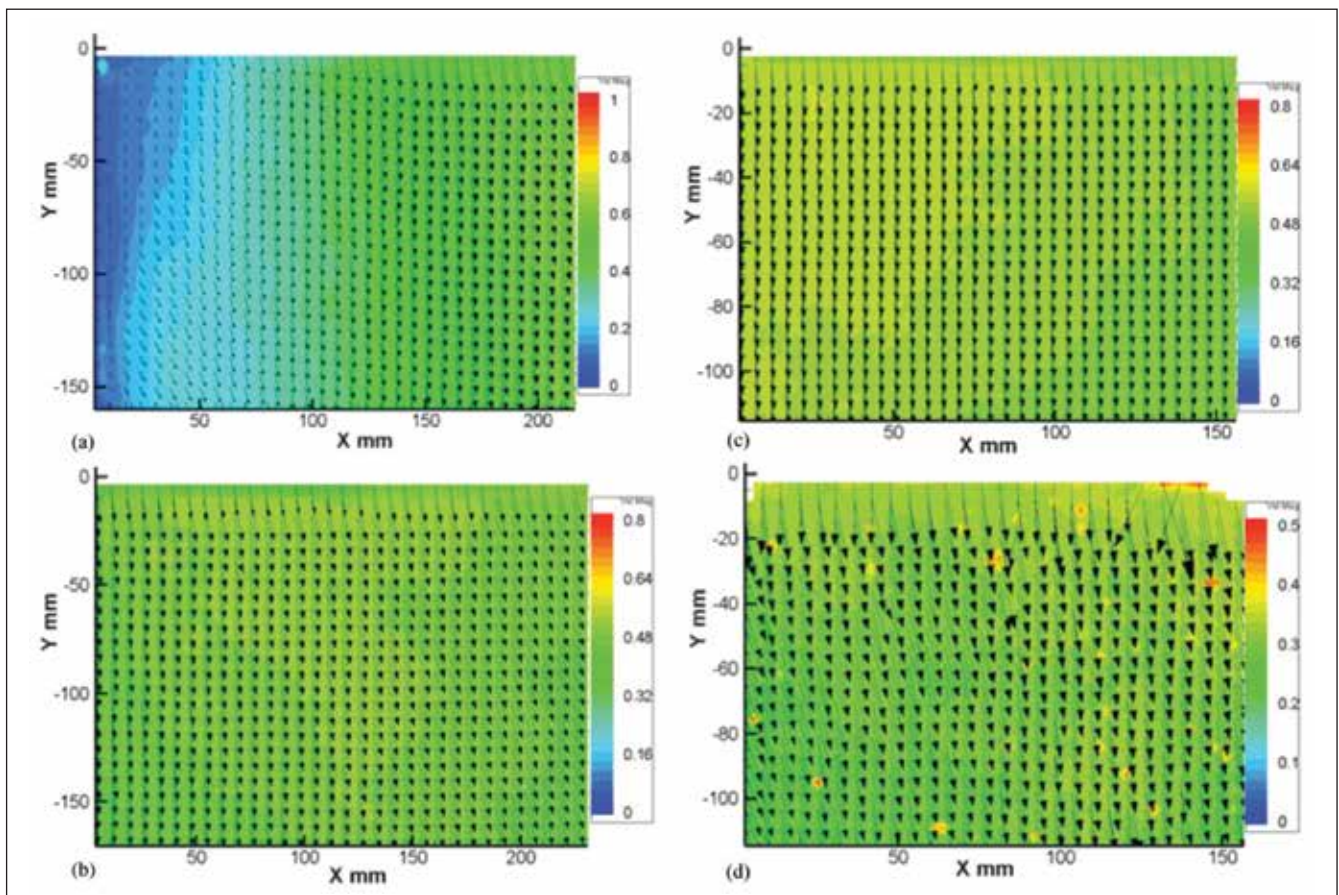
Primećeno je da prolaskom vremena koncentracija ispred lutke koja simulira čoveka uvek bude veća pri broju izmena vazduha od 12 h^{-1} u odnosu na 6 h^{-1} (Slike 8c-e i Slike 9c-e). Taj neočekivani rezultat se može objasniti vazдушnim

strujanjem nagore (objašnjenim u prethodnom odeljku) koji nastaje kada je protok ubacnog vazduha iznosio 12 h^{-1} . To strujanje vazduha nagore je održavalo kapljice na visini na kojoj su oslobođene, što je rezultovalo većoj koncentraciji u zoni disanja toplotne lutke. Dalje kvantifikacije su opisane u sledećem odeljku.

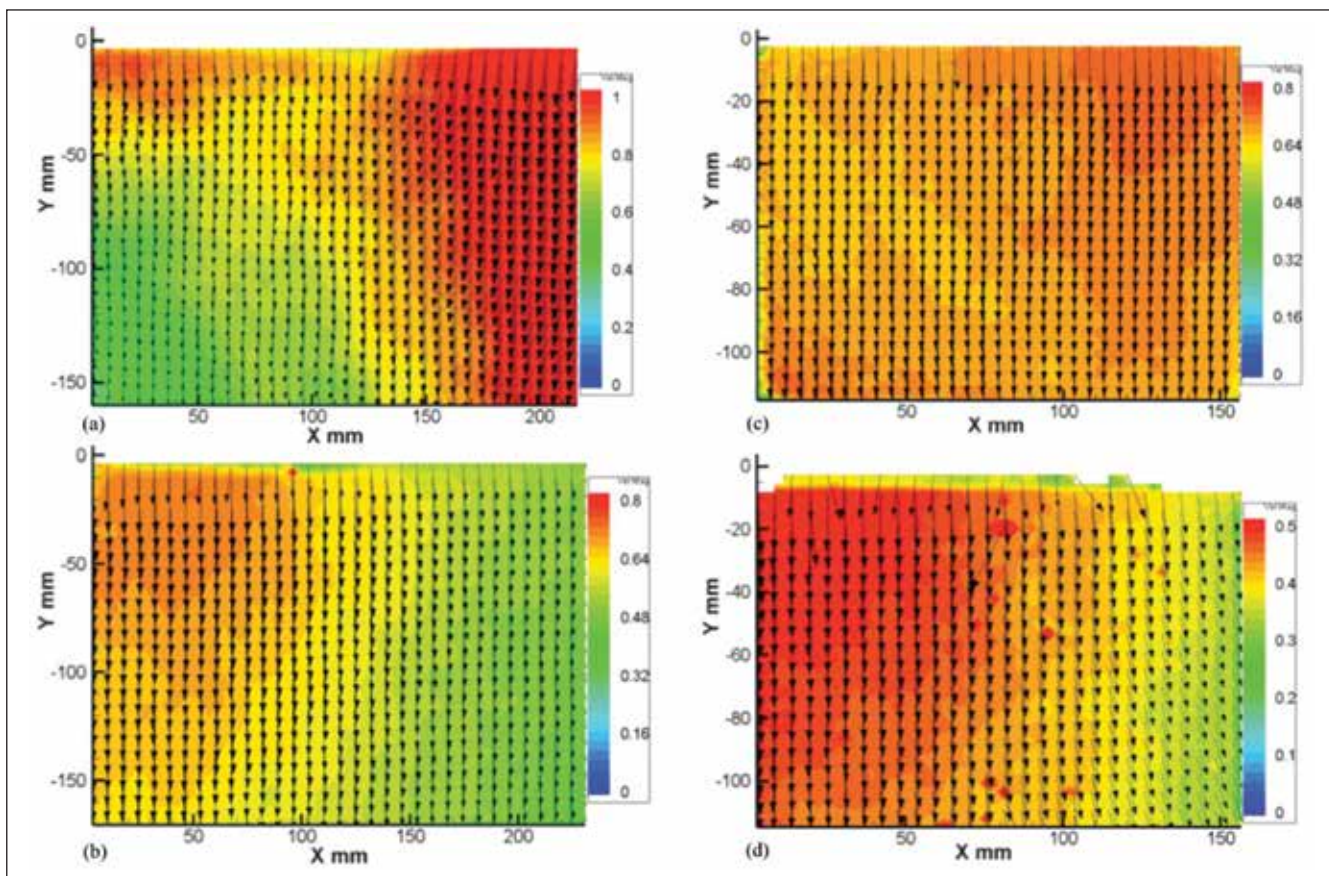


Slika 3. Zone merenja pomoću PIV-a u poprečnom preseku između dva dovodna difuzora (označenih slovima "A" i "B" na slici 1)

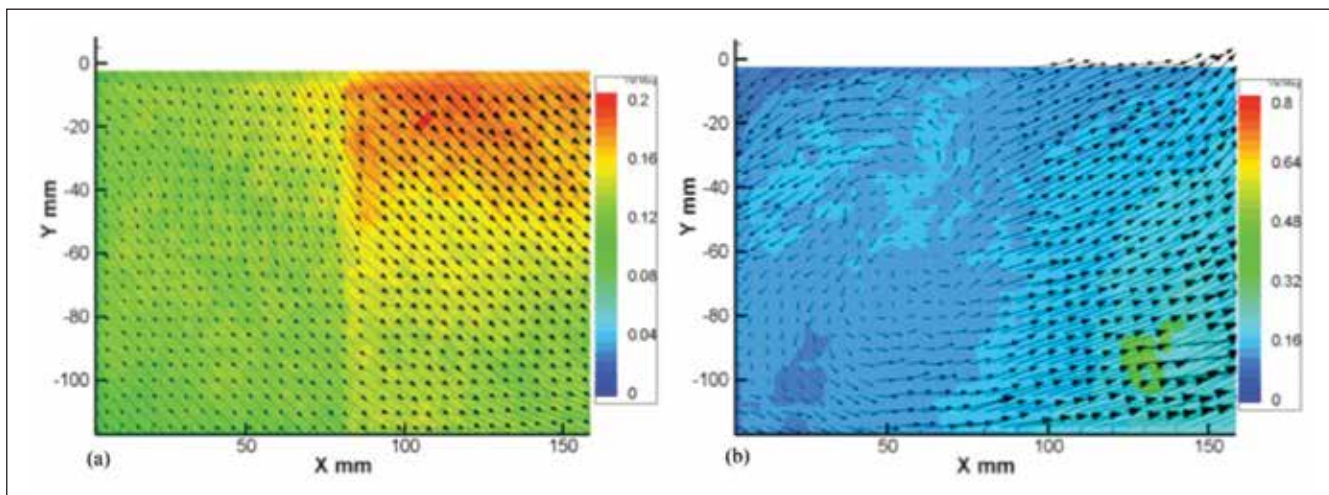
Vektori brzine kapljica prikazani su na slikama 10 i 11. Slike za 6 h^{-1} i 12 h^{-1} predstavljaju polja vektora u istoj tački u vremenu nakon što su oslobođene kapljice kašlja. Vide se tri različite faze u polju strujanja: (a) kada prve kapljice uđu u zonu disanja one raspršavaju konvektivni granični



Slika 4. Vektori prosečne brzine pri protoku ubacnog vazduha koji odgovara broju od šest izmena vazduha na sat na daljini od: (a) 45 cm, (b) 100 cm, (c) 170 cm i (d) 220 cm od plafona na lokaciji prikazanoj na slici 2



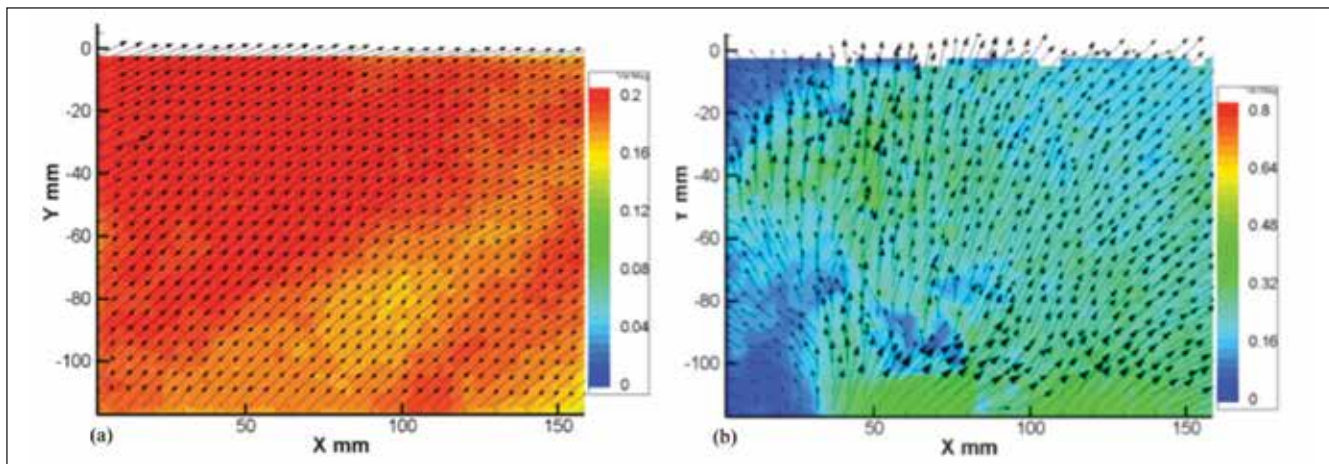
Slika 5. Vektori prosečne brzine pri protoku ubacnog vazduha koji odgovara broju od 12 izmena vazduha na daljini od: (a) 45 cm, (b) 100 cm, (c) 170 cm i (d) 220 cm od plafona na lokaciji prikazanoj na slici 2



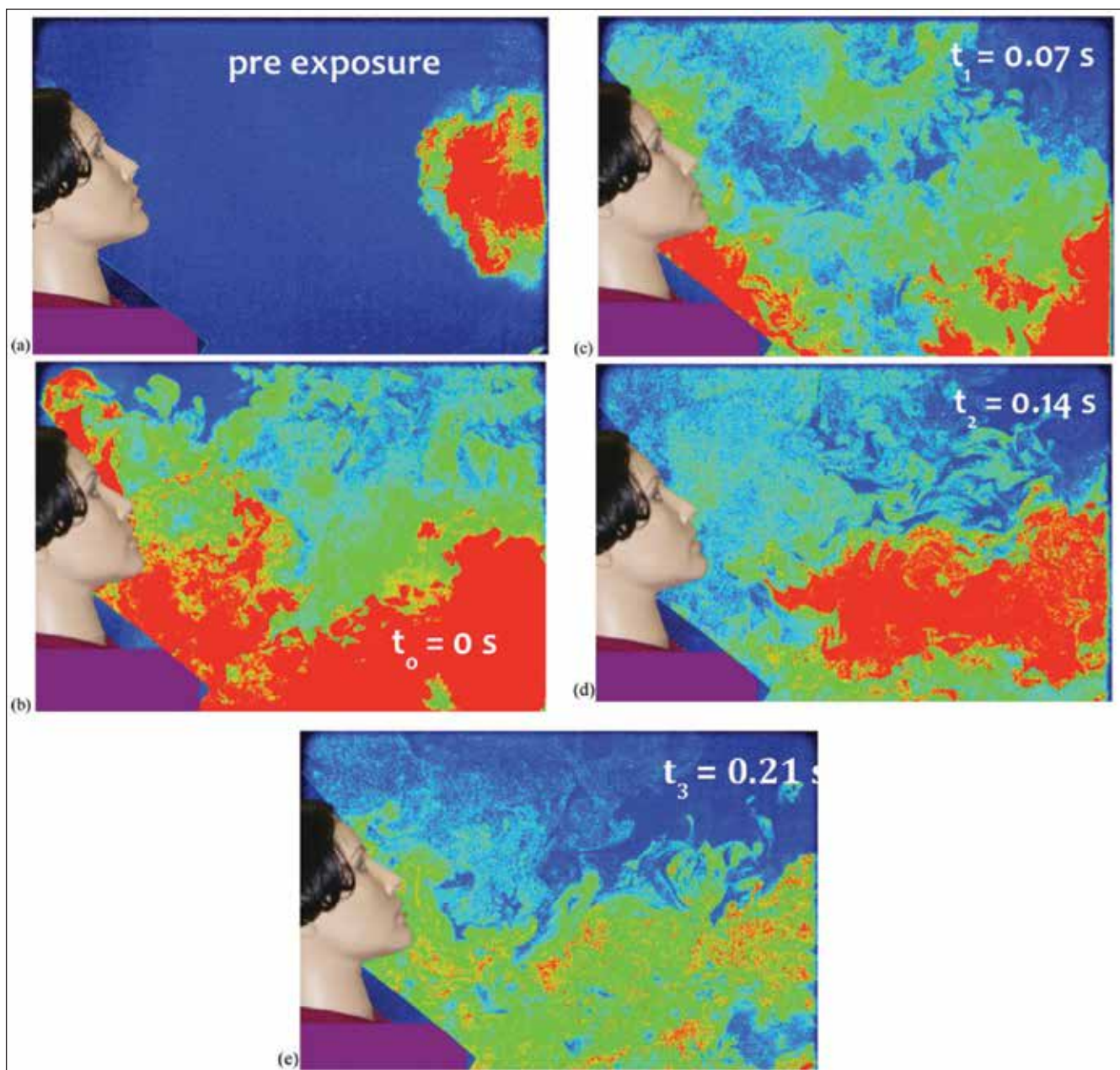
Slika 6. Vektori prosečne brzine pri protoku ubacnog vazduha koji odgovara broju od šest izmena vazduha na sat na udaljenosti od: (a) 170 cm i (b) 220 cm od plafona lokacije prikazane na slici 3

sloj (KGS) i ometaju polje strujanja koje stvara sistem za distribuciju vazduha; (b) ponovno uspostavljanje KGS-a; i (c) ponovno uspostavljanje strujanja u prostoriji koje je poremećeno kašljem. Kapljice se kreću u rasutom stanju i dospevaju do zone disanja simuliranog čoveka sa veličinama između 1 m/s i 1,8 m/s za 6 h^{-1} , Slika 10(b) i između 1 m/s i 1,3 m/s za 12 h^{-1} , Slika 11(b), tako da slabije unakrsno strujanje (sa manjom brzinom kao što je opisano u prethodnom odeljku) izaziva manje smanjenje početne brzine kapljica pre nego što te kapljice uđu u zonu disanja termičke lutke. To nije iznenađujuće, jer strujanje deluje sa manjom silom otpora na ka-

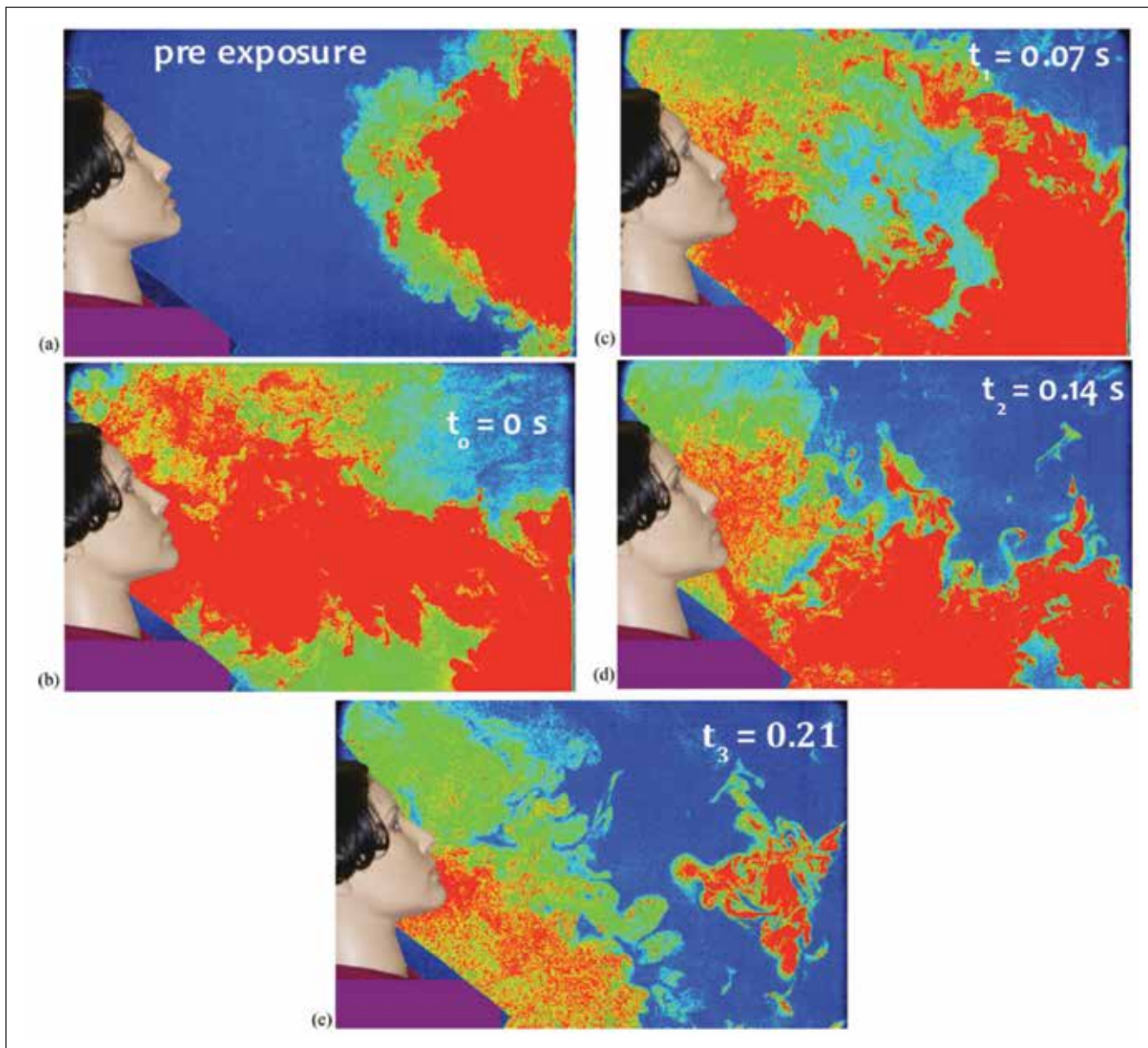
pljice. Kada se kapljice oslobode na udaljenosti od 2 m, one očuvaju dovoljnu pokretnu silu da oduvaju konvektivan granični sloj koji se stvara ispred zagrejanog tela termičke lutke. Kada se dovede vazduh koji odgovara broju 6 h^{-1} , CBL se ponovo uspostavlja za 0,56 s nakon što bude oduvan brzinom prema gore u rasponu 0,2–0,3 m/s. Kada se vazduh dovodi pri 12 h^{-1} , KGS se ponovo uspostavlja za 0,35 s sa brzinom nagore u rasponu 0,3–0,7 m/s (0,98–2,30 ft/s). To je verovatno izazvano povećanjem kretanja nagore usled strujanja nagore koje stvara distribucija vazduha nakon što su se njihove vazdušne struje sudarile duž poda i krenule nagore.



Slika 7. Vektori prosečne brzine pri protoku ubacnog vazduha koji iznosi 12 izmena vazduha na čas na udaljenosti od: (a) 170 cm i (b) 220 cm od plafona na lokaciji koja je prikazana na slici 3



Slika 8. Kretanje kapljica u mikro-okruženju BTM-a (simuliranog čoveka) pri šest izmena vazduha na sat predstavljeno pseudokolor slikom



Slika 9. Kretanje kapljica u mikrookruženju BTM-a (simuliranog čoveka) pri broju od 12 izmena vazduha na sat predstavljeno pseudokolor slikom

Strujanje u sobi ispred termičkes lukte koje stvara sistem za distribuciju vazduha ponovo se uspostavlja 0,8 s nakon što ga poremeti kašalj i 0,56 s kada se koristi 6 h^{-1} i 12 h^{-1} . Kada se uporede ta dva strujanja, ona ukazuju da je vreme zadržavanja kapljica u zoni disanja kraće kada se koristi 6 h^{-1} , zato što delovanje sile otpora na njega ima manji intenzitet. Kao posledica toga, oslobođene kapljice održavaju svoju pokretnu silu u većoj meri.

Izloženost kašlju direktno odatog iz izvora osjetljivoj osobi

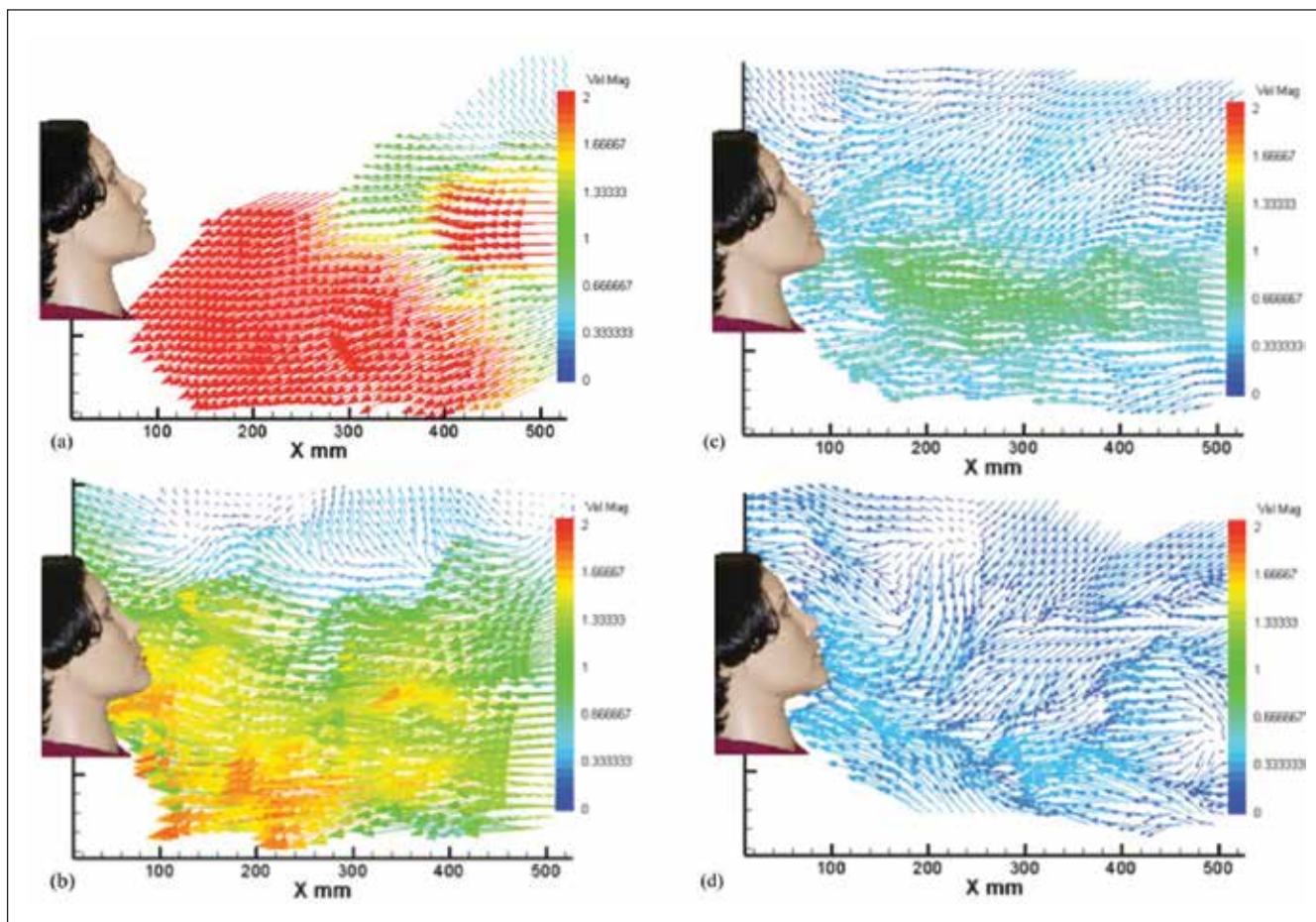
Slika 12 opisuje zapreminu kapljica sa veličinom jezgra između $0,4 \mu\text{m}$ i $10 \mu\text{m}$, koje su prisutne u zoni disanja. Za sve razdaljine ispitane u ovoj studiji, protok ubacnog vazduha koji odgovara broju izmena vazduha od 12 h^{-1} kao rezultat je dao veću izloženost kapljicama koje su oslobođene kašljem.

Taj rezultat nije intuitivan, već je, kada se uzmu u obzir podaci o unakrsnom strujanju u prostoriji koje pravi plafonska ventilacija mešanjem vazduha (Mixing Ventilation – MV), ta pojava povezana sa strujanjem nagore (slika 7) u sredini komore FEC pri većem protoku ubacnog vazduha. To takođe

potvrđuje i pseudokolor vizuelizacija kapljica kašlja na slikama 8 i 9.

Slika 13 pokazuje koncentracijski profil simulatora čoveka kao funkciju veličine kapljica. Izmereni prečnici jezgra kapljica su podešeni i prikazani kao poprečni prečnik kapljica na osnovu razmatranja o isparavanju autora Holmgren i dr. (2011) i Nicas i dr. (2005). Rezultati izloženosti za koje se zna veličina kapljica (slika 13) pokazuju da najveću izloženost zarazi stvaraju kapljice čija je veličina u rasponu između $3,2 \mu\text{m}$ i $4 \mu\text{m}$ pri 12 h^{-1} . Slika 13 ukazuje na to da je isti obrazac primećen za sve razdaljine ispitane u ovoj studiji. Stk se može koristiti kao pokazatelj ukoliko kapljice prate vazdušne struje i kreću se slično kao čestice tečnosti, ili ako na njihovo kretanje prvenstveno utiču pokretna sila i gravitacija (Hinds 1999). Vrednosti za Stk za oslobođene kapljice bile su između $1,72 \times 10^{-8}$ i $0,294 \times 10^{-3}$. Kritična vrednost Stk koja pokazuje da kapljice neće pratiti sliku strajanja vazduha je oko 0.1.

Prema tome, naši rezultati ukazuju na to da će kretanje kapljica u izmerenom opsegu veličina pratiti kretanje vazduha. Kapljice čije je početna veličina $20 \mu\text{m}$ ili manja, skoro mo-



Slika 10. Polje brzine kapljica u mikroklimi pri protoku ubacnog vazduha koji odgovara broju od šest izmena vazduha na sat: (a) pre izloženosti, (b) $t = 0$ s, (c) $t = 0,14$ s, (d) $t = 0,28$ s

mentalno isparavaju do prečnika jezgra kapljice od $10 \mu\text{m}$ ili manje (Morawska 2006), i mogu se taložiti u različitim delovima ljudskih pluća (Hinds 1999).

Diskusija

U nekoliko navedenih studija ukazano je da pravilno projektovana ventilacija igra važnu ulogu u kontroli širenja zaraznih bolesti koje se prenose vazduhom (Streifel 1999; Kaushal i dr. 2004; Beggs i dr. 2008; Pantelic i dr. 2009; Bolashikov i dr. 2012).

Ventilacioni sistemi ubacuju spoljašnji vazduh u unutrašnju sredinu i smanjuju koncentraciju zagađivača kako bi se postigao prihvatljiv kvalitet unutrašnjeg vazduha (IAQ; ASHRAE 2007). U kontekstu prenošenja zaraznih bolesti, time se predlaže razblaživanje kapljica koje prenose zarazu u ukupnoj zapremini sistema za distribuciju vazduha. Na osnovu pretpostavke o postojanju dobro pomešane sredine u sistema za distribuciju ukupne zapremine vazduha, koristeći razmatranja o masenom bilansu, može se pokazati da će se povećanjem protoka ubacnog vazduha smanjiti koncentracija u unutrašnjoj sredini i, kao rezultat toga, i izloženost zarazi osoba koje u toj sredini borave.

Rezultati iz ove studije pokazuju neočekivanu pojavu da se koncentracija kapljica kašlja može povećati sa povećanjem protoka ubacnog vazduha sa 6 na 12 izmena vazduha na sat. To znači da lokalno strujanje vazduha predstavlja ključni faktor koji reguliše koncentraciju kapljica koja se u nekim slučajevima poveća sa povećanjem broja izmena vazduha jer se mogu stvoriti strujnice vazduha koje povećavaju širenje zaraze. Taj rezultat je saglasan sa rezultatima autora Bolashikov i dr. (2012) i Popio-Lek i dr. (2012) koji pokazuju da usled složenosti interakcije strujanja, povećanje protoka ubacnog vazduha sa tri na šest izmena vazduha na sat može da dovede do povećanja koncentracije zagađivača vazduha. Druge studije o obrascima raspršivanja kapljica u prostoriji (Chao i Wan 2006, Wan i Chao 2007, Chao i dr. 2008, Chao i dr. 2009, Chen i Zhao 2010) kao zaključak daju da obrasci strujanja vazduha koje stvara sistem za distribuciju vazduha u prostoriji predstavljaju najvažniji faktor koji pokreće raspršivanje kapljica. Iako se nalazi ove studije odnose na specifičan slučaj (o čemu se razmatra u delu Ograničenja), rezultati ističu značaj uticaja lokalnog strujanja vazduha.

Smernice CDC i HICPAC (2003) za kontrolu širenja zaraze u zdravstvenim ustanovama, za sobe za izolaciju od zaraza koje se prenose vazduhom preporučuju da u tim prostorijama ne bude propuštanja vazduha, da se u njima održava negativan pritisak, da imaju minimalan dovod vazduha od 12 h^{-1} , i da se mesto za odvođenje vazduha nalazi daleko od mesta za uzimanje vazduha ili da se koristi HEPA filtriranje u slučaju recirkulacije vazduha.

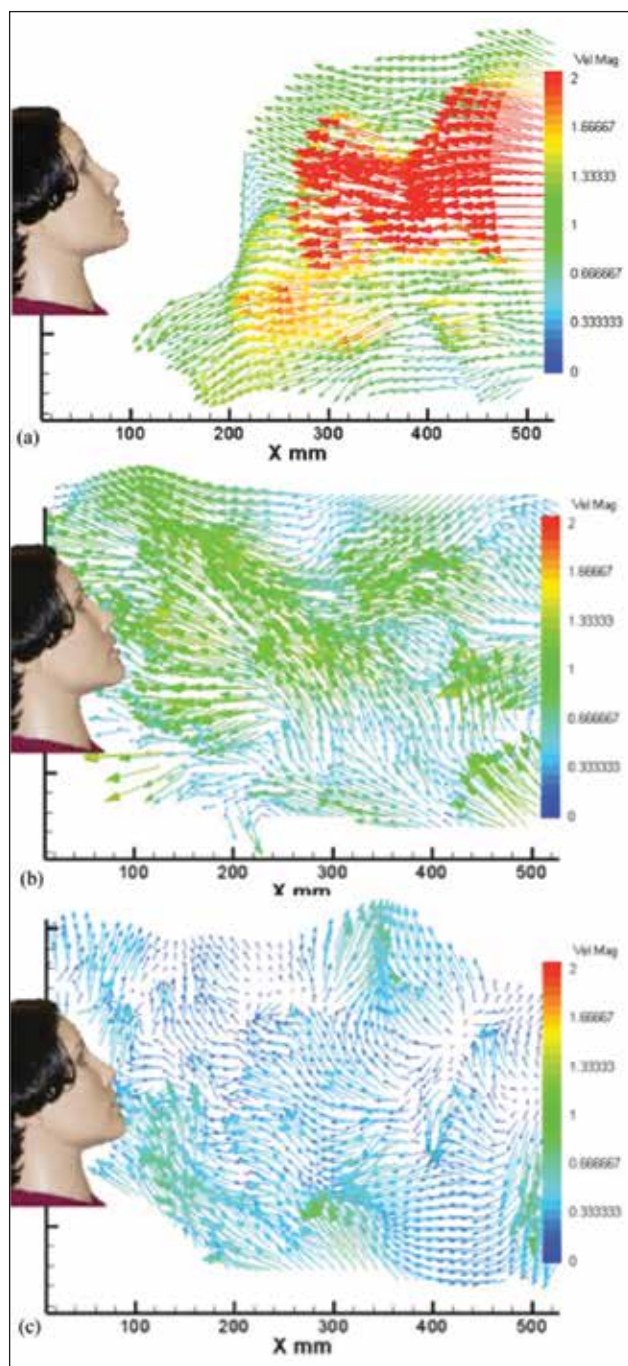
Iste smernice za bolničke sobe u kojima borave imukompromitovane osobe (sterilne sobe) (CDC 2003) preporučuju hermetičnost sobe, održavanje pozitivnog pritiska i minimalan dovod vazduha od 12 izmena vazduha na sat 12 h^{-1} . Što se tiče slike strujanja vazduha, te smernice preporučuju da se vazduh dovodi sa jedne strane prostorije, da se zatim kreće preko kreveta pacijenta pre odvođenja vazduha na drugoj strani sobe. ASHRAE Standard 62.1 (2007) preporučuje upotrebu intenziteta ventilacije (ventilation rate – VR) ili postupak kvaliteta unutrašnjeg vazduha (IAQ) za određi-

vanje minimalnog broja izmena vazduha za unutrašnju sredinu. Postupak VR predstavlja preskriptivan postupak koji određuje minimalan broj obnova vazduha (VR) prema vrsti prostora, stepenu boravka i površini i uzima u obzir kretanje vazduha koje stvaraju različiti sistemi za distribuciju vazduha, uključujući koncept efikasnosti distribucije zonskog vazduha (Ez)5. Postupak IAQ za kvalitet unutrašnjeg vazduha je projektna procedura koja zahteva da se utvrde izvori zagađivača i podese ciljne vrednosti koncentracije na osnovu prava prihvatljivosti koje osećaju lica koja borave u prostoru. Procedura za kvalitet unutrašnjeg vazduha uzima u obzir obrasce strujanja vazduha uključujući u proračun efikasnost izmena vazduha na osnovu masenog bilansa u stacionarnom (stabilnom) stanju i, gde se primenjuje, doprinos tehnologija za čišćenje vazduha zasnovane na istoj pretpostavci stacionarnog (stabilnog) stanja. Smernice CDC i HICPAC (2003) direktno definišu broj izmena vazduha u prostoru, dok postupci VR i IAQ (ASHRAE 2007) u suštini definišu protok ubacnog vazduha koji odgovara broju izmena vazduha na sat za konkretan unutrašnji prostor. Važno pitanje koje treba postaviti, na osnovu rezultata iz ove studije, jeste da li je odgovarajući broj izmena vazduha isključivi pokazatelj sistema za dovod vazduha u smanjivanju prenošenja bolesti koje se prenose vazduhom.

Rezultati iz ove studije i onih prethodnih ukazuju da faktori, kao što su broj izmena vazduha (Kao i Yang 2006), srtujnice vazduha (Chao i Wan 2006, Morawska 2006, Qian i dr. 2006, Tang i dr. 2006, Chao i dr. 2008, Chao i dr. 2009, Noakes i dr. 2009, Pantelic i dr. 2009, Tung i dr. 2009, Chen i Zhao 2010, Bolashikov i dr. 2012), i razlika pritiska (Decker 1995, Tung i dr. 2009) regulišu raspršivanje zagađivača koji se prenose vazduhom i, prema tome, uticu na rizik širenja zaraznih bolesti. Ti rezultati ukazuju na to da broj izmena vazduha ne može da se koristi kao jedini pokazatelj u proceni efikasnosti sistema za distribuciju vazduha u kontroli zaraznih bolesti koje se prenose vazduhom. U kontekstu uloge koju ventilacija igra u sprečavanju širenja zaraznih bolesti koje se prenose vazduhom, Li i dr. (2007) navode da specifikacija i kvantifikacija minimalnih ventilacionih zahteva za različite tipove unutrašnjih sredina treba da predstavlja prioritarno pitanje. Ta konstatacija je tačna pod pretpostavkom da je u sredini vazduh dobro izmešan, ali u sredinama sa složenijim strujanjem vazduha, naročito u onima gde se koriste napredni sistemi za dovod vazduha, ta pretpostavka ne bi bila odgovarajuća.

Rezultati iz ove studije ukazuju da u kontekstu kontrole prenošenja zaraze koja se prenosi vazduhom, sadašnje standarde treba dalje unaprediti. Postupak za kvalitet unutrašnjeg vazduha (IAQ) (ASHRAE 2007) podrazumeva da prvo treba utvrditi izvor i kvantifikovati snagu izvora. U slučaju širenja zaraznih bolesti u unutrašnjem prostoru, zaraženi ljudi predstavljaju izvor i kvantifikovane su brzine rasejavanja za virus grip (Milton i dr. 2013), ali nedostaju podaci za ostale bolesti koje se prenose vazduhom. Rezultati ove studije ukazuju na to da standardi treba da uzmu u obzir uticaj obrasca lokalnog strujanja vazduha i efikasnost dovoda spoljašnjeg vazduha u zonu disanja, a ne samo da definišu ukupnu količinu spoljašnjeg vazduha koju treba dovesti po jednoj osobi koja boravi u prostoriji ili broj izmena vazduha za određeni prostor. Iako naši rezultati podrazumevaju da obrasci lokalnog strujanja vazduha predstavljaju najvažniji faktor, potrebno je razmotriti dva problema. Prvi je kako se jasno definiše polje strujanja vazduha poželjno za kontrolu zaraze u procesu projektovanja. Drugi je kako kvantifikacijom postići projektovano polje vazdušnog strujanja u stvarnom unutrašnjem prostoru. Primena računске dinamike fluida (CFD) stekla je popularnost u istraživačkim studijama, ali pouzdanost predviđanja bez provere tj. validacije predstavlja jednu od slabih tačaka u njenom prihvatanju u procesu projektovanja (Sun i Zhang 2007). To se naročito odnosi na predviđanje kretanja aerosola u unutrašnjoj sredini. Zhang i dr. (2008), Zhao i dr.

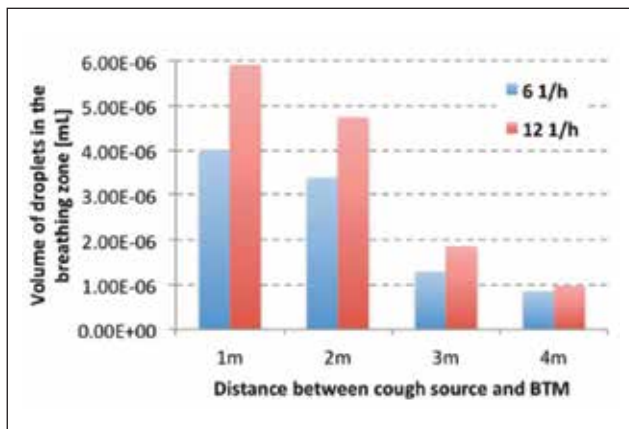
(2008), i Zhao i Guan (2007) su koristili CFD model za proučavanje prenosa čestica u različitim sredinama u kojima postoji visok stepen opasnosti po zdravlje. Neke primene (Sun i dr. 2007; Wan i Chao 2007) su bile usmerene na prenos i raspršivanje izdisajnih kapljica i jezgra kapljica u unutrašnjim sredinama, ali je potrebno više napora kako bi ovih modeli dostigli fazu u kojoj bi se smatrali standardnom alatkom za projektovanje i u kojoj bi bili obuhvaćeni standardima.



Slika 11. Polje brzine kapljica u mikroklimi pri protoku ubacnog vazduha koji odgovara broju od 12 izmena vazduha na sat: (a) pre izloženosti, (b) $t = 0$ s, (c) $t = 0.28$ s, (d) $t = 0.42$ s

Drugi problem ili izazov jeste potvrda ili validacija da je projektovano polje vazdušnog strujanja postignuto. Ako se tehnike merenja tačaka, kao što su anemometri sa toplom žicom, smatraju alatkom, one bi zahtevale veliki broj tačaka merenja da bi se kvantifikovalo polje strujanja. To bi bilo vrlo nepraktično; stoga bi praktičniji pristup bio da se merenje

tačke dopuni tehnikama vizuelizacije (uređaji za ispuštanje dima, ručni uređaji za pravljenje dima, mehuri, mikro-baloni i fluorescentne čestice) da bi se shvatili pravci strujanja u zapremini sobe, kao i veličina komponenta brzine (Sun i Zhang 2007). Globalne tehnike merenja, kao što su merenje brzine fotogramom čestica (PIV) i merenje brzine praćenjem putanje čestica (PTV), nisu pogodne za ovu primenu, ali su dobijeni neki perspektivni rezultati u oblasti kvantifikacije vazdušne struje velike zapremine primenom PTV-a (Sun i dr. 2005; Zhang i dr. 2005). Oba izazova ukazuju na to da je neophodan dalji razvoj računskih i mernih tehnika kako bi se one delotvorno primenjivale u standardima i smernicama.



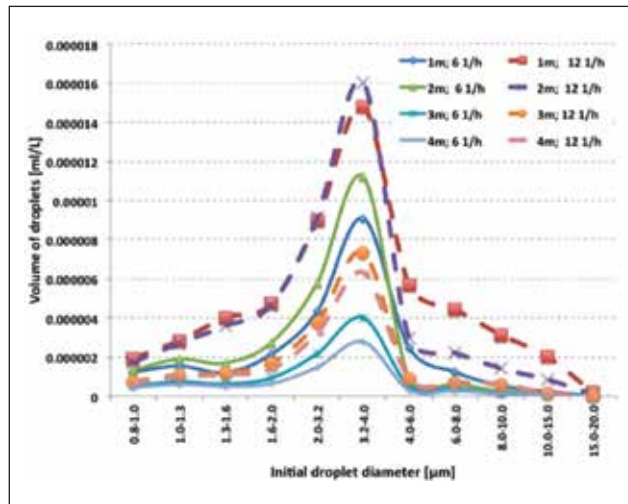
Slika 12. Zapremina (količina) kapljica u zoni disanja integrisana za sve veličine kapljica na raznim razdaljinama između izvora kašlja i BTM-a (simuliranog čoveka) i dva broja izmena vazduha

Još jedan problem koji je povezan sa povećanim protokom ubacnog vazduha jeste da veće mešanje vodi do većeg prostornog raspršavanja potencijalno zaraznih kapljica i to može dovesti do povećane izloženosti osetljivih pojedinaca, kao što su pokazali Sze To i dr. (2009). Bolashikov i dr. (2012) su pokazali da je u zavisnosti od pravca u kojem se kreću kapljice kašlja, veći broj izmena vazduha izazvao veću koncentraciju zagađivača u pozadini ispitivane unutrašnje sredine, što znači da će to izazvati veću izloženost zarazi svih pojedinaca koji borave u toj unutrašnjoj sredini. Oba ova moguća ishoda, izloženost zarazi većeg broja pojedinaca ili veća izloženost zarazi svih pojedinaca kada se koristi veći broj izmena vazduha, mogu da izazovu povećanje broja sekundarnih slučajeva koji nastaju od jednog izvora zaraze.

Da bi se kontrolisalo širenje zaraznih bolesti koje se prenoše vazduhom, mogu se paralelno primeniti i inženjerske i neinženjerske metode (Cheng i Liao 2013). Što se tiče neinženjerskih metoda, pokazalo se da kontrola izvora zaraze nošenjem hirurške maske predstavlja efikasnu meru koja je postigla četverostruko smanjenje jačine izvora (Milton i dr. 2013). Iako je ta metoda delotvorna, njena praktična ograničenost jeste blagovremena primena maske tokom infektivnog perioda bolesti. Pojedinaac koji je zaražen gripom može da rasejava čestice zaraze vazduhom pre nego što se kod njega ispolje simptomi gripa, naročito u slučaju izbijanja epidemije koja rezultira velikim brojem blagih slučajeva, kao što je bio slučaj sa izbijanjem epidemije gripa u SAD 2012. i 2013. godine (CDC 2013).

To znači da zaštitu lica koja borave u prostoru prvenstveno treba postići primenom inženjerskih metoda (ventilacija, ultraljubičasto germicidno zračenje u gornjem delu prostorije sa dodatnom kontrolom obrazca strujanja vazduha pomoću plafonskih ventilatora i dodatno filtriranje pomoću prenosivih filtera) koje nisu na isti način ograničene kao primena maski u pravom trenutku. Potrebno je koristiti napredne sisteme za dovod vazduha (Melikov 2004, Pantelic i dr. 2009;

Bolashikov i dr. 2012), zato što oni dovode čist i klimatizovan vazduh do zone disanja efikasnije od sistema sa ukupnom zapreminom. U slučaju kada se vazduh dovodi u vertikalnom pravcu od radne površine stola prema plafonu, on može da potisne neke od zaraznih kapljica koje se oslobađaju od izvora do gornjeg dela prostorije, odakle se može odvesti ili možda obraditi pomoću tehnologija za dezinfekciju.



Slika 13. Profili izloženosti u zapremini sa poznatim veličinama kapljica pri 6 h⁻¹ i 12 h⁻¹

Ograničenja

Nalazi ove studije su specifični za konkretan slučaj u odnosu na dva aspekta. Prvi je taj što su obrasci strujanja vazduha jedinstveni za ovu postavku. Ograničenja u eksperimentalnoj postavci i rezultati dobijeni u ovoj studiji obuhvataju: (a) perforirani panel tipa difuzora koji usmerava strujanje nadole, (b) protok ubacnog vazduha korišćen u studiji – 6 h⁻¹ i 12 h⁻¹, (c) raspored dovodnih i odvodnih terminala – za četvorosmerni difuzor, taj raspored može da izazove kratak spoj, ali ne za perforirani panel, mada taj raspored značajno utiče na linije strujanja vazduha, (d) geometrija prostorije, (e) odsustvo nameštaja i (f) odsustvo ljudskog kretanja. Drugi je taj što je od nekoliko mogućih izdajskih aktivnosti, koje se povezuju sa prenošenjem zaraznih bolesti vazduhom, u ovoj studiji ispitivan samo kašalj. Ova ograničenja znače da su rezultati dobijeni u ovoj studiji specifični za konkretan slučaj i da se ne mogu izvesti zaključci za druge sredine, ali da se mogu koristiti da ukažu na značaj obrasca lokalnog strujanja vazduha i na neke nedostatke i izazove koji su povezani sa sadašnjim trendovima.

Zaključak

Rezultati ove studije pokazuju da lokalno strujanje vazduha predstavlja važan faktor koji utiče na raspršivanje čestica koje mogu imati viruse u sebi i kao posledicu njihovog udisanja doprineti širenju zaraznih bolesti. U ovoj studiji je demonstrirano da povećanje protoka ubacnog vazduha može dovesti do povećanja izloženosti zarazi u nekim slučajevima. Rezultati iz ove studije ukazuju da lokalno vazdušno strujanje predstavlja važan faktor koji utiče na raspršivanje čestica kašlja i na koncentraciju virusa koja može da se unese u pluća udisanjem tog vazduha. Pokazano je da povećanje protoka ubacnog vazduha može da dovede do povećanja količine virusa prisutnih u zoni disanja koji mogu da se udahnu i unesu u pluća. To podrazumeva da broj izmena vazduha ne bi trebalo koristiti kao jedini pokazatelj efikasnosti sistema za dovod vazduha da smanji koncentraciju virusa u zoni disanja. To znači da broj izmena vazduha ne treba koristiti kao jedini pokazatelj mogućnosti sistema za dovod vazduha da smanji

izloženost ljudi zaraznim kapljicama koje se prenose vazduhom. Pretpostavku da je vazduh u prostoriji homogeno izmešan treba primeniti uz oprez kada se modelira prenošenje zaraznih bolesti vazduhom.

Literatura

- [1] *** ASHRAE. 2007. *ASHRAE/ANSI Standard 62.1, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*. Atlanta: ASHRAE.
- [2] **Beggs, C. B., K. G. Kerr, C. J. Noakes, E. A. Hathway, P. A. Sleigh**, 2008. The ventilation of multiple-bed hospital wards: Review and analysis. *American Journal of Infection Control* 36(4): 250–9.
- [3] **Bolashikov, Z. D., A. K. Melikov**, 2009. Methods for air cleaning and protection of building occupants from airborne pathogens. *Building and Environment* 44(7):1378–85.
- [4] **Bolashikov, Z. D., A. K. Melikov**, 2011. Exposure to exhaled air from a sick occupant in a two-bed hospital room with mixing ventilation: effect of distance from sick occupant and air change rate. *Proceeding of Indoor Air 2011, Austin, TX, USA*.
- [5] **Bolashikov, Z. D., A. K. Melikov, W. Kierat, Popio-Lek, Z., M. Brand**, 2012. Exposure of healthcare workers and occupants to coughed airborne pathogens in a double-bed hospital room with overhead mixing ventilation. *HVAC&R Research* 18:602–15.
- [6] *** Centers for Disease Control and Prevention. 2013. *FluView*. Atlanta, GA: Centers for Disease Control and Prevention.
- [7] *** Centers for Disease Control and Prevention; Healthcare Infection Control Practices Advisory Committee. (2003). *Guidelines for environmental infection control in health-care facilities*. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention.
- [8] **Cermak, R., A. K. Melikov**, 2007. Protection of occupants from exhaled infectious agents and floor material emissions in rooms with personalized and underfloor ventilation. *HVAC&R Research* 13:23–38.
- [9] **Chao, C. Y. H., M. P. Wan**, 2006. A study of the dispersion of expiratory aerosols in unidirectional downward and ceiling-return type airflows using a multiphase approach. *Indoor Air* 16(4):296–312.
- [10] **Chao, C. Y. H., M. P. Wan, L. Morawska, G. R. Johnson, Z. D. Ristovski, M. Hargreaves, K. Mengersen, S. Corbett, Y. Li, X. Xie, D. Katoshevski**, 2009. Characterization of expiratory air jets and droplet size distributions immediately at the mouth opening. *Journal of Aerosol Science* 40:122–33.
- [11] **Chao, C. Y. H., M. P. Wan, G. N. Szeto**, 2008. Transport and removal of expiratory droplets in hospital ward environment. *Aerosol Science and Technology* 42:377–94.
- [12] **Chen, C., B. Zhao**, 2010. Some questions on dispersion of human exhaled droplets in ventilation room: Answers from numerical investigation. *Indoor Air* 20:95–111.
- [13] **Chen, S. C., C. M. Liao**, 2008. Modeling control measures to reduce the impact of pandemic influenza among schoolchildren. *Epidemiology Infect* 136:1035–45.
- [14] **Cheng, Y. H., C. M. Liao**, 2013. Modeling control measure effects to reduce indoor transmission of pandemic Influenza H1N1 2009 virus. *Building and Environment* 63:11–19.
- [15] **Decker, J.**, 1995. Evaluation of isolation rooms in health care settings using tracer gas analysis. *Applied Occupational Environmental Hygiene* 10(11):887–91.
- [16] **Duguid, J.**, 1946. The size and duration of air-carriage of respiratory droplets and droplet nuclei. *The Journal of Hygiene* 4:471–80.
- [17] **Eames, I., J. W. Tang, Y. Li, P. Wilson**, 2009. Airborne transmission of disease in hospitals. *Journal of the Royal Society* 6(6):S697–702.
- [18] **Etheridge, D., M. Sandberg**, 1996. *Building ventilation: Theory and measurement*. New York: John Wiley & Sons.
- [19] **Fadeyi, M. O., K. W. Tham**, 2009. Airflow and leakage measurements in a field environmental chamber that has three supply air modes and with ventilation system recirculating larger percentage of its air. *Proceedings of Room Vent 2009, May 24–27, Busan, South Korea*.
- [20] **First, W. M., E. A. Nardell, W. Chaisson, R. Riley**, 1999. Guidelines for the application of upper-room ultraviolet germicidal irradiation for preventing transmission of airborne contagion – Part I: Basic principles. *ASHRAE Transactions* 105:869–76.
- [21] **Fraser, C., W. Riley, R. M. Anderson, N. M. Ferguson**, 2004. Factors that make an infectious disease outbreak controllable. *Proceedings of the National Academy of Science* 101:6146–51.
- [22] **Hanzawa, H., A. K. Melikov, P. O. Fanger**, 1987. Airflow characteristics in the occupied zone of ventilated spaces. *ASHRAE Transactions* 93:524–39.
- [23] **Hinds, W. C.**, 1999. *Aerosol technology*. New York: John Wiley & Sons.
- [24] **Holmgren, H., B. Bake, A. K. Olin, E. Ljungstrom**, 2011. Relation between humidity and size distribution of exhaled particles. *Journal of Aerosol Medicine and Pulmonary Drug Delivery* 24:253–60.
- [25] *** Insight 3G Software Manual. 2009. TSI Incorporated, Shoreview, MN.
- [26] **Kao, P. H., R. J. Yang**, 2006. Virus diffusion in isolation rooms. *Journal of Hospital Infection* 62:338–45.
- [27] **Kaushal, V., P. S. Saini, A. K. Gupta**, 2004. Environmental control including ventilation in hospitals. *JK Science* 6(4):229–32.
- [28] **Kowalski, W. J., W. Bahnfleth, T. S. Whittam**, 1999. Filtration of airborne microorganisms: Modeling and prediction. *ASHRAE Transactions: Research* 105(2):4–17.
- [29] **Levy, B. S., D. H. Wegman, S. L. Barron, R. K. Sokas**, 2005. *Occupational health: Recognizing and preventing work-related disease and injury*. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins.
- [30] **Li, Y., M. G. Leung, J. W. Tang, X. Yang, C. Y. H. Chao, J. Z. Lin, J. W. Lu, P. V. Nielsen, J. Niu, H. Qian, A. Sleigh, H. J. Su, J. Sundell, T. W. Wong, P. L. Yuen**, 2007. Role of ventilation in the airborne transmission of infectious agents in the built environment – A multidisciplinary systematic review. *Indoor Air* 17:2–18.
- [31] **Melikov, A. K.**, 2004. Personalized ventilation. *Indoor Air* 14:157–67.
- [32] **Milton, D. K., P. M. Fabian, B. J. Cowling, M. J. Grantham, J. J. McDe-vitt**, 2013. Influenza virus aerosol in human exhaled breath: Particle size, culturability, and effect of surgical masks. *PLoS Pathogens* 9(3):e1003205.
- [33] **Morawska, L.**, 2006. Droplet fate in indoor environments, or can we prevent the spread of infection? *Indoor Air* 16:335–47.
- [34] **Nicas, M., W. Nazaroff, A. Hubbard**, 2005. Towards understanding the risk of secondary airborne infection: emission of respirable pathogens. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 2(3):143–54.
- [35] **Nielsen, P. V., Y. Li, Y. Buus, F. V. Winther**, 2010. Risk of cross-infection in a hospital ward with downward ventilation. *Building and Environment* 45:2008–14.
- [36] **Noakes, C., L. A. Fletcher, P. A. Sleigh, W. A. Booth, B., Beato-Arribas, B., N. Tomlinson**, 2009. Comparison of tracer techniques for evaluating the behavior of bioaerosols in hospital isolation rooms. *Proceedings of Healthy Buildings, Syracuse, NY, September 13–17, Paper # 504*.
- [37] **Pantelic, J.**, 2010. Exposure generated by cough released droplets in the indoor environment – A comparison among four ventilation systems. PhD thesis, National University of Singapore, Singapore.

- [38] Pantelic, J., B. Raphael, K. W. Tham, 2012. A preference driven multicriteria optimization tool for HVAC design and operation. *Energy and Buildings* 55:118–26.
- [39] Pantelic, J., G. N. Sze To, K. W. Tham, C. Y. H. Chao, Y. C. M. Khoo, 2009. Personalized ventilation as a control measure for airborne transmissible disease spread. *Journal of Royal Society Interface* 6:S715–26.
- [40] Pantelic, J., K. W. Tham, 2011. Assessment of mixing air delivery system ability to protect occupants from the airborne infectious disease transmission using Wells-Riley approach. *HVAC&R Research* 18: 562–74.
- [41] Popio-Lek, Z., Z. Bolashikov, K. Kostadinov, W. Kierat, A. Melikov, 2012. Exposure of health care workers and occupants to coughed air in a hospital room with displacement air distribution: impact of ventilation rate and distance from coughing patient. *Proceedings of Healthy Buildings 2012, June 8–12, Brisbane, Australia*.
- [42] Qian, H., Y. Li, 2010. Removal of exhaled particles by ventilation and deposition in a multibed airborne infection isolation room. *Indoor Air* 20:284–97.
- [43] Qian, H., Y. Li, P. V. Nielsen, C. E. Hyldgaard, T. W. Wong, A. T. Y. Chwang, 2006. Dispersion of exhaled droplet nuclei in a two-bed hospital ward with three different ventilation systems. *Indoor Air* 16:111–28.
- [44] Streifel, A., 1999. *Hospital epidemiology and infection control*, 2nd Ed. Design and maintenance of hospital ventilation systems and prevention of airborne nosocomial infections, Chapter 80, pp. 1211–21. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins.
- [45] Sun, W., J. Ji, Y. Li, X. Xie, 2007. Dispersion and settling characteristics of evaporating droplets in ventilated room. *Building and Environment* 42(2):1011–17.
- [46] Sun, Y., Y. Zhang, 2007. An overview of room air motion measurement: Technology and application. *HVAC&R Research* 13:929–50.
- [47] Sun, Y., Y. Zhang, A. Wang, J. L. Topmiller, J. Bennett, 2005. Experimental characterization of airflows in aircraft cabins. Part I: Experimental system and measurement procedure. *ASHRAE Transactions* 111(2):45–52.
- [48] Sze To, G. N., M. P. Wan, C. Y. H. Chao, L. Fang, A. Melikov, 2009. Experimental study of dispersion and deposition of expiratory aerosols in aircraft cabins and impact on infectious disease transmission. *Aerosol Science and Technology* 43:466–85.
- [49] Tang, J. W., Y. Li, I. Eames, P. K. S. Chan, G. L. Ridgway, 2006. Factors involved in the aerosol transmission of infection and control of ventilation in healthcare premises. *Journal of Hospital Infection* 64:100–14.
- [50] Tang, J. W., A. D. G. Nicolle, J. Pantelic, C. A. Klettner, R. K. Su, P. Kalliomaki, P. Saarinen, H. Koskela, K. Reijula, P. Mustakallio, D. K. W. Cheong, C. Sekhar, K. W. Tham, 2013. Different types of door-opening motions as contributing factors to containment failures in hospital isolation rooms. *PLoS ONE* 8(6):e66663. doi:10.1371/journal.pone.0066663.
- [51] Tung, Y. C., Y. C. Shih, C. S. Hu, 2009. Numerical study on the dispersion of airborne contaminants from an isolation room in the case of door opening. *Applied Thermal Engineering* 29(8–9):1544–51.
- [52] VanSciver, M., S. Miller, J. Hertzberg, J., 2011. Particle image velocimetry of human cough. *Aerosol Science and Technology* 45:415–22.
- [53] Wan, M. P., C. Y. H. Chao, 2007. Transport characteristics of expiratory droplets and droplet nuclei in indoor environments with different ventilation air flow patterns. *Journal of Biomechanical Engineering* 129(3):341–53.
- [54] Zhang, R., G. Tu, J. Ling, 2008. Study on biological contaminant control strategies under different ventilation models in hospital operating room. *Building and Environment* 43(5):793–803.
- [55] Zhang, Y., Y. Sun, A. Wang, J. L. Topmiller, J. Bennett, 2005. Experimental characterization of airflows in aircraft cabins. Part II: Results and research recommendations. *ASHRAE Transactions* 111(2):53–59.
- [56] Zhao, B., P. Guan, 2007. Modeling particle dispersion in personalized ventilated room. *Building and Environment* 42(3):1099–109.
- [57] Zhao, B., C. Yang, X. Yang, S. Liu, 2008. Particle dispersion and deposition in ventilated rooms: Testing and evaluation of different Eulerian and Lagrangian models. *Building and Environment* 43(4):388–97.
- [58] Zhu, S., S. Kato, S. Murakami, T. Hayashi, 2005. Study on inhalation region by means of CFD analysis and experiment. *Building and Environment* 40:1329–36.
- [59] Zhu, S., S. Kato, J. H. Yang, 2006. Study on transport characteristics of saliva droplets produced by coughing in a calm indoor environment. *Building and Environment* 41:1691–1702.
- [60] Zuraimi, M. S., G. J. Nilsson, R. J. Magee, 2011. Removing indoor particles using portable air cleaners: Implications for residential infection transmission. *Building and Environment* 46(12): 2512–19.

kgh

humiFog direct CAREL

Rešenje za kontrolu relativne vlažnosti u štamparskoj industriji

Visoko efikasan ovlaživač sa niskom potrošnjom energije koji:

- smanjuje elektrostatična pražnjenja
- održava kvalitet stampe
- kontramera velikim odavanjima toplote

Ne propustite govor
Gospodina Maximiliano
Maistro-a na KGH 2019

Connected Efficiency

TOPEKO
HVAC & FIRESTOP SYSTEMS

PROTIVPOŽARNI SISTEMI I OPREMA

EN 1366-1
FIRE DUCT, KITCHEN EXTRACT & PRESSURISATION DUCT

EN 1366-8
MULTI-COMPARTMENT SMOKE EXTRACT DUCT

EN 1366-9
SINGLE-COMPARTMENT SMOKE EXTRACT DUCT

AXIOMA HEAT METER

TOPEKS® EKSPANZIONNI SISTEMI

www.fireduct.com

Topeko doo, Beograd
tel: +381 11 756 2122 mob: +381 62 164 8373
e-mail: info@topeko.co.rs www.topeko.co.rs

ESOT energy d.o.o.
Preduzeće za projektovanje, kompletnu opremu, montažu, inženjering i usluge

PROJEKTOVANJE I IZVOĐENJE RADOVA
SERVIS I ODRŽAVANJE
ISPRONA REZERVNIH DELOVA

PATRIJARHOVIĆI BUNIVUJKA 30, 11000 BEOGRAD
BEOGRADSKA ULICA 15, TEL: +381 11 30 019 00, +381 64 64 000 20
WWW.ESOT-ENERGY.COM

MULTI V 5

DESIGNED FOR **ULTIMATE**
Heating Operation Available at -25°C

Otkrivena je zelena inteligencija:
Green IQ iz Vaillanta.

GREEN iQ

Green IQ - oznaka za održivu i umreženu tehnologiju.

Danas, kada troškovi energenata rastu, prirodni resursi nestaju, a klimatske promene postaju neprekidni izazov, održivi način proizvodnje toplotne energije postaje sve važniji. Stoga sve više korisnika želi inteligentne i ekološki prihvatljive sisteme grejanja. Ko u budućnosti želi da štedi bez odricanja, treba inteligentno umrežena, održiva rešenja. Naša nova oznaka "Green IQ", obeležava upravo takve vrste proizvoda.

Dodatne informacije potražite na: www.vaillant.rs

Dobar osećaj da radimo pravu stvar.

■ Grejanje ■ Hlađenje ■ Nove energije

Jer **Vaillant** misli unapred.

POŽARNOOTPORNI PROIZVODI **OVLAŽIVAČI VAZDUHA** **VAZDUŠNO GREJANJE** **FILTRI ZA VAZDUR**

PROTIVEKSPLOZIIONA ZAŠTITA **DISTRIBUCIJA VAZUHA**

PREDUZEĆE ZA INŽENJERING, TERMOTEHNIKU, PROIZVODNJU I TRGOVINU D.O.O.

VIS COMPANY

11283 Beograd, Altina, Ugrinovački put 43, deo 16,
Tel. 011/2605 082, 2601 741
Faks 2600 436
www.viscompany.com • e-mail: office@viscompany.com

INTERFRIGO **Panasonic**
heating and cooling systems

PROIZVOĐNJA MONTAŽA SERVIS HVAČAR SKEMA
Tošin Bunar 163, Beograd
t +381 (0) 11 311 47 73
w interfrigo@orion.rs

- * Komercijalni i rezidencijalni program
- * Multi i split sistemi
- * AQUAREA linija toplotnih pumpi
- * VRF sistemi (mini-ECOi, ECOi, i ECOg)

Posetite **WWW.INTERFRIGO.CO.RS**
za preuzimanje tehničke dokumentacije i programa za selekciju

oventrop

OVENTROP GmbH & Co. KG
Paul-Oventrop-Straße 1
D-59939 Olsberg
Telefon +49 (0) 29 62 82-0
Telefax +49 (0) 29 62 82-400
E-mail mail@oventrop.de
Internet www.oventrop.de

‘LADNO JACKIE CHAN

KLIMA UREĐAJI I RASHLADNI SISTEMI

CHIGO
www.chigoadria.rs