

Korekcijski faktor uređaja za kontinuirano određivanje masene koncentracije lebdećih drvnih čestica fotometrijskom metodom

Correction factor for real-time determination of wood dust mass concentration by photometric method

Izvorni znanstveni rad • Original scientific paper

Prispjelo – received: 29. 1. 2009.

Prihvaćeno – accepted: 25. 2. 2009.

*UDK: 630*822.04; 630*832.17*

SAŽETAK • U pogonima za mehaničku obradu drva skupljani su uzorci drvene prašine iz zraka u radnom okružju radi određivanja korekcijskog faktora uređaja za kontinuirano mjerenje masene koncentracije lebdećih drvnih čestica fotometrijom. Prema normi NIOSH 0600 i NIOSH priručniku analitičkih metoda o fotometrijskome mjerenju, korekcijski je faktor potrebno odrediti prije mjerenja za svaku vrstu prašine posebno, i to kao omjer masene koncentracije čestica određene gravimetrijskom metodom i masene koncentracije određene fotometrijom. Korekcijski faktor treba odrediti zbog utjecaja fizikalnih svojstava čestica različitog materijala (vrste, veličine i oblika čestice te njezina indeksa refleksije) na učinkovitost fotometrije. Istraživanje je provedeno s ciljem ispitivanja mogućnosti primjene fotometrijske metode za određivanje masene koncentracije inhalabilne drvene prašine u zraku. Uzorkovanje je provedeno pri obradi sirove i suhe bukovine, sirove i suhe hrastovine, sirove jelovine i iverice.

Rezultati mjerenja fotometrijom u signifikantnoj su korelaciji s mjernim rezultatima dobivenim gravimetrijskom metodom ($R^2=0,88$), što je temeljni uvjet za mogućnost upotrebe fotometrije pri mjerenju masene koncentracije drvnih čestica u zraku. Rezultati istraživanja upozorili su na nužnost određivanja korekcijskog faktora za mjerenje masene koncentracije drvene prašine pri obradi različitih vrsta drva i drvnih materijala, ali i istih vrsta drva s različitim sadržajem vode. Za uzorke uzete pri obradi jelovine dobiveno je najbolje slaganje rezultata gravimetrijske i fotometrijske metode ($k_{sr}=1$), a najveći korekcijski faktor treba primijeniti pri određivanju izloženosti radnika drvnoj prašini suhe hrastovine ($k_{sr}=4,4$) i iverice ($k_{sr}=4,5$).

S propisanim graničnim vrijednostima izloženosti radnika drvnoj prašini usporedive su samo gravimetrijski određene masene koncentracije iz osam sati skupljanog uzorka. S obzirom na kancerogenost bukovine i hrastovine i njihovu veliku zastupljenost u domaćoj drvnoprerađivačkoj industriji, fotometrijska metoda određivanja masene koncentracije drvnih čestica, osim za određivanje kratkotrajne izloženosti može poslužiti, i kao vrlo korisna metoda u analizi vremenskog profila izloženosti na radnim mjestima tijekom radnog dana. Osim toga, fotometrijska metoda

¹ Autori su, redom, docentica, redovita profesorica, znanstveni novak i viši asistent na Šumarskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, Hrvatska.

² Autor je znanstveni suradnik Instituta za medicinska istraživanja i medicinu rada u Zagrebu.

¹ The authors are assistant professor, full professor, young scientist and senior assistant at the Faculty of Forestry, University of Zagreb, Croatia.

² The author is research associate at the Institute for Medical Research and Occupational Health in Zagreb.

omogućuje istodobno određivanje masene koncentracije inhalabilne, torakalne i respirabilne frakcije lebdećih čestica

Ključne riječi: fotometrija, gravimetrijska metoda, izloženost drvnoj prašini, inhalabilne čestice

ABSTRACT • Samples of wood dust were collected in the working environment of wood machining processes for the purpose of determining correction factors for measuring mass concentration of wood dust by photometric method.

According to the NIOSH 0600 Norm and NIOSH Manual of Analytical Methods for photometric measurement, correction factor must be determined before measuring mass concentration of different types of dust. The correction factor is defined as the ratio of mass concentration obtained by the gravimetric method and mass concentration obtained by the photometric method. The correction factor should be determined because of the influence of particle size distribution, density, particle shape and refractive index on values obtained by the photometric method.

The aim of the research was to investigate the possibility of using photometric method for the determination of mass concentration of inhalable fraction of airborne wood dust. Sampling was conducted in several woodworking plants during the machining of wet and dry beech-wood, wet and dry oak-wood, wet fir-wood and particleboard.

There is a significant correlation between the results obtained by the photometric method and values obtained by the gravimetric method ($R^2=0.88$) and this is the base for using the photometric method in determining mass concentration of airborne wood dust. According to the results of this research, correction factors must be determined and used for measuring mass concentration of inhalable wood dust during the machining of different wood species and wood with different moisture content. The best corresponding results of photometric and gravimetric methods are obtained for the samples collected during machining of wet fir-wood ($k=1$). The largest correction factor should be used in determining workers exposure to wood dust during machining of dry oak-wood ($k=4.4$) and particleboard ($k=4.5$).

Only the results of 8-hour measurements of mass concentration by gravimetric methods can be compared with limit values of aerosol mass concentration. However, the determination of mass concentration of wood dust by photometric method may be applied not only for short-term exposure measurements but also for additional measurements within the analysis of exposure time profile at workplaces during the working day. Additionally, photometric method is very useful for simultaneous collection of samples of the respirable, thoracic and inhalable fractions of airborne particulate matter.

Key words: photometry, gravimetric method, exposure to wood dust, inhalable particles

1. UVOD

1 INTRODUCTION

U većini drvnotehnoških procesa a napose pri mehaničkoj obradi drva, postoji problem izloženosti radnika lebdećim česticama drvene prašine. Problem lebdećih čestica za drveni sektor u Hrvatskoj vrlo je važan jer su bukovina i hrastovina dvije najzastupljenije vrste drva, čiji udio u cjelokupnoj domaćoj preradi čini i do 73 %. Naime, dugotrajna izloženost prašini upravo tih dviju vrsta drva nosi rizik obolijevanja od adenokarcinoma nosne šupljine (Hausen, 1981; Kubel i dr., 1988; Kohler, 1995; Bleich i dr., 1998; Klein i dr., 2001). Osim štetnosti prašine bukovine i hrastovine treba naglasiti i štetnost prašine nekih egzota (abahija, kambale, makorea, mahagonija, merantija) kao i neegzota (bora, jele, borovice, breze, lipe), koje uzrokuju alergijske pojave na koži odnosno sluzokoži radnika (Hinnen i dr., 1995; Rosenberg i dr., 2002). Pojavu astme uzrokuju prašina hrasta, bukve, kestena, bora, smreke, bagrema, palisandra, kambale, abahija i dr. (Malo i dr., 1995; Salvolinen, 1997).

Europska unija proglasila je 1999. godine drvenu prašinu kancerogenom na temelju klasifikacija Međunarodne agencije za istraživanje karcinoma (IARC – International Agency for Cancer Research) (Klein i dr., 2001). Smjernice Europske unije 2004/37/EC od 1999.

godine propisuju graničnu vrijednost masene koncentracije u zraku za inhalabilnu frakciju tvrdih vrsta drva u količini 5 mg/m^3 , pri čemu se uvjetuje određivanje koncentracije gravimetrijskom metodom na uzorku skupljanom osam sati (tijekom jedne radne smjene). Isti propis vrijedi za ukupnu smjesu čestica u kojoj, osim čestica tvrdih vrsta drva, ima i čestica drugih vrsta drva.

U Hrvatskoj se od 1993. godine, prema prijedlogu *Pravilnika o maksimalno dopustivim koncentracijama (MDK) štetnih tvari u atmosferi radnih prostorija i prostora*, propisuju najveće dopuštene masene koncentracije respirabilnih čestica i ukupne prašine. Na radnom je mjestu maksimalno dopuštena masena koncentracija drvene prašine tvrdih vrsta drva (bukovina, hrastovina i egzote) za respirabilne čestice 1 mg/m^3 , a za ukupnu prašinu 3 mg/m^3 .

U istraživanjima osobne izloženosti česticama iz radne atmosfere, osim primjene gravimetrijske metode kao najpouzdanije, pri određivanju masene koncentracije prašine u zraku, istražuje se i mogućnost primjene metode fotometrije (Thomas i Gerbhart, 1994; Koch i dr., 2002; Lanki i dr., 2002). Razlog tome je dugotrajnost mjerenja pri korištenju gravimetrijske metode (cijela radna smjena) te potreba trenutačnoga i kontinuiranog određivanja masene koncentracije drvene prašine na radnome mjestu.

Primjenu metode kontinuiranog određivanja masene koncentracije fotometrijskom metodom istraživali su brojni autori pri određivanju osobne izloženosti drvnim česticama na radnim mjestima u drvnj industriji (Koch i dr., 1999; Koch i dr., 2002; Tatum i dr., 2002; Rando i dr., 2005a; Rando i dr., 2005b). Navedeni autori prikazali su razvoj i primjenu optičkog uređaja RespiCona, s istodobnim selektivnim skupljačem inhalabilne, torakalne i respirabilne frakcije lebdećih čestica. Istraživali su korekcijske faktore za pojedine frakcije veličina drvnih čestica usporedbom rezultata gravimetrijskoga i fotometrijskog mjerenja. Drugi autori istraživali su utjecaj ostalih fizikalnih svojstava čestica - oblika i indeksa refleksije (O'Shaughnessy i dr., 2002) te utjecaj relativne vlažnosti okolnog zraka na rezultate fotometrije (Thomas i Gerbhart, 1994; Lanki i dr., 2002).

Problem fotometrijskog mjerenja masene koncentracije jest to što se za svaku vrstu materijala s obzirom na gustoću materijala i veličinu čestica mora odrediti korekcijski faktor mjerenja. Prema preporukama proizvođača uređaja za fotometrijsko mjerenje, za svaku je vrstu čestica (metalnih, kamenih, drvene prašine) potrebno odrediti zaseban korekcijski faktor jer čak ni pri jednakoj masenoj koncentraciji različite vrste čestica nemaju jednako svojstvo raspršivanja svjetlosti.

Budući da drvene čestice, s obzirom na vrstu drva i sadržaj vode, imaju različitu gustoću, ali i veličinu i oblik lebdećih čestica koje nastaju mehaničkom obradom, problem fotometrijskog mjerenja koncentracije lebdećih drvnih čestica u zraku time je još složeniji.

Cilj istraživanja prikazanih u ovome radu bilo je određivanje korekcijskog faktora za fotometrijsko mjerenje masene koncentracije inhalabilnih čestica u zraku pri mehaničkoj obradi najčešće obrađivanih domaćih vrsta drva te otkrivanje čimbenika koji utječu na iznos korekcijskog faktora.

2. MATERIJALI I METODE 2 MATERIAL AND METHODS

Uzorci za određivanje korekcijskog faktora uređaja za kontinuirano određivanje masene koncentracije drvene prašine u zraku skupljani su u pilani, u doradnome pilanskom pogonu, u parketariji i stolarskoj radionici. U vrijeme uzimanja uzoraka obrađivala se samo jedna vrsta drva ili drvnoga materijala u suhome ili sirovom stanju. Mjerenja su provedena pri mehaničkoj obradi suhe i sirove hrastovine, suhe i sirove bukovine, sirove jelovine te pri obradi iverice.

Uzorkovanje je trajalo 151 sat i 30 minuta, a provedeno je tijekom 21 radnog dana. Prosječno trajanje skupljanja parova uzoraka gravimetrijskom odnosno fotometrijskom metodom iznosilo je od 40 minuta pri obradi suhog drva do 110 minuta pri obradi sirovog drva. Tijekom uzorkovanja nije bilo većih odstupanja u temperaturi i vlažnosti okolnoga zraka.

Korekcijski faktor uređaja za kontinuirano određivanje masene koncentracije dobiven je kao omjer masene koncentracije određene gravimetrijski i fotometrijski. Uređaj za kontinuirano mjerenje masene

koncentracije lebdećih čestica modela Split II, proizvođača SKC (Dorset, UK, 2006), sastoji se od uređaja za obradu i prikaz podataka, ulaznog dijela držača leća za fotometriju (optički dio uređaja) te izlaznog dijela IOM (Institute of Occupational Medicine) držača filtra za gravimetrijsku analizu. Optički dio uređaja koristi se izvorom infracrvene svjetlosti koji je smješten pod kutom od 90° u odnosu prema fotodetektoru. Prolaskom čestice između leća intenzitet svjetlosti slabi, pri čemu se bilježi izlazni signal proporcionalan vrijednosti masene koncentracije lebdećih čestica iz radne atmosfere. Kućište je povezano sa sisaljkom proizvođača Casella (Bedford, UK, 2001), podešenom na protok zraka od 2 l/min (EN ISO 10882-1:2001). Uzorak zraka nakon ulaska u kućište prolazi kroz optički detektor, a zatim kroz filtar. Držać filtra IOM oblikovan je prema standardu za sakupljanje inhalabilne frakcije (čestice veličine do 100 μm). Prema tehničkom izvještaju ISO/TR 7708-1995, inhalabilna ili udisajna frakcija masena je frakcija ukupnih lebdećih čestica koje se udahnu kroz nos i usta.

Pri radu s uređajem za fotometriju lebdećih čestica primijenjene su upute NMAM Method 0600 (NIOSH Manual of Analytical Methods, National Institute for Occupational Safety and Health). Za postizanje pouzdanosti kontinuiranog mjerenja tim uređajem korekcijski se faktor određuje iz srednje vrijednosti dobivene iz najmanje deset ponavljanja. Korekcijski faktor određuje se dijeljenjem dviju vrijednosti masenih koncentracija prema formuli:

$$k = \frac{c_g}{c_f} \quad (1)$$

gdje su:

k – korekcijski faktor za kontinuirano određivanje masene koncentracije,

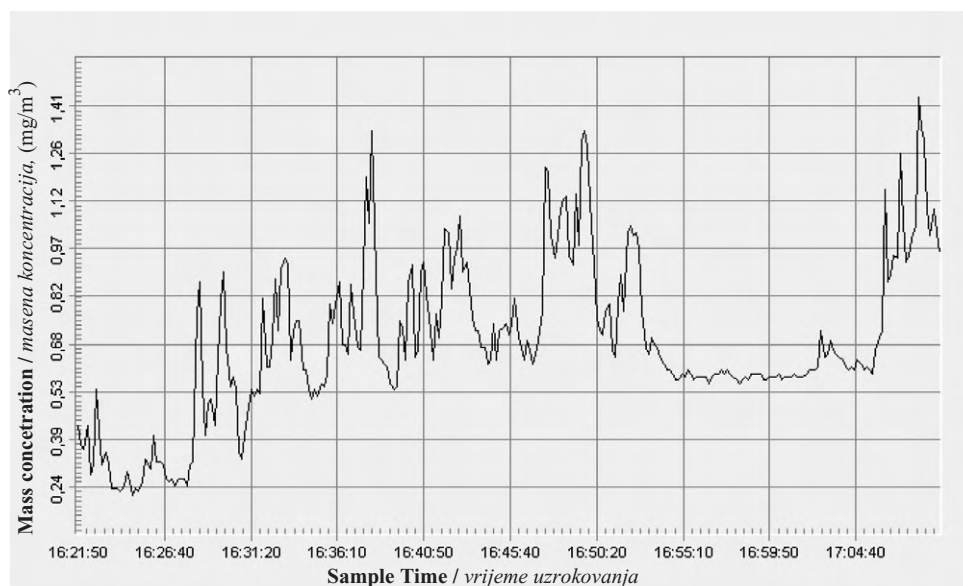
c_g – masena koncentracija određena gravimetrijskom metodom, mg/m³,

c_f – srednja vrijednost masene koncentracije određene fotometrijom, mg/m³.

Uređaj za kontinuirano određivanje masene koncentracije potrebno je „nulirati“ prije svakog uzorkovanja. Najviša masena koncentracija koja se može odrediti tim uređajem iznosi 200 mg/m³.

Uređaj je podešen tako da svakih 10 sekundi kontinuirano bilježi masenu koncentraciju. Na kraju mjerenja dostupne su sve zabilježene vrijednosti masenih koncentracija (grafički i brojevno), ukupan broj podataka odnosno izmjera, najniža i najviša masena koncentracija, srednja vrijednost svih podataka te kratkotrajna 15-minutna izloženost (STEL – Short Term Exposure Limit). Provođenje kontinuiranog mjerenja tijekom najmanje 30 minuta uvjet je za određivanje kratkotrajne izloženosti. Pratećim programom iscertava se dijagram koji prikazuje sve vrijednosti u vremenskom razdoblju kontinuiranog određivanja masene koncentracije fotometrijom (sl. 1).

Pri određivanju masene koncentracija drvene prašine gravimetrijskom metodom (ZH 1/120.41) vaganje je obavljeno uporabom mikrovage METTLER-TOLE-



Slika 1. Dijagram kontinuiranog određivanja masene koncentracije fotometrijskom metodom
Figure 1 Diagram of continuous determination of mass concentration by photometry

DO MX-5, koja ima mogućnost preciznog mjerenja i očitavanja vrijednosti do 10^{-6} grama, s mjernom nesigurnošću od $2 \cdot 10^{-6}$ grama. Kao medij za skupljanje uzoraka drvene prašine upotrebljeni su kvarcni filtri (Whatman QM-A) promjera 25 mm koji se odlikuju visokom učinkovitošću odvajanja čestica iz zračne struje, malim otporom, visokom čistoćom i kemijskom inertnošću. S obzirom na higroskopnost materijala, filtri su kondicionirani na stalnu vlažnost u eksikatoru tijekom 24 sata prije vaganja (prije i nakon uzimanja uzorka). Masena koncentracija drvene prašine određuje se iz jednakosti 2:

$$c_g = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (2)$$

gdje je:

c_g – masena koncentracija prašine određena gravimetrijskom metodom, mg/m^3 ,

m_1 – masa filtra prije uzimanja uzorka, mg,

m_2 – masa filtra s uzorkom, mg,

V – ukupni volumen zraka iz kojega je uzet uzorak, m^3 .

Statistička razlika između korekcijskih faktora dobivenih pri obradi različitih materijala testirana je Studentovim testom, uz pretpostavku homogenosti varijanci. U slučaju nehomogenosti varijanci poslužila je neparametarska analiza Mann-Whitneyevim u-testom (McClave i Dietrich, 1988). Statističke analize rađene su uporabom statističkog softvera - STATISTICA 6.0.

3. REZULTATI S DIKUSIJOM 3 RESULTS AND DISCUSSION

U tablicama 1. do 6. navedeni su svi rezultati određivanja masene koncentracije drvene prašine u zraku gravimetrijskom i fotometrijskom metodom za različite vrste drva u suhome i/ili sirovom stanju te za ivericu. U tablicama su dani i podaci o maksimalnoj i minimalnoj masenoj koncentraciji zabilježenoj fotometrijom, o kratkotrajnoj 15-minutnoj izloženosti (STEL) te izračunani korekcijski faktori.

U tablici 7. dane su srednje vrijednosti korekcijskog faktora i standardne devijacije za različite vrste drva u suhome i/ili sirovom stanju te za ivericu.

Rezultati provedenih istraživanja pokazali su da se najbolje slaganje gravimetrijski i fotometrijski određenih masenih koncentracija pokazalo pri obradi sirove jelovine ($k_{sr}=1,0$), a najlošije slaganje odnosno najveći korekcijski faktori dobiveni su istraživanjima pri obradi suhe hrastovine ($k_{sr}=4,4$) i iverice ($k_{sr}=4,5$). Dobiveni korekcijski faktori upućuju na nužnost određivanja i korištenja različitih korekcijskih faktora za određivanje masene koncentracije lebdećih drvnih čestica pri obradi različitih vrsta drva i drvnih materijala te pri različitom sadržaju vode u drvu. Međutim, statističkim testiranjem nije ustanovljena signifikantna razlika među korekcijskim faktorima svih skupina uzoraka. Razlog tomu je relativno veliko rasipanje dobivenih korekcijskih faktora uzrokovano najvjerojatnije pogreškama pri određivanju vrlo malih masenih koncentracija gravimetrijskom metodom. Statističkim testiranjem dobivene su signifikantne razlike korekcijskih faktora pri obradi jelovine i ostalih skupina uzoraka te pri obradi sirove bukovine i ostalih skupina uzoraka. Signifikantna razlika korekcijskih faktora pokazala se i pri obradi iverice u odnosu prema obradi drva u sirovom stanju (tabl. 8).

Rezultati sličnih istraživanja drugih autora (Koch i dr., 1999; Koch i dr., 2002; Rando i dr., 2005a; Rando i dr., 2005b; Tatum i dr., 2002), pri usporedbi fotometrijske i gravimetrijske metode, pokazali su kako je učinkovitost fotometrije drvnih čestica približno jednaka učinkovitosti referentnog IOM skupljača (korekcijski faktor iznosi približno 1) za čestice veličine do 10 μm , a za čestice ekstratorakalne frakcije (od 10 do 30 μm) korekcijski faktor iznosi između 1,5 i 2. Autor Baron (1995) također je istraživao sposobnosti optičkog raspoznavanja sfernih čestica te pokazao kako je najbolja „osjetljivost“ fotometra za čestice veličine 0,6 μm pri stalnoj masenoj koncentraciji. Prema tomu, učinko-

Tablica 1. Rezultati gravimetrijskoga i fotometrijskog određivanja masene koncentracije inhalabilnih drvnih čestica u zraku pri obradi suhe hrastovine i vrijednosti korekcijskog faktora

Table 1 Results of gravimetric and photometric determination of inhalable wood dust mass concentration in the surrounding air during machining of dry oakwood and values of correction factor

Hrastovina – suha / Oak-wood - dry									
<i>N</i>	c_g	<i>n</i>	STEL	c_{min}	c_{max}	STD	c_f	<i>k</i>	
	mg/m ³			mg/m ³					
1.	0,59	287	0,25	0,0	0,95	0,20	0,1	5,91	
2.	0,41	296	0,46	0,17	0,69	0,09	0,35	1,18	
3.	0,27	200	0,03	0	0,34	0,05	0,02	13,27	
4.	0,30	218	0,21	0,04	0,3	0,07	0,17	1,78	
5.	0,25	225	0,09	0,02	0,16	0,04	0,06	4,20	
6.	0,20	177	0,35	0,08	0,62	0,12	0,26	0,78	
7.	0,09	348	0,2	0	0,55	0,10	0,08	1,18	
8.	0,08	218	0,26	0,02	0,83	0,16	0,15	0,55	
9.	0,87	304	0,32	0,01	1,42	0,18	0,15	5,79	
10.	4,70	477	1,87	0,38	5,62	0,53	1,46	3,22	
11.	2,63	385	1,68	0,03	6,52	0,71	0,86	3,06	
12.	3,59	624	2,08	0	5,5	0,83	1,03	3,49	
13.	7,29	285	1,53	0,08	4,69	0,57	1,21	6,02	
14.	3,45	416	1,19	0,15	3,88	0,72	1,11	3,11	
15.	4,18	231	0,67	0	0,67	0,51	0,33	12,66	
Srednja vrijednost / Mean value								4,41	

N – oznaka uzorka (sample mark), c_g – gravimetrijski određena masena koncentracija drvene prašine u zraku (wood dust mass concentration determined by gravimetric method), *n* - broj podataka dobivenih kontinuiranom fotometrijom za jedan uzorak (number of data obtained by continuous photometric measurement for single sample), c_f - fotometrijski određena masena koncentracija drvene prašine u zraku (wood dust mass concentration determined by photometric method), STEL - kratkotrajna 15-minutna izloženost drvnoj prašini (Short Term Exposure Level), c_{min} – najniža zabilježena masena koncentracija za jedan uzorak (minimum mass concentration for single sample), c_{max} – najviša zabilježena masena koncentracija za jedan uzorak (maximum mass concentration for single sample), *k* – korekcijski faktor (correction factor)

Tablica 2. Rezultati gravimetrijskoga i fotometrijskog određivanja masene koncentracije inhalabilnih drvnih čestica u zraku pri obradi sirove hrastovine i vrijednosti korekcijskog faktora

Table 2 Results of gravimetric and photometric determination of inhalable wood dust mass concentration in the surrounding air during machining of wet oak-wood and values of correction factor

Hrastovina – sirova / Oak-wood - wet									
<i>N</i>	c_g	<i>n</i>	STEL	c_{min}	c_{max}	STD	c_f	<i>k</i>	
	mg/m ³			mg/m ³					
1.	0,76	619	0,27	0,02	0,47	0,05	0,24	3,17	
2.	0,85	573	0,57	0,12	3,18	0,26	0,33	2,59	
3.	1,05	441	0,37	0,03	1,58	0,12	0,32	3,28	
4.	1,22	527	0,37	0,06	1,27	0,14	0,29	4,20	
5.	2,31	509	0,98	0,02	6,78	0,67	0,64	3,61	
6.	1,75	532	0,88	0,3	18,46	0,99	0,51	3,43	
7.	0,11	518	0,25	0,02	0,34	0,04	0,19	0,55	
8.	0,34	557	0,25	0,02	0,5	0,07	0,21	1,61	
9.	0,89	551	0,35	0,1	0,47	0,09	0,24	3,71	
10.	0,55	446	0,32	0,02	7,36	0,39	0,14	3,96	
11.	1,28	519	0,41	0,06	1,09	0,19	0,38	3,39	
12.	1,34	679	0,78	0	1,34	0,28	0,18	7,45	
13.	1,43	682	1,17	0,13	7,25	0,52	0,51	2,81	
14.	1,11	675	0,46	0,04	0,67	0,1	0,36	3,08	
15.	1,01	696	0,39	0,03	0,56	0,08	0,30	3,37	
16.	0,99	643	0,68	0,03	1,19	0,2	0,46	2,16	
17.	1,41	469	0,6	0	6,35	0,83	0,22	6,41	
18.	0,79	668	0,57	0	0,72	0,13	0,44	1,79	
Srednja vrijednost / Mean value								3,37	

Tablica 3. Rezultati gravimetrijskoga i fotometrijskog određivanja masene koncentracije inhalabilnih drvnih čestica u zraku pri obradi suhe bukovine i vrijednosti korekcijskog faktora

Table 3 Results of gravimetric and photometric determination of inhalable wood dust mass concentration in the surrounding air during machining of dry beech-wood and values of correction factor

Bukovina – suha / Beech-wood - dry									
<i>N</i>	<i>c_g</i>	<i>n</i>	STEL	<i>c_{min}</i>	<i>c_{max}</i>	STD	<i>c_f</i>	<i>k</i>	
	mg/m ³			mg/m ³					
1.	2,60	-	0,95	-	-	-	0,87	3,0	
2.	4,38	247	1,72	0,49	6,68	0,60	1,43	3,1	
3.	4,06	178	1,00	0,38	2,63	0,35	0,96	4,2	
4.	1,59	264	0,44	0,13	4,54	0,43	0,35	4,6	
5.	5,25	173	1,31	0,29	4,12	0,64	1,24	4,2	
6.	5,26	337	1,44	0,00	16,40	1,07	0,66	8,0	
7.	4,29	242	1,77	0,24	7,45	0,83	1,28	3,4	
8.	5,43	338	2,22	0,16	5,41	0,78	1,44	3,8	
9.	3,00	232	1,29	0,47	4,77	0,54	1,15	2,6	
10.	1,07	331	2,80	0,20	4,86	0,78	2,28	0,5	
11.	0,17	569	0,33	0,08	0,83	0,08	0,24	0,70	
12.	0,2	627	0,10	0	0,43	0,05	0,04	5,85	
13.	0,02	549	0,08	0,02	0,12	0,02	0,05	0,4	
14.	0,30	627	0,11	0	0,50	0,04	0,08	3,72	
15.	0,19	542	0,07	0,02	0,10	0,02	0,05	3,88	
16.	0,25	482	0,06	0	0,26	0,02	0,03	8,16	
17.	0,23	487	0,17	0,01	0,59	0,08	0,06	3,90	
18.	0,22	522	0,04	0,02	0,19	0,01	0,03	7,33	
19.	0,30	511	0,60	0,49	0,71	0,03	0,58	0,52	
20.	0,28	511	0,36	0,25	0,53	0,05	0,31	0,91	
21.	0,43	512	0,21	0,02	0,59	0,07	0,12	3,56	
22.	0,05	510	0,08	0,02	0,63	0,04	0,06	0,88	
23.	0,42	511	0,06	0	0,92	0,07	0,04	10,42	
Srednja vrijednost / Mean value								3,81	

Tablica 4. Rezultati gravimetrijskoga i fotometrijskog određivanja masene koncentracije inhalabilnih drvnih čestica u zraku pri obradi sirove bukovine i vrijednosti korekcijskog faktora

Table 4 Results of gravimetric and photometric determination of inhalable wood dust mass concentration in the surrounding air during machining of wet beech-wood and values of correction factor

Bukovina – sirova / Beech-wood - wet									
<i>N</i>	<i>c_g</i>	<i>n</i>	STEL	<i>c_{min}</i>	<i>c_{max}</i>	STD	<i>c_f</i>	<i>k</i>	
	mg/m ³			mg/m ³					
1.	0,81	659	1,38	0,00	8,89	0,81	0,68	1,19	
2.	0,75	464	0,4	0,13	0,83	0,12	0,31	2,43	
3.	1,31	422	0,44	0,02	4,41	0,28	0,24	5,44	
4.	1,56	413	1,05	0,15	3,76	0,41	0,76	2,06	
5.	1,10	285	0,84	0,22	1,43	0,24	0,68	1,62	
6.	0,11	415	0,73	0,11	1,50	0,21	0,49	0,22	
7.	0,64	440	0,95	0,15	1,48	0,28	0,58	1,09	
8.	0,73	521	0,58	0,02	2,54	0,21	0,4	1,83	
9.	0,96	401	1,28	0,68	2,13	0,24	1,04	0,92	
10.	0,38	440	0,53	0,00	1,99	0,20	0,41	0,93	
11.	0,72	592	0,58	0,07	1,01	0,14	0,41	1,75	
12.	0,33	899	0,23	0	0,49	0,1	0,1	3,30	
13.	1,09	649	0,40	0	1,40	0,16	0,23	4,72	
14.	0,90	613	0,71	0,25	1,84	0,19	0,49	1,83	
Srednja vrijednost / Mean value								2,10	

Tablica 5. Rezultati gravimetrijskoga i fotometrijskog određivanja masene koncentracije inhalabilnih drvnih čestica u zraku pri obradi sirove jelovine i vrijednosti korekcijskog faktora

Table 5 Results of gravimetric and photometric determination of inhalable wood dust mass concentration in the surrounding air during machining of wet fir-wood and values of correction factor

Jelovina – sirova / Fir-wood wet									
<i>N</i>	<i>c_g</i>	<i>n</i>	STEL	<i>c_{min}</i>	<i>c_{max}</i>	STD	<i>c_f</i>	<i>k</i>	
	mg/m ³			mg/m ³					
1.	0,14	562	0,24	0	1,37	0,12	0,16	0,85	
2.	0,27	553	0,46	0,02	1,7	0,10	0,41	0,66	
3.	0,55	336	0,73	0,05	1,32	0,22	0,49	1,12	
4.	0,39	500	0,51	0	1,61	0,20	0,32	1,22	
5.	0,15	463	0,21	0	1,3	0,08	0,17	0,89	
6.	0,30	363	0,3	0,9	1,4	0,42	0,28	1,08	
7.	0,22	-	0,24	0	1,37	-	0,23	0,96	
8.	0,23	-	0,41	0,07	7,51	-	0,41	0,56	
9.	0,38	451	0,28	0,06	4,34	0,21	0,21	1,83	
10.	1,31	577	4,15	0,33	9,24	1,58	1,31	1,00	
Srednja vrijednost / Mean value								1,02	

Tablica 6. Rezultati gravimetrijskog i fotometrijskog određivanja masene koncentracije inhalabilnih drvnih čestica u zraku pri obradi iverice i vrijednosti korekcijskog faktora

Table 6 Results of gravimetric and photometric determination of inhalable wood dust mass concentration in the surrounding air during machining of particleboard and values of correction factor

Iverica / Particleboard									
<i>N</i>	<i>c_g</i>	<i>n</i>	STEL	<i>c_{min}</i>	<i>c_{max}</i>	STD	<i>c_f</i>	<i>k</i>	
	mg/m ³			mg/m ³					
1.	4,51	834	5,42	0,13	9,66	1,73	1,51	2,99	
2.	12,74	296	5,17	0,74	8,31	1,78	3,4	3,75	
3.	23,79	192	7,75	0,86	12,31	2,54	6,21	3,83	
4.	16,45	218	5,86	0,69	9,9	2,31	3,88	4,24	
5.	11,96	229	4,17	0,0	8,3	1,63	2,74	4,36	
6.	9,05	252	2,09	0,24	4,0	0,87	1,61	5,62	
7.	11,15	229	3,49	0,64	6,32	1,20	2,76	4,04	
8.	11,78	219	3,13	0,71	5,31	0,91	2,75	4,28	
9.	17,33	254	4,54	0	8,53	1,85	3,01	5,76	
10.	5,03	262	1,53	0,09	5,38	0,91	0,83	6,07	
Srednja vrijednost / Mean value								4,49	

vitost skupljača s fotodetektorom smanjuje se s povećanjem aerodinamičkog promjera promatrane čestice, što rezultira većim korekcijskim faktorom. Budući da je u ovim istraživanjima analizirana učinkovitost fotometrije za određivanje masene koncentracije inhalabilne frakcije čestica (veličina čestica do 100 μm), mogli su se i očekivati relativno veliki korekcijski faktori. No fotometrija se može rabiti i za mjerenje masene koncentracije inhalabilnih čestica, što pokazuje relativno visoki koeficijent korelacije ($R^2=0,88$) dobiven iz rezultata provedenih mjerenja na svim uzorcima (sl. 2).

Općenito, iz istog se uzorka zraka uređajem kontinuirane fotometrije odredi manja izloženost lebdećim česticama negoli gravimetrijskom metodom IOM skupljačem inhalabilne frakcije čestica (Koch i dr.,

2002; Rando i dr., 2005a) što pokazuju i provedena istraživanja (sl. 2).

Lošija učinkovitost fotometrije odnosno veći korekcijski faktor u ovim se istraživanjima pojavljuje pri višim masenim koncentracijama, zabilježenim gravimetrijski (sl. 3).

Dosadašnja istraživanja udjela respirabilne frakcije u ukupnim lebdećim česticama drvene prašine uzorkovane osobnim skupljačima na različitim radnim mjestima u drvnoindustrijskim pogonima pokazala su da se maseni udjel respirabilne frakcije u ukupnoj prašini znatno smanjuje s povećanjem masene koncentracije ukupne prašine, odnosno, s povećanjem masene koncentracije ukupnih čestica ne povećava se proporcionalno i masena koncentracija respirabilnih čestica (Kos

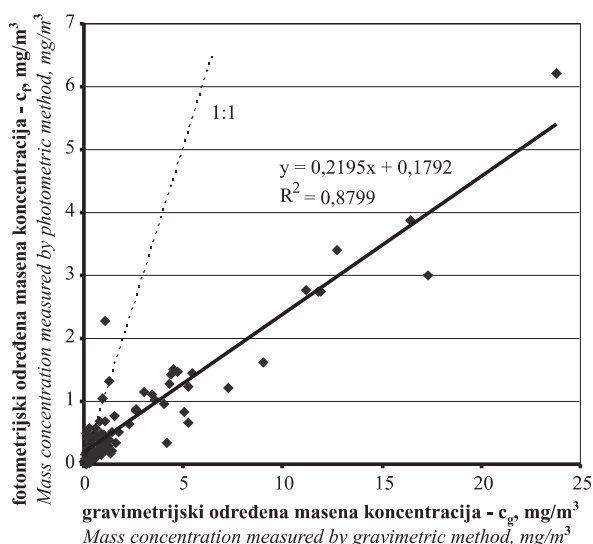
Tablica 7. Najmanja, najveća i srednja vrijednost te standardna devijacija korekcijskih faktora za skupine uzoraka drvne prašine
Table 7 Minimum, maximum and average value and standard deviation of correction factors for different samples of wood dust

Vrsta drvnih čestica / Wood particles	n	c _g	c _f	k _{sr}	SDV _k	k _{fmin}	k _{fmax}
		mg/m ³					
jelovina, sirova / Wet fir-wood	10	0,39	0,40	1,0	0,35	0,56	1,83
bukovina, sirova / Wet beech-wood	14	0,81	0,49	2,1	1,47	0,22	5,44
hrastovina, sirova / Wet oak-wood	18	1,07	0,33	3,4	1,59	0,55	7,45
bukovina, suha / Dry beech-wood	23	1,74	0,58	3,8	2,70	0,40	10,42
hrastovina, suha / Dry oak-wood	15	1,93	0,49	4,4	3,92	0,55	13,27
iverica / Particleboards	10	12,38	2,87	4,5	1,00	2,99	6,07

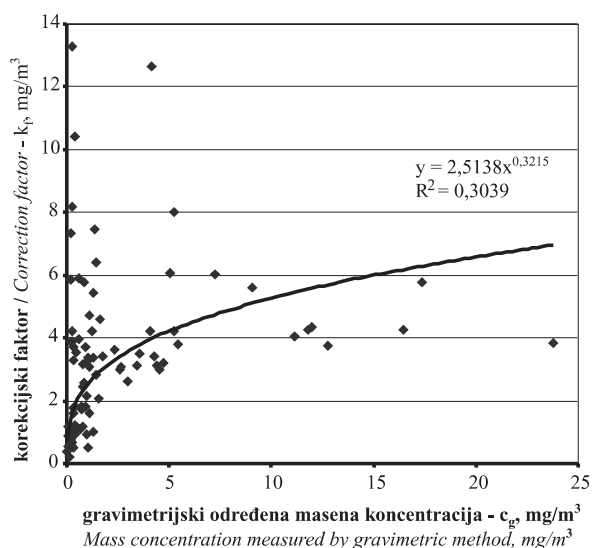
n – broj uzoraka određene vrste obrađivanog materijala (number of samples for machined material), c_g – srednja vrijednost gravimetrijski određene masene koncentracije (mean value of mass concentration determined by gravimetric method), c_f – srednja vrijednost fotometrijski određene masene koncentracije (mean value of mass concentration determined by photometric method), k_{sr} – srednja vrijednost korekcijskog faktora (mean value of correction factors), k_{fmin} – najmanja vrijednost korekcijskog faktora za skupinu uzoraka (minimum value of correction factors), k_{fmax} – najveća vrijednost korekcijskog faktora za određenu vrstu drva (maximum value of correction factors), SDV_k – standardna devijacija korekcijskih faktora (standard deviation of correction factors)

Tablica 8. Rezultati statističke usporedbe veličine korekcijskih faktora za različite skupine uzoraka
Table 8 Results of statistical comparison of correction factors for different sample groups

Razina signifikantnosti – p Significance level – p	Iverica Particleboards	Jelovina, sirova Wet fir-wood	Hrastovina, sirova Wet oak-wood	Hrastovina, suha Dry oak-wood	Bukovina, sirova Wet beech-wood
Bukovina, suha Dry beech-wood	0,14	0,012	0,48	0,58	0,08
Bukovina, sirova Wet beech-wood	0,0002	0,02	0,03	0,09	-
Hrastovina, suha Dry oak-wood	0,27	0,004	0,91	-	-
Hrastovina, sirova Wet oak-wood	0,05	0,0002	-	-	-
Jelovina, sirova Wet fir-wood	0,0002	-	-	-	-



Slika 2. Korelacija vrijednosti masenih koncentracija dobivenih fotometrijski i gravimetrijski
Figure 2 Correlation of mass concentrations obtained by photometric method and gravimetric method



Slika 3. Ovisnost veličine korekcijskog faktora o gravimetrijski određenoj masenoj koncentraciji drvne prašine u zraku
Figure 3 Dependence of correction factor on wood dust mass concentration obtained by gravimetric method

2002). Time se donekle može objasniti lošija učinkovitost fotometrije pri višim masenim koncentracijama prašine koja se očitovala u ovim istraživanjima.

Veliki korekcijski faktor pojavljuje se i pri vrlo niskim masenim koncentracijama, za koje je mogućnost pogreške gravimetrijske metode mnogo veća te se pri

određivanju korekcijskog faktora za fotometrijsko mjerenje kada se očekuju niske masene koncentracije lebdećih čestica u zraku preporučuje produljenje vremena uzorkovanja. Pri mjerenju nižih masenih koncentracija i autor Rando i dr. (2005) uzima u obzir pogreške gravimetrijske metode zbog manipuliranja filtrima koje smanjuju razliku među tim dvjema metodama.

Na radnim mjestima u pogonima za preradu drva izloženost radnika drvnoj prašini znatno varira pa bi daljnjim istraživanjima trebalo ispitati utjecaj masene koncentracije i vrste radne operacije na veličinu korekcijskog faktora. Također bi bilo nužno istražiti učinkovitost fotometrijskog mjerenja masene koncentracije respirabilne i torakalne frakcije drvnih čestica u radnom okruženju pogona za mehaničku obradu drva i drvnih materijala.

Daljnja istraživanja korekcijskog faktora za kontinuirano određivanje masene koncentracije drvene prašine trebaju sadržavati i podatak o praćenju relativnog sadržaja vlažnosti okolnog zraka (Thomas and Gebhart, 1994).

4. ZAKLJUČAK 4 CONCLUSION

Određivanje masenih koncentracija lebdećih čestica radi usporedbe izloženosti radnika na radnome mjestu s granično dopuštenim vrijednostima treba provoditi gravimetrijskom metodom na uzorcima prikupljenim tijekom 8-satne radne smjene, metodom osobnih skupljača.

Fotometrijska metoda nije zamjena za gravimetrijsku metodu određivanja masene koncentracije lebdećih čestica i njezini se rezultati ne mogu uspoređivati s propisanim graničnim vrijednostima izloženosti radnika drvnoj prašini.

Uređajem za kontinuirano određivanje masene koncentracije fotometrijom moguće se koristiti zbog njegovih prednosti pred gravimetrijskom metodom, koje se odnose na mogućnost snimanja vremenskog profila izloženosti radnika, mjerenje kratkotrajne izloženosti te na mogućnost pravodobnog dobivanja signala (uključivanjem alarma) u trenutku prekoračenja propisanih (dnevnih) graničnih vrijednosti masenih koncentracija inhalabilnih, torakalnih ili respirabilnih frakcija lebdećih čestica.

Postoje indicije da usrednjena izloženost lebdećim drvnim česticama za osam sati ili tijekom duljega radnog vremena nije uvijek najbolja mjera izloženosti radnika štetnim česticama već je potrebno odrediti i kratkotrajnu izloženost (STEL) radnika visokim koncentracijama štetnih čestica. U tom smislu fotometrijska je metoda u prednosti pred gravimetrijskom i običavajuća je metoda za istraživanje utjecaja kratkotrajnih izloženosti na zdravlje radnika.

Pri mjerenju masene koncentracije inhalabilne frakcije lebdećih čestica drvene prašine nužno se koristiti različitim korekcijskim faktorima za određivanje masene koncentracije pri mehaničkoj obradi različitih vrsta drva i različitoga sadržaja vode.

Raspršivanje svjetlosti od čestice definirano je njezinim oblikom i veličinom odnosno indeksom refleksije, što je ujedno i razlog složenosti određivanja

korekcijskog faktora za primjenu fotometrijske metode za mjerenje masene koncentracije lebdećih drvnih čestica u zraku.

5. LITERATURA 5 REFERENCES

1. Baron, P.A. 1998: Aerosol photometers for respirable dust measurement. NIOSH Manual of Analytical Methods, 1/15.
2. Bleich, S.; Hapla, F.; Sprung, R. 1998: Possible risk to develop nasal cancer by occupational exposure to wood dust containing methanol and methylacetate. Investigation of wood dust using headspace-gaschromatography. Holz als Roh- und Werkstoff, 56: 367-372.
3. Hausen, B. 1981: Woods Injurious to Human Health. Universitätsbibliothek Hannover und Technische Informationsbibliothek, de Gruyter Press, Berlin.
4. Hinnen, U.; Willa-Craps, C.; Elsner P. 1995: Allergic contact dermatitis from iroko (*Milicia excelsa*) and pine (*Pinus*) wood dust. Contact Dermatitis. 33 (6): 428-438.
5. Klein, R.G.; Schmezer, P.; Amelung, F.; Schroeder, H.G.; Woeste, W.; Wolf, J. 2001: Cancerogenicity assays of wood dust and wood additives in rats exposed by long-term inhalation. Int Arch Occup Environ Health. 74: 109-118.
6. Kohler, B. 1995: Wood dust and cancer. National Rep - Health, Safety and Environment, IARC, France.
7. Koch, W.; Dunkhorst, W.; Lödding H. 1999: Design and Performance of a New Personal Aerosol Monitor. Aerosol Science and Technology. 31: 231-246.
8. Koch, W.; Dunkhorst, W.; Lödding, H.; Thomassen, Y.; Skaugset, N.P.; Nikanov, A.; Vincent J. 2002: Evaluation of RespiCon® as a personal inhalable sampler in industrial environments. Journal for Environmental Monitoring. 4: 657 – 662.
9. Kos, A. 2002: Influence of working machines cutting parameters and exhaust quality on dustiness in final wood-working environment. Doctoral thesis, Faculty of Forestry, Zagreb.
10. Kubel, H.; Weißmann, G.; Lange, W. 1988: Untersuchungen zur Cancerogenität von Holzstaub. Die Extraktstoffe von Buche und Fichte. Holz als Roh- und Werkstoff. 46: 215-220.
11. Lanki, T.; Alm, S.; Ruuskanen, J.; Janssen, N.A.H.; Jantunen, M.; Pekkanen, J. 2002: Photometrically measured continuous personal PM2.5 exposure: Levels and correlation to a gravimetric method. Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology. 12: 172-178.
12. Malo, J.L.; Cartier A.; Desjardins, A.; Weyer, R.; Vandenplas, O.; Vande-Weyer, R. 1995: Occupational asthma caused by oak wood dust. Chest. 108 (3): 856-858.
13. McClave, J.; Dietrich, F.H. 1988: Statistics. Dellen Publisher Company, San Francisco.
14. O'Shaughnessy, P.T.; Slagley, J.M. 2002: Photometer response determination based on aerosol physical characteristics. American Industrial Hygiene Association Journal. 63(5): 578-585.
15. Rando, R.; Poovey, H.; Mokadam, D.; Brisolara, J.; Glindeymer, H. 2005a: Field Performance of the RespiCon™ for Size-Selective Sampling of Industrial Wood Processing Dust. Journal of Occupational and Environmental Hygiene. 2: 219-226.

16. Rando, R.J.; Gibson, R.A.; Kwon, C.H.W.; Poovey, H.G.; Glindmeyer H.W. 2005b: On-filter determination of collected wood dust by diffuse infrared Fourier-transform spectroscopy (DRIFTS). *Journal of Environmental Monitoring*. 7: 675-680.
17. Rosenberg, Ch.; Liukkonen, T.; Kallas-Tarpila, T.; Ruonakangas, A.; Ranta, R.; Nurminen, M.; Welling, I.; Jäppinen, P. 2002: Monoterpene and Wood Dust Exposures: Work-Related Symptoms among Finnish Sawmill Workers. *American Journal of Industrial Medicine*. 41: 38-53.
18. Salvolinen, H. 1997: Reactions of Tannins with Human Serum Proteoglycans. *Tanin Journal of Applied Toxicology*. 17 (2): 133-135.
19. Tatum, V.; Ray, A.E.; Rovell-Rixx, D. 2002: Performance of the RespiCon personal aerosol sampler in forest products industry workplaces. *American Industrial Hygiene Association Journal*. 63 (3): 311-316.
20. Thomas, A.; Gerbhart, J. 1994: Correlation between gravimetry and light-scattering photometry for atmospheric aerosols. *Atmospheric Environment*. 28 (5): 935-938.
21. ***NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM), Particulates not otherwise regulated, respirable, Method 0600, Issue 2, 15 August 1994, 2-5.
22. ***Council Directive 2004/37/EC of 29 April 2004 on the protection of workers from the risk related to exposure to carcinogens or mutagens at work (sixth individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Council Directive 89/391/EEC). *Official Journal of the European Union* L 158, 30/04/ 2004.
23. ***HRN EN 481:2007 Atmosfera radnih prostora – Definicija veličina frakcija za mjerenje lebdećih čestica (EN 481:1993)
24. ***HRN CEN/TR 15230:2007, Atmosfera radnih prostora – Smjernice za uzorkovanje inhalabilnih, torakalnih i respirabilnih frakcija aerosola (CEN/TR 15230:2005).
25. ***HRN CEN/TR 13205:2007, Atmosfera radnih prostora – Ocjena radnih značajki mjerila koncentracije lebdećih čestica (EN 13205:2001).
26. ***Prijedlog Pravilnika o maksimalno dopustivim koncentracijama štetnih tvari u atmosferi radnih prostorija i prostora (MDK) i o biološkim graničnim vrijednostima (BGV). ISBN 953-96075-0-7. (ANT, Zagreb, 1993).
27. ***Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften, Zentralstelle für Unfallverhütung und Arbeitssmedezin, ZH 1/120.41, 1989.
28. ***Technische Regeln „Holzstaub“ (Neue TRGS 533). Der Bundesminister für Arbeit und Sozialordnung Bundesarbeitsblatt, 46 – 54, 1992.

Corresponding address:

Assistant Professor ANKICA ČAVLOVIĆ, PhD

Department of Process Techniques
Faculty of Forestry
University of Zagreb
Svetošimunska 25, p.p. 422
HR-10002 Zagreb, Croatia
e-mail: kos@sumfak.hr