

Ing. Vendula DRASTICHOVÁ<sup>1)</sup>  
 Ing. Kamil KRPEC, Ph.D.<sup>2)</sup>  
 Ing. Jiří HORÁK, Ph.D.<sup>2)</sup>  
 Ing. František HOPAN, Ph.D.<sup>2)</sup>  
 Ing. Petr KUBESA<sup>2)</sup>  
 Ing. Lubomír MARTINÍK<sup>2)</sup>  
 doc. Dr. Ing. Tadeáš OCHODEK<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> VŠB – TU Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství  
<sup>2)</sup> VŠB – TU Ostrava, Výzkumné energetické centrum

Recenzent  
 doc. Ing. Jiří Hemerka, CSc.

# Produkce ultrajemných částic při spalování hnědého uhlí v různých typech kotlů malého výkonu

## Production of Ultrafine Particles by Combustion of Brown Coal in Different Types of Small Power Boilers

Znečištění ovzduší prachovými částicemi představuje závažný problém pro lidské zdraví a životní prostředí. Negativní působení ultrajemných prachových částic (částice s rozměrem menším než 100 nm) na lidské zdraví závisí např. na počtu částic, měrném povrchu částic, respirabilitě a schopnosti vázat další chemické sloučeniny (např. PAH). Příspěvek shrnuje poznatky získané při spalovacích zkouškách hnědého uhlí v malých spalovacích zařízeních. Spalovací zkoušky probíhaly v typických teplovodních kotlích při jmenovitém výkonu. Charakterizace ultrajemných prachových částic byla prováděna pomocí nízkotlakého kaskádového impaktoru DLPI.

**Klíčová slova:** ultrajemné částice, frakce částic PM<sub>x</sub>, spalování paliv, kotle malých výkonů, PAH

Air pollution caused by dust particles poses a serious problem for human health and environment. The negative effect of the ultrafine dust particles (particles with the size less than 100 nm) on the human health depends for example on the number of particles, specific surface of the particles, respirability and ability to bind other chemical compounds (e.g. PAHs). The paper summarizes findings gained from combustions tests of brown coal in small combustion devices. The combustion tests were performed in typical hot water boilers at the nominal power. The low-pressure cascade impactor DLPI was used for the characterization of the ultrafine particles.

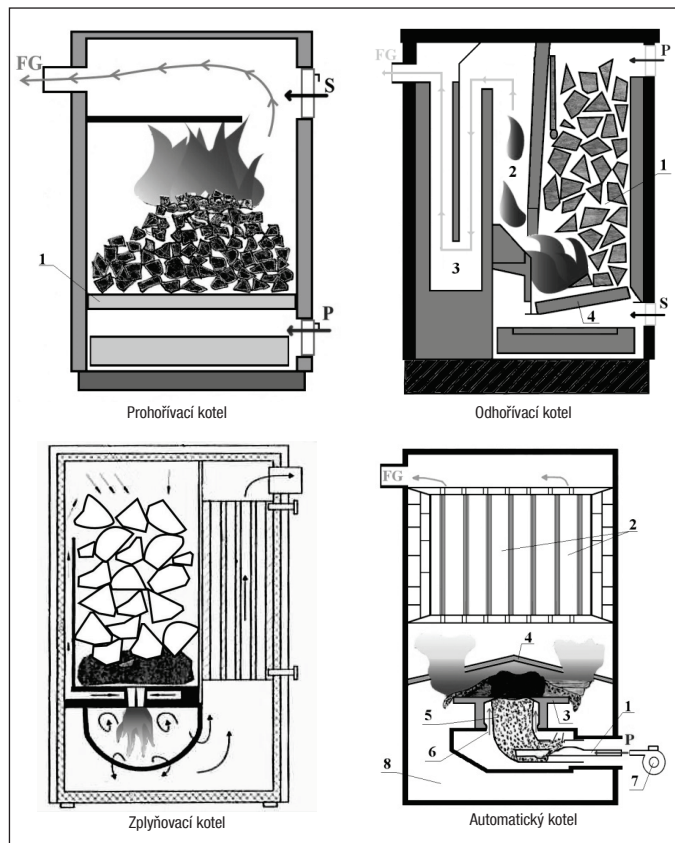
**Keywords:** ultrafine particles, fraction particles PM<sub>x</sub>, fuel combustion, small power boilers, PAH

### ÚVOD

S příchodem topné sezóny se kvalita ovzduší v mnoha regionech České republiky dramaticky zhoršuje. Ostrava ležící v Moravskoslezském kraji (MSK) patří mezi města s nejvíce znečištěným ovzduším prachovými částicemi. MSK je specifický několika faktory. Prvním faktorem je vysoká koncentrace průmyslu na malé ploše. Ostrava je také velkým dopravním uzlem regionu. Dalším faktorem je koncentrace lidských sídel na malém prostoru. Část obyvatel žije v rodinných domech, kde využívá lokální topeniště, což jsou velmi podstatné zdroje znečištění ovzduší [1,2]. Znečištění ovzduší představuje významné zdravotní riziko. Z hlediska zdravotního působení atmosférického aerosolu na člověka byly definovány velikostní skupiny částic označované jako PM<sub>x</sub> (Particulate Matter), které obsahují částice o velikosti menší než x μm. Prachové částice ovlivňují zdraví člověka více než jiné polutanty (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> atd.). Byl prokázán vztah mezi vysokými dávkami prachových částic (PM<sub>10</sub> a PM<sub>2,5</sub>) a zvýšenou mortalitou [3]. Současné studie [4,5,6,7] poukazují na hlubší depozici menších částic (PM<sub>1</sub> a PM<sub>0,1</sub>) v plicích a na transport ultrajemných částic (menších než 100 nm, UFP, PM<sub>0,1</sub>) krevním řečištěm až do specifických orgánů (játra, srdce, slezina...). Menší částice tak jsou nebezpečnější než částice větší o stejné hmotnosti. Díky svému většímu aktivnímu povrchu lépe sorbují nebezpečné látky (PAH, kovy atd.).

Současné poznatky týkající se malých spalovacích zařízení ukazují, že je nutné zaměřit se, ze zdravotního hlediska, na vzorkování a záchyt částic menších než 1 μm, neboť přibližně 90 % všech částic je obsaženo ve frakci PM<sub>1</sub> [8,9]. Ze zdravotního hlediska je důležité věnovat pozornost také chemickému složení částic (sorbovaným škodlivinám na částicích), neboť např. dle oficiální bilance emisí v ČR za rok 2012 [10] spalovací zdroje v sektoru lokálního vytápění domácností vyprodukovaly 90 % emisí B(a)P, který je dle Mezinárodní agentury pro výzkum rakoviny (International Agency for Research of Cancer, IARC) [11] prokázaným lidským karcinogenem.

Příspěvek se proto zaměřuje na produkci PM<sub>1</sub> a PM<sub>0,1</sub> ze spalování hnědého uhlí v malých spalovacích zařízeních s ohledem na sorbované PAH na těchto frakcích. Hnědé uhlí (HU) bylo zvoleno s ohledem na jeho velkou oblibu při vytápění českých domácností tuhými palivy. V MSK



Obr. 1 Použitá spalovací zařízení

v roce 2011 byla tato spotřeba cca 60 000 t/rok [12]. Bylo použito hnědé uhlí s označením ořech 1 (HU O1, granulometrie cca 4 cm) a ořech 2 (HU O2, granulometrie cca 2 cm).

## EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### Použité spalovací zařízení

Při spalovacích zkouškách byly použity kotle s prohořivacím způsobem spalování, odhořivacím způsobem spalování, automatický kotel a zplyňovací kotel. Schémata použitých kotlů jsou uvedeny na obr. 1.

### Způsob vzorkování prachových částic a analýzy PAH

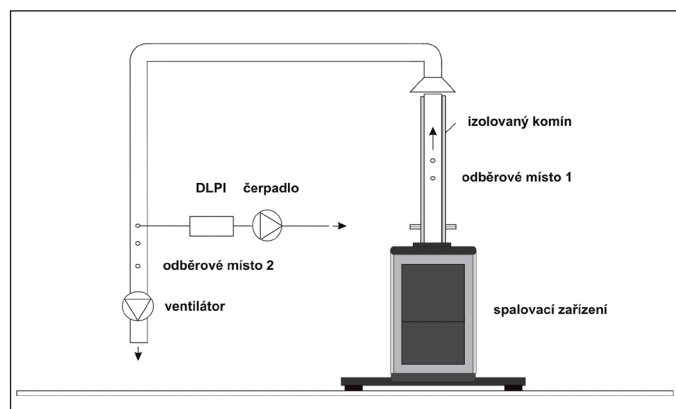
Jemné a ultrajemné částice byly odebrány v odběrovém místě 2 (viz obr. 2) vzorkovací trasy, pomocí nízkotlakého kaskádového impaktoru DLPI (viz obr. 3). Impaktor separuje částice (30 nm – 10  $\mu$ m, 13 pater) s využitím setrvačného principu (impakce částic na protilehlou plochu) [13]. Impaktor byl během odběrů vyhříván na teplotu 100 °C (teplota spalin v ředicím tunelu byla stejná nebo nižší než teplota impaktoru). Vzorkovací trasa umožňuje odebrat veškeré spaliny vycházející ze spalovacího zařízení a ředit spaliny vzduchem z laboratoře. Ředění spalin umožňuje přizpůsobit koncentraci prachových částic možnostem impaktoru DLPI (hmotnostní koncentrace prachových částic, teplota vstupního vzorku). Výsledné ředění použité během spalovacích zkoušek bylo stanoveno pomocí poměru koncentrace CO<sub>2</sub> za spalovacím zařízením (odběrové místo 1) a ve vzorkovací trase (odběrové místo 2).

Impakční fólie („collection substrates“, AL fólie) z pater nízkotlakého kaskádového impaktoru byly před měřením nastříkány Apiezonem (pro zabránění přepadu částic z vyššího patra na nižší). Po zaschnutí Apiezonu a po měření byly impakční fólie zváženy na laboratorních mikrováhách Mettler Toledo XP6. Navážka na příslušných patrech kaskádového impaktoru byla po měření sečtena tak, aby bylo možno vypočítat koncentrace PMx.

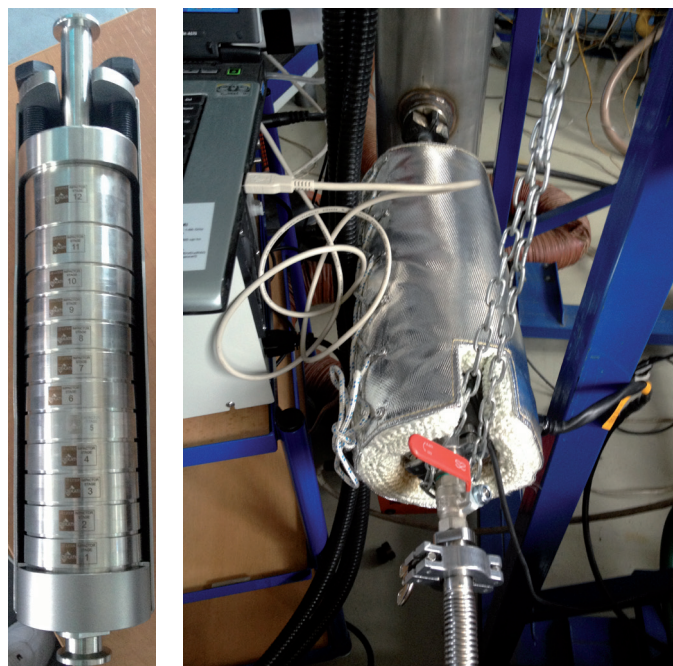
Po zjištění záchytu částic byly impakční fólie transportovány do analytické laboratoře, kde byly stanoveny koncentrace PAH.

### Měření plynných emisí

Během měření bylo měřeno složení spalin v odběrovém místě 1 a odběrovém místě 2. Pro měření byly použity kontinuální analyzátory spalin ABB. Koncentrace CO a CO<sub>2</sub> byla stanovena metodou absorpce infračerveného záření. Koncentrace O<sub>2</sub> byla stanovena na základě paramagnetických vlastností kyslíku.



Obr. 2 Připojení spalovacího zařízení na vzorkovací trasu a označení odběrového místa



Obr. 3 Nízkotlaký kaskádový impaktor DLPI

### Použitá paliva

Při spalovacích zkouškách byly použity dva druhy hnědého uhlí, běžně používané uživateli malých spalovacích zařízení. Rozbor obou použitých paliv je uveden v tab. 1.

Tab. 1 Rozbor použitých paliv (surový stav)

	Hnědé uhlí O1	Hnědé uhlí O2
Výhřevnost [MJ/kg]	22,61	25,84
C [% <sub>hm</sub> ]	54,62	61,72
H [% <sub>hm</sub> ]	4,46	5,10
N [% <sub>hm</sub> ]	0,76	0,90
O [% <sub>hm</sub> ]	19,05	14,44
S [% <sub>hm</sub> ]	0,75	1,36
W [% <sub>hm</sub> ]	15,51	9,04
A [% <sub>hm</sub> ]	4,87	7,45

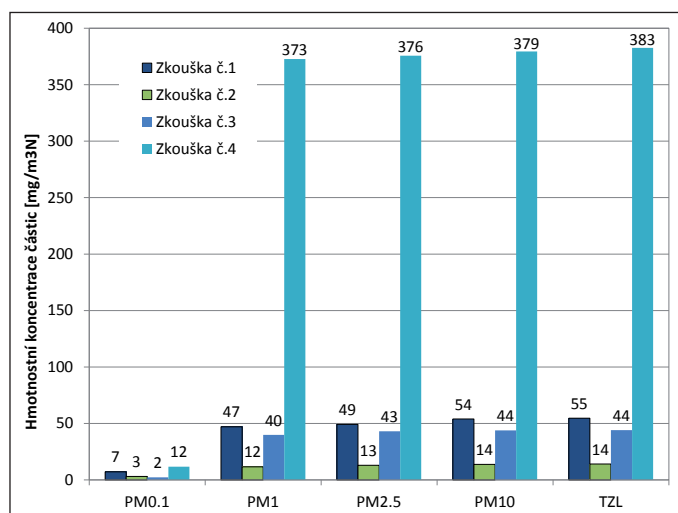
## Výsledky

Celkem byly provedeny 4 spalovací zkoušky:

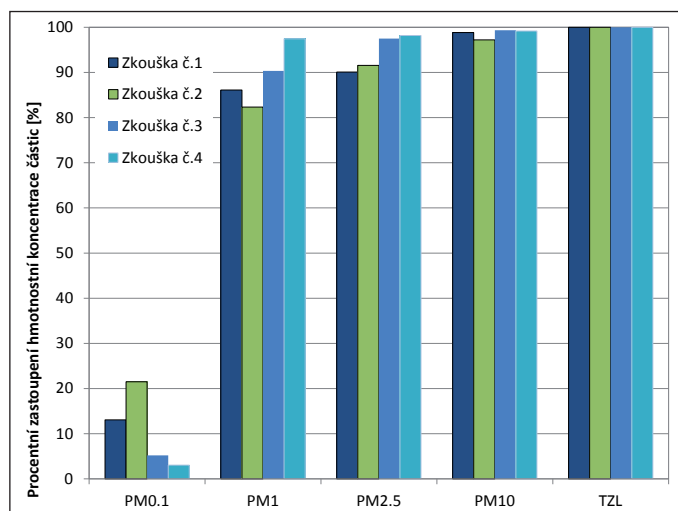
- Zkouška č. 1 – automatický kotel, hnědé uhlí O2, jmenovitý výkon.
- Zkouška č. 2 – zplyňovací kotel, hnědé uhlí O1, jmenovitý výkon.
- Zkouška č. 3 – odhořivací kotel, hnědé uhlí O1, jmenovitý výkon.
- Zkouška č. 4 – prohořivací kotel, hnědé uhlí O1, jmenovitý výkon.

Na obr. 4 je graficky znázorněna hmotnostní koncentrace jednotlivých frakcí částic PMx. Největší hmotnostní koncentrace tuhých znečišťujících látek (TZL) byla naměřena na prohořivacím kotli. Z obr. 5 je zřejmé, že částice PM1 tvoří cca 80 až 98 % z TZL. Tento závěr potvrzují i předchozí studie [9,14]. Z výsledků spalovacích zkoušek vyplývá, že procentní zastoupení ultrajemných částic (UFP, PM0,1) je v průměru méně než 10 % hm. Obr. 5 ukazuje, že charakteristika PM je u starších kotlů (prohořivací, odhořivací) jiná než u moderních kotlů (automatické a zplyňovací). Emise TZL u moderních kotlů měly větší procentní zastoupení ultrajemné frakce (PM0,1) než u starších kotlů.

V tab. 2 a tab. 3 je uvedena hmotnostní koncentrace 10 PAH na PM0,1 a PM1 a procenta adsorpce 10 PAH na UFP z PM1. PAH se lépe sorbují na UFP při spalování v automatickém, zplyňovacím a prohořivacím kotli. U odhořivacího kotle bylo na UFP zjištěno jen 1 % PAH. U prohořivacího kotle byla zjištěna nejvyšší koncentrace částic PM0,1 a také vysoké procento adsorpce PAH na této frakci. PAH se vytvářejí především při



Obr. 4 Hmotnostní koncentrace jednotlivých frakcí částic při  $O_{2,ref} = 10\%$  (v suchých spalínách při 101 325 Pa a 0 °C)



Obr. 5 Procentní zastoupení PM0,1 v TZL

nedokonalém spalování, což je spojeno s produkcí CO. Obr. 6 ukazuje, že největší produkci CO má právě prohořivací kotel.

Tab. 2 Hmotnostní koncentrace 10 PAH na PM0,1 a PM1 (při  $O_{2,ref} = 10\%$ ) v suchých spalínách při 101 325 Pa a 0 °C

Zkouška č.	Hmotnostní koncentrace 10 PAH na PM		Seznam vyhodnocovaných PAH
	PM0,1 [mg/m³ <sub>u</sub> ]	PM1 [mg/m³ <sub>u</sub> ]	
1	2	11	fluoranten, pyren, benzo(a)antracen, chrysen, benzo(b)fluoranten, benzo(k)fluoranten, benzo(a)pyren, indeno(123-cd)pyren, dibenzo(ah)antracen, benzo(ghi)perylen
2	1	2	
3	2	373	
4	10	12	

Tab. 3 Procentní zastoupení 10 PAH na PM0,1 z PM1

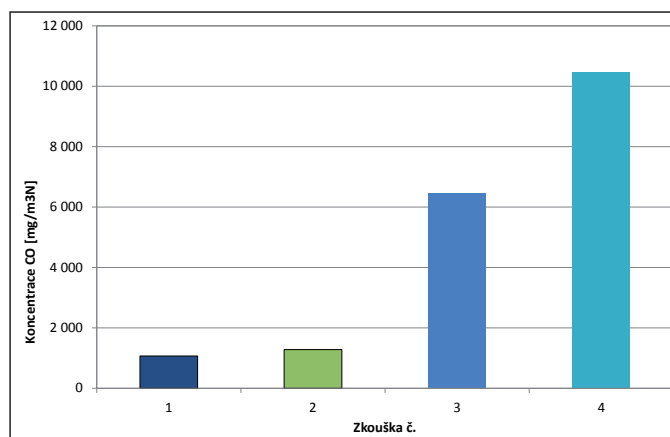
Zkouška č.	Procentní zastoupení 10 PAH na PM0,1 z PM1	
	PM0,1 [%]	PM1 [%]
1	19	100
2	60	100
3	1	100
4	82	100

## ZÁVĚR

Kvalita spalování HU v prohořivacím kotli je výrazně horší než spalování v dalších třech typech kotlů. To se projevilo nejenom na produkci CO, ale také na produkci TZL. Tyto výsledky podporují dřívější zjištění, která ukazovala, že měrné výrobní emise TZL ze spalování hnědého uhlí závisí hlavně na podmínkách hoření a provozu samotného zařízení [15].

U automatických a zplyňovacích kotlů byly celkové emise TZL nižší, ale jejich velikostní distribuce byla odlišná od distribuce zjištěné u kotlů prohořivacích nebo odhořivacích. Emise TZL z moderních kotlů měly vyšší zastoupení PM0,1. Kotle staré i nové konstrukce při spalování hnědého uhlí produkovaly podobné množství UFP.

V kotlích bylo spalováno tříděné hnědé uhlí typů ořech 1 a ořech 2 s ohledem na konstrukci ohniště, rozměry roštů a způsob dopravy. Obě paliva obsahovala jen minimální podíl jemné frakce – byla dobře vytržiděná. Ořech 2, který byl spalován v automatickém kotli, měl vyšší podíl popeloviny (7,5 %) než ořech 1 (4,9 %), což mohlo mít vliv na relativně vyšší koncentrace TZL ve spalínách z automatického kotle.



Obr. 6 Koncentrace CO při  $O_{2,ref} = 10\%$  (v suchých spalínách při 101 325 Pa a 0 °C)

V současnosti jsou legislativně (v imisích) sledovány pouze PM10 a PM2,5. Ty však nejsou pro lidské zdraví tak důležité jako částice PM1 a PM0,1. Lze předpokládat, že v budoucnu bude větší tlak na sledování částic PM1 a PM0,1 (v imisích). Z pohledu legislativy platné pro emise jsou zatím sledovány pouze emise TZL bez rozlišení velikosti.

Kontakt na autora: [vendula.drastichova@vsb.cz](mailto:vendula.drastichova@vsb.cz)

Poděkování: Tento článek vznikl za podpory projektu SP2015/132 Emise jemných částic z antropogenních činností (vytápění domácností, brzděné procesy automobilů), LD1403 Inovace pro efektivitu a životní prostředí – growth a LD14041 Expozice nanomateriálům, hodnocení a management rizik v souvislosti s QSAR/QNTR.

#### Použité zdroje:

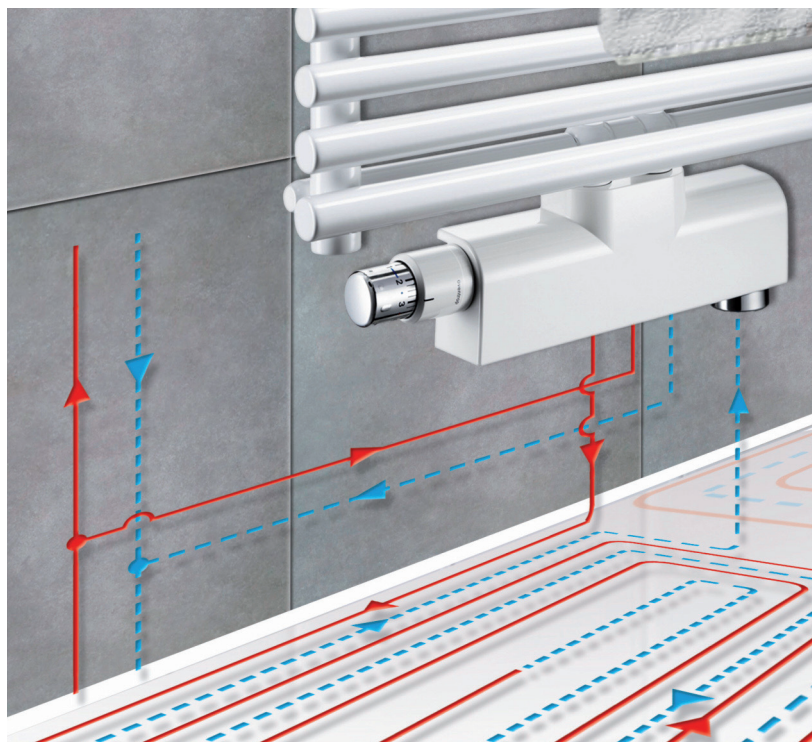
- [1] Český hydrometeorologický ústav [online]. 2014 [cit. 2014-09-09]. Dostupné z: [http://chmu.cz/portal/dt?portal\\_lang=cs&menu=JSPTabContainer/P3\\_0\\_Informace\\_pro\\_Vas/P3\\_17\\_Vyuka\\_a\\_prezentace&last=false](http://chmu.cz/portal/dt?portal_lang=cs&menu=JSPTabContainer/P3_0_Informace_pro_Vas/P3_17_Vyuka_a_prezentace&last=false)
- [2] EEA. Air quality in Europe — 2014 report. In: European Environment Agency [online]. Denmark, 2014 [cit. 2015-03-06]. ISBN 978-92-9213-490-7. ISSN 1725-9177. DOI: 10.2800/22847. Dostupné z: <http://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2014>
- [3] WHO. Ambient (outdoor) air quality and health, Fact sheet N°313. In: World Health Organization [online]. 2014 [cit. 2015-03-07]. Updated March 2014. Dostupné z: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/en/>
- [4] G. OBERDORSTER, E. OBERDORSTER, J. OBERDORSTER. Nanotoxicology: An Emerging Discipline Evolving from Studies of Ultrafine Particles. *Environmental Health Perspectives*. 2005, vol. 113, issue 7, p. 823-839.
- [5] I. OBERNBERGER, T. BRUNNER, G. BARNTHALER. Fine particle emissions from Modern Austrian small scale biomass combustion plants. 15th European biomass conference and exhibition. 2007, Germany, p. 1546-57.
- [6] ICRP. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. A Report of a Task Group of the International Commission on Radiological Protection. In: International Commission on Radiological Protection. 1994, Oxford: Pergamon, ICRP Publication 66.
- [7] K. DONALDSON, L. TRAN, L. A. JIMENEZ, R. DUFFIN, D. E. NEWBY, N. MILLS, W. MACNEE, V. STONE. Combustion-derived nanoparticles: a review of their toxicology following inhalation exposure part. *Particle and Fibre Toxicology*. 2005, Vol. 2, issue 10.
- [8] J. TISSARI, K. HYTÖNEN, J. LYYRÄNEN, J. JOKINIEMI. A novel field measurement method for determining fine particle and gas emissions from residential wood combustion. *Atmospheric Environment*. 2007, vol. 41, issue 37, p. 8330-8344.
- [9] L. MARTINÍK, V. DRASTICHOVÁ, J. HORÁK, Z. JANKOVSKÁ, K. KRPEC, P. KUBESA, F. HOPAN, Z. KALIČÁKOVÁ. Combustion of waste biomass in small devices. *Chemické listy*. 2014, vol. 108, issue 2/2014, p. 156-162.
- [10] ČHMÚ. Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2013. Český hydrometeorologický ústav [online]. 2014 [cit. 2015-03-07]. Dostupné z: [http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/13groc/gr13cz/Obsah\\_CZ.html](http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/13groc/gr13cz/Obsah_CZ.html)
- [11] IARC. Agents Classified by the IARC Monographs - Lists of classifications sorted by Group [online]. Lyon: International Agency for Research on Cancer, last updated 2015-02-15 [cit. 2015-03-09]. Dostupné z: <http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/ClassificationsGroupOrder.pdf>
- [12] Český hydrometeorologický ústav [online]. 2015 [cit. 2014-03-01]. Dostupné z: <http://chmu.cz/>
- [13] DLPI user manual ver. 3.62, Finland: Dekati, 2010.
- [14] C. BOMAN, A. NORDIN, R. WESTERHOLM, E. PETTESSON. Evaluation of a constant volume sampling setup for residential biomass fired appliances—influence of dilution conditions on particulate and PAH emissions. *Biomass and Bioenergy*. 2005, vol. 29, issue 4, p. 258-268.
- [15] M. ŠYC, J. HORÁK, F. HOPAN, K. KRPEC, T. TOMŠEJ, T. OCELKA, V. PEKÁREK. The Effect of Fuels and Domestic Heating Appliances' Types on Emission Factors of Selected Organic Pollutants. *Environmental Science & Technology*. 2011, issue 45, 9427-9434. ■

# oventrop



## Armatury + systémy Premium

### Přípojovací armatura „Multiblock T-RTL“ pro kombinaci otopného tělesa a plošného vytápění



Přípojovací armatura Oventrop „Multiblock T-RTL“ je kombinací termostatického ventilu s přednastavením, uzavíracím šroubením a omezovačem teploty zpátečky (RTL) pro použití ve dvoutrubkové soustavě.

Termostatický ventil s namontovanou termostatickou hlavicí reguluje ve spojení s otopným tělesem prostorovou teplotu. Teplota regulace plošného vytápění není ovlivněna termostatickým ventilem, ale omezením teploty zpátečky prostřednictvím omezovače teploty zpátečky (RTL).

Výhody:

- ideální kombinace pro otopná tělesa a plošné vytápění
- samostatná regulace otopného tělesa a plošného vytápění jednou armaturou
- přednastavení průtoku / nastavení teploty zpátečky plošného vytápění

Pro více informací nás prosím kontaktujte:

OVENTROP GmbH & Co. KG  
Jan Kadleček  
Kněžskodvorská 2544 (budova 2632)  
CZ-370 04 České Budějovice  
Telefon +420 38 38 32 555 - 6  
Telefax +420 38 38 32 557  
Internet [www.oventrop.cz](http://www.oventrop.cz)  
E-Mail [kadlecek@oventrop.cz](mailto:kadlecek@oventrop.cz)