

POSÚDENIE VPLYVU HUSTOTY TEPELNÉHO TOKU NA PROCES HORENIA POLYETYLÉNU

JOZEF MARTINKA¹ – TOMÁŠ CHREBET¹ – EMÍLIA HRONCOVÁ²
– KATARÍNA BACIGÁLOVÁ¹

¹ Slovenská technická univerzita v Bratislave, Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave, Ústav bezpečnostného a environmentálneho inžinierstva, Paulínska 16, 917 24 Trnava, e-mail: jozef.martinka@stuba.sk, tomas.chrebet@stuba.sk, kbacigalova@gmail.com

² Technická univerzita vo Zvolene, Fakulta ekológie a environmentalistiky, Katedra environmentálneho inžinierstva, T. G. Masaryka 24, 960 53 Zvolen, e-mail: emilia.hroncova@tuzvo.sk

ABSTRACT

Martinka, J., Chrebet, T., Hroncová, E., Bacigálová, K.: Influence of heat flux density on combustion process of polyethylene evaluation

This article deals with the influence of heat flux density on low density polyethylene (LDPE) burning process evaluation. There has been determined influence of heat flux density on maximum heat release rate, averaged heat release rate, effective heat of combustion and carbon monoxide yield by cone calorimeter. The samples of LDPE have been loaded by three heat flux densities (20, 30 and 40) kW/m². The obtained results indicate the increasing of maximum heat release rate, averaged heat release rate and carbon monoxide with increasing of heat flux density. The effective combustion heat has been independent on heat flux density. Moreover obtained results indicate a relative strong statistical dependence of carbon monoxide mass flow rate on sample mass loss rate and heat release rate.

Key words: Combustion process of polyethylene, heat flux density, emission minimisation, fire risk of materials, fire investigation

ÚVOD

Proces horenia závisí od chemického zloženia a fyzikálnych vlastností horiaceho materiálu (paliva) a vonkajších podmienok v ktorých horenie prebieha (podobné myšlienky uvádzajú, napr. Osvald, 1997 a Osvald a Osvaldová 2003). Vonkajšie podmienky sú reprezentované predovšetkým vlastnosťami oxidačnej atmosféry (teplota, rýchlosť prúdenia, koncentrácia oxidačného prostriedku, tlak a vlhkosť) a hustotou tepelného toku dopadajúceho na povrch horiaceho materiálu. Hustota tepelného toku dopadajúceho na povrch paliva, v priemyselnom spaľovacom zariadení alebo za podmienok reálneho požiaru, závisí od chemického zloženia horiaceho materiálu, ako aj geometrie a tepelno-technických vlastností ohraničujúcich konštrukcií (spaľovacieho priestoru alebo požiarneho úseku).

Výskumom vplyvu vonkajších podmienok na proces iniciácie tuhých materiálov a proces ich horenia sa zaoberalo viacero vedeckých prác. Vplyv oxidačnej atmosféry na proces iniciácie a horenia vybraných organických polymérov (predovšetkým lignocelulóзовých materiálov) podrobne popísali Martinka et al. (2012a, 2012b), Dzurenda a Jandačka (2010), Horbaj a Kizek (2006), Ladomerský (2000) a Ladomerský et al. (1993). Výsledky prác citovaných autorov naznačujú silný vplyv koncentrácie kyslíka a rýchlosti prúdenia oxidačnej atmosféry na proces iniciácie a horenia organických polymérov. Prezentované výsledky ďalej potvrdzujú, že dostatočný prístup vzduchu na horenie je len nutnou, nie však postačujúcou podmienkou na to, aby proces horenia prebiehal dokonalým spôsobom (tento záver platí predovšetkým pri horení materiálu mimo spaľovacieho zariadenia, napr. pri podmienkach požiaru). Vplyv

teploty oxidačnej atmosféry a hustoty tepelného toku na iniciáciu procesu horenia vybraných drevných materiálov stanovili, napr. Tereňová (2010) a Zachar (2010).

Relatívne málo vedeckých prác sa zaoberalo exaktným posúdením vplyvu hustoty tepelného toku, dopadajúceho na povrch materiálu, na proces horenia a výťažok hlavných spodín horenia (hlavných z hľadiska účinnosti horenia, ako aj toxicity). Exaktné poznanie vplyvu hustoty tepelného toku na výťažok hlavných spodín horenia má veľký význam pre minimalizáciu emisií pri priemyselnom spaľovaní, ako aj pre požiarne inžinierstvo a čiastkové úlohy zisťovania príčin vzniku požiarov. Pri priemyselnom spaľovaní, ako aj za podmienok požiaru, závisí hustota tepelného toku dopadajúceho na povrch horiaceho materiálu od rýchlosti uvoľňovania tepla, možnosti odvodu tepla z priestoru v ktorom horenie prebieha konvekciou a radiáciou, ako aj tepelno-technických vlastností ohraničujúcich konštrukcií (spaľovacieho zariadenia alebo požiarneho úseku). Výťažok úplne nezoxidovaných produktov, pri horení termoplastov, narastá s narastajúcou hustotou externého tepelného toku. Tento jav je spôsobený faktom, že s narastajúcou hustotou tepelného toku narastá aj rýchlosť termického rozkladu materiálu (rýchlosť úbytku hmotnosti). Od určitej hranice rýchlosti termického rozkladu pôvodné množstvo privádzaného vzduchu (prípadne prirodzené prisávanie vzduchu z okolia do zóny horenia) nepostačuje na zabezpečenie dokonalého horenia. S narastajúcou hustotou tepelného toku klesá aj čas zdržania rozkladných produktov v zóne horenia (následkom rýchlejšej tvorby rozkladných produktov), čoho následkom rovnako narastá výťažok produktov nedokonalého horenia. Odlišným spôsobom sa správajú materiály, ktoré pri horení vytvárajú tuhý uhlíkový zvyšok (napr. drevné materiály). Rýchlosť termického rozkladu (úbytku hmotnosti) uvedených materiálov tiež narastá s hustotou tepelného toku, ale nie tak výrazne ako u termoplastov. Zvýšená hustota tepelného toku v určitých intervaloch môže preto urýchliť oxidáciu rozkladných produktov až na oxid uhličitý a vodu a teda naopak zvýšiť účinnosť horenia. Pri exaktnom posudzovaní vplyvu hustoty tepelného toku na účinnosť horenia drevných materiálov je však potrebné byť mimoriadne opatrný, nakoľko účinnosť horenia závisí od množstva faktorov.

Cieľom predloženého príspevku je exaktné posúdiť vplyv hustoty externého tepelného toku na rýchlosť uvoľňovania tepla a výťažok oxidu uhoľnatého pri horení nízko-hustotného polyetylé-

nu (LDPE). Rýchlosť uvoľňovania tepla je podľa Babrauskasa (2003) najlepším ukazovateľom požiarneho rizika materiálu. Oxid uhoľnatý je hlavnou zložkou spodín horenia z hľadiska toxicity, ako aj účinnosti horenia. Ďalším cieľom je posúdiť závislosť okamžitého hmotnostného toku oxidu uhoľnatého (v spodinách horenia) od rýchlosti úbytku hmotnosti vzorky a rýchlosti uvoľňovania tepla pri horení LDPE zaťaženého externým tepelným tokom s hustotami (20, 30 a 40) kW/m².

MATERIÁL A METÓDY

Na výskum bol použitý čistý nízko-hustotný polyetylén (LDPE) vo forme granúl s rozmermi v intervale (1 až 3) mm. Hustota skúmaného polyetylénu bola stanovená pyknometricky na 930 kg/m³. Pred samotnou skúškou bola pre skúmaný materiál stanovená, metódou termogravimetrickej analýzy, teplota tavenia (135 °C), teplota vzplanutia (360 °C) a teplota vznietenia (390 °C) skúšobným postupom podľa STN ISO 871:2010 a spalné teplo (46,7 MJ/kg) skúšobným postupom podľa STN EN ISO 1716:2010.

Rýchlosť uvoľňovania tepla (HRR), hmotnostný tok oxidu uhoľnatého (MF CO), celkový výťažok oxidu uhoľnatého a rýchlosť úbytku hmotnosti vzorky (MLR) boli merané na kónickom kalorimetri, skúšobným postupom podľa ISO 5660-1:2002. Uvedené parametre boli merané pri troch hustotách tepelného toku (20, 30 a 40) kW/m². Na každé meranie sa použila vzorka s hmotnosťou (50 ± 0,1) g. Vzorka bola vo forme granúl nasýpaná v miske s rozmermi (100 × 100) mm, ale plocha na ktorej prebiehalo odhorievanie bola zmenšená nástavcom na 88,4 cm². Meranie pre každú hustotu tepelného toku bolo opakované päť krát a ako výsledná je uvádzaná priemerná hodnota. Každá skúška trvala do úplného zhorenia skúmaného materiálu.

VÝSLEDKY A DISKUSIA

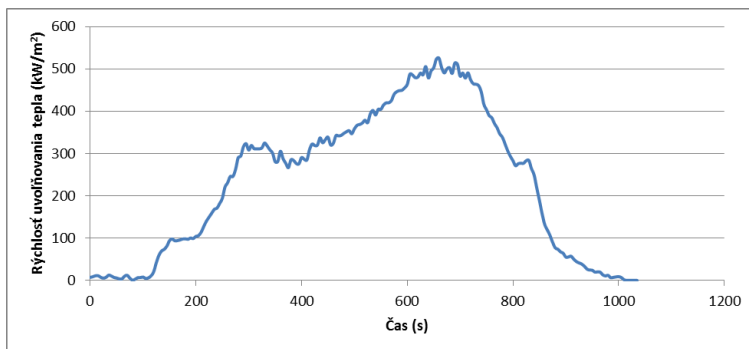
Vzorky skúmaného nízko-hustotného polyetylénu (LDPE) sa následkom pôsobenia tepelných tokov s hustotami (20, 30 a 40) kW/m² roztavili a následne počas skúšky vykazovali správanie podobné správaníu horľavých kvapalín. Pri všetkých skúmaných hustotách tepelných tokov bola prekročená izokinetická teplota skúmaného PE (nad izokineticou teplotou syntetického polyméru začína zdanlivý var jeho povrchovej vrstvy).

Navyše pri hustotách tepelných tokov (30 a 40) kW/m^2 , bola počas skúšky (vo fáze horenia vzorky) dosiahnutá teplota varu vzniknutej taveniny.

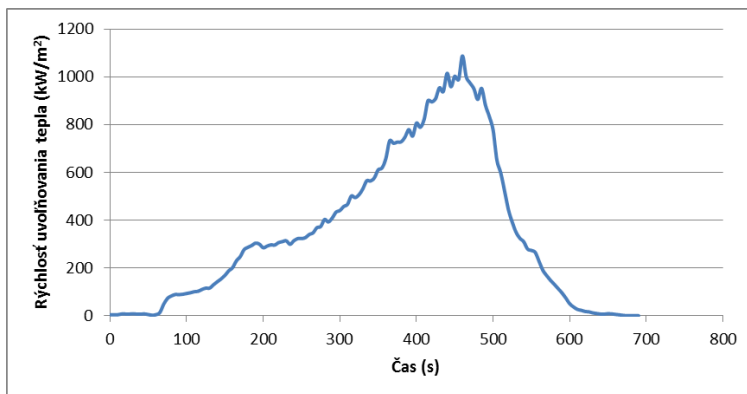
Rýchlosť uvoľňovania tepla skúmaného PE, pri tepelných tokoch (20, 30 a 40) kW/m^2 , je znázornená na obrázkoch 1, 2 a 3. Už z vizuálnej analýzy uvedených obrázkov vyplýva, že narastajúca hustota tepelného toku mala významný vplyv na nárast rýchlosti termického rozkladu (úbytku hmotnosti) skúmaného materiálu. Hustota externého tepelného toku však mala iba štatisticky nevýznamný vplyv na celkové uvoľnené teplo (výhrevnosť) za podmienok skúšky (EHC). Celkové uvoľnené teplo pre hustotu tepelného toku 20 kW/m^2 bolo 33,35 MJ/kg, pre hustotu tepelného toku 30 kW/m^2 , 32,14 MJ/kg a pre tepelný tok s hustotou 40 kW/m^2 bolo celkové uvoľnené teplo za podmienok skúšky 32 MJ/kg. K nezávislosti celkového uvoľneného tepla od hustoty externého tepelného toku dospeli aj Luche et al. (2012), ktorí skúmali polyetylén typu HDPE. Citovaný

autorský kolektív však pre nami skúmané hustoty tepelných tokov uvádza celkové uvoľnené teplo v intervale (40,7 až 41,8) MJ/kg. Uvedený rozdiel bol pravdepodobne spôsobený významným vplyvom distribúcie molekulových hmotností polyetylénu na proces jeho horenia. Pokles celkového uvoľneného tepla počas skúšky s narastajúcou hustotou externého tepelného toku indikuje pokles účinnosti horenia a nárast výťažku produktov nedokonalého horenia skúmaného materiálu s narastajúcou hustotou externého tepelného toku (v skúmanom intervale).

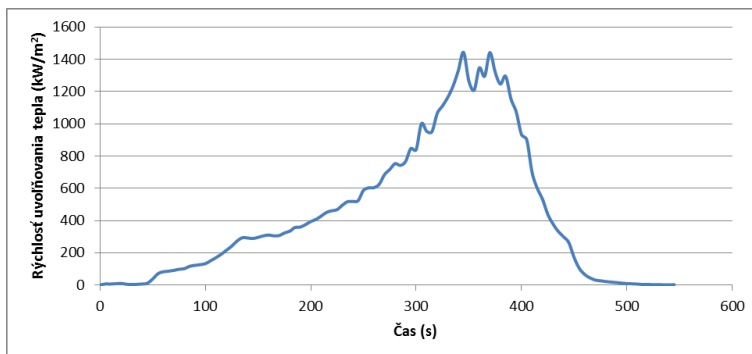
Ďalším významným vyhodnocovaným parametrom bola závislosť priemernej rýchlosti uvoľňovania tepla od hustoty externého tepelného toku. Pri externom tepelnom toku 20 kW/m^2 bola priemerná rýchlosť uvoľňovania tepla 233,6 kW/m^2 , pri hustote tepelného toku 30 kW/m^2 narástla na 347,18 kW/m^2 a pri hustote tepelného toku 40 kW/m^2 sa zvýšila až na 434,23 kW/m^2 . Uvedený nárast priemernej rýchlosti uvoľňovania tepla



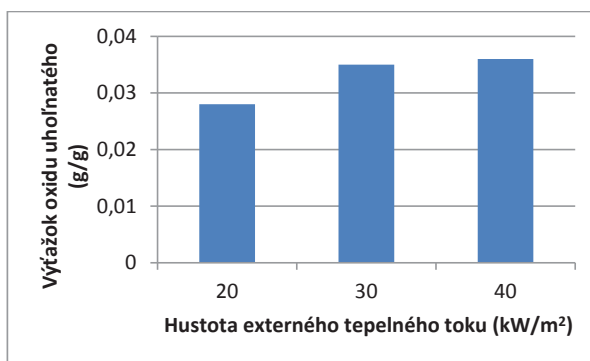
Obr. 1 Rýchlosť uvoľňovania tepla zo skúmaného LDPE zaťaženého tepelným tokom 20 kW/m^2
Fig. 1 Heat release rate of investigated LDPE loaded by heat flux 20 kW/m^2



Obr. 2 Rýchlosť uvoľňovania tepla zo skúmaného LDPE zaťaženého tepelným tokom 30 kW/m^2
Fig. 2 Heat release rate of investigated LDPE loaded by heat flux 30 kW/m^2



Obr. 3 Rýchlosť uvoľňovania tepla zo skúmaného LDPE zaťaženého tepelným tokom 40 kW/m^2
 Fig. 3 Heat release rate of investigated LDPE loaded by heat flux 40 kW/m^2



Obr. 4 Vplyv hustoty tepelného toku na výťažok oxidu uhľoňatého
 Fig. 4 Influence of heat flux on carbon monoxide yield

s narastajúcou hustotou externého tepelného toku možno, v kontexte nezávislosti celkového uvoľneného tepla od hustoty tepelného toku, vysvetliť rýchlejšim rozkladom materiálu pri vyššej hustote tepelného toku.

Celkový výťažok oxidu uhľoňatého bol vypočítaný z jeho priemerného hmotnostného toku, času trvania skúšky a hmotnosti vzorky. Vplyv hustoty tepelného toku na výťažok oxidu uhľoňatého (v skúmanom intervale 20 až 40 kW/m^2) ilustruje obrázok 4.

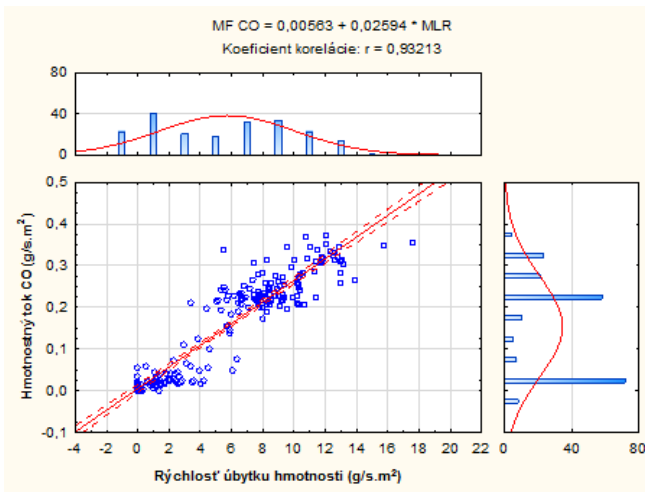
Údaje z obrázku 4 potvrdzujú, že v skúmanom intervale hustôt tepelných tokov narastá výťažok oxidu uhľoňatého s narastajúcou hustotou tepelného toku. Uvedený záver môže byť zovšeobecnený pre termoplasty. Organické polyméry, ktoré pri horení na svojom povrchu vytvárajú tuhý uhlíkový zvyšok (napr. drevné materiály) vo väčšine prípadov vykazujú pokles výťažku oxidu uhľoňatého s narastajúcou hustotou externého te-

pelného toku. Touto problematikou sa podrobne zaoberajú Shi a Chew (2012). Tento jav je spôsobený skutočnosťou, že pri týchto druhoch materiálov narastajúca hustota externého tepelného toku nespôsobí tak významný nárast rýchlosti ich termického rozkladu ako pri termoplastoch. Zvýšená hustota tepelného toku preto urýchli oxidáciu rozkladných produktov až na oxid uhľičitý a vodu.

Už na základe vizuálnej analýzy údajov na obrázkoch 1 až 4 možno predpokladať, že nárast výťažku oxidu uhľoňatého je úmerný nárastu rýchlosti úbytku hmotnosti vzorky (čas poklesu rýchlosti uvoľňovania tepla na nulovú hodnotu je, pri zanedbaní zotrvačnosti analyzátorov O_2 , CO_2 a CO , totožný s časom úplného zhorenia vzorky). Na uvedenom základe možno vysloviť hypotézu, že pri horení skúmaného materiálu závisí výťažok oxidu uhľoňatého len od okamžitého ekvivalentného pomeru, resp. súčiniteľa nadbytku vzduchu.

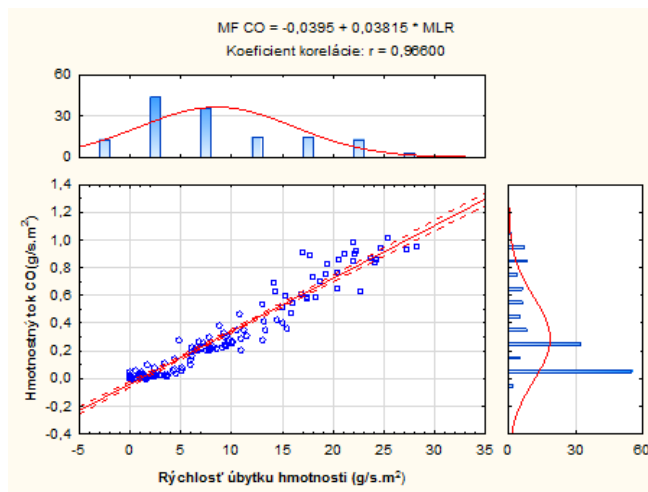
Pri horení skúmaného materiálu za podmienok skúšky dochádzalo pri zvyšovaní hustoty tepelného toku k jeho rýchlejšiemu termickému rozkladu (úbytku hmotnosti), ale množstvo prisávaného vzduchu z okolia sa takmer nemenilo (približne 24 l/s). Z uvedeného vyplýva, že s narastajúcou rýchlosťou úbytku hmotnosti vzorky narastal ekvivalentný pomer, resp. klesal súčiniteľ nadbytku vzduchu. Pre potvrdenie uvedenej hypotézy bola posúdená štatistická závislosť okamžitého hmotnostného toku (MF) CO od rýchlosti úbytku

hmotnosti (MLR) na obrázkoch 5 až 7. Štatistická závislosť celkového hmotnostného toku CO od rýchlosti uvoľňovania tepla (HRR) ilustrujú obrázky 8 až 10. Definitívny záver je však možné vysloviť až na základe vypočítaných koeficientov determinácie r^2 . Koeficient determinácie pre štatistickú závislosť okamžitého hmotnostného toku CO od rýchlosti uvoľňovania tepla boli pre všetky skúmané podmienky nad 0,95 (čo dokazuje veľmi silnú štatistickú závislosť). Pri hustote tepelného toku 20 kW/m² bol koeficient determinácie



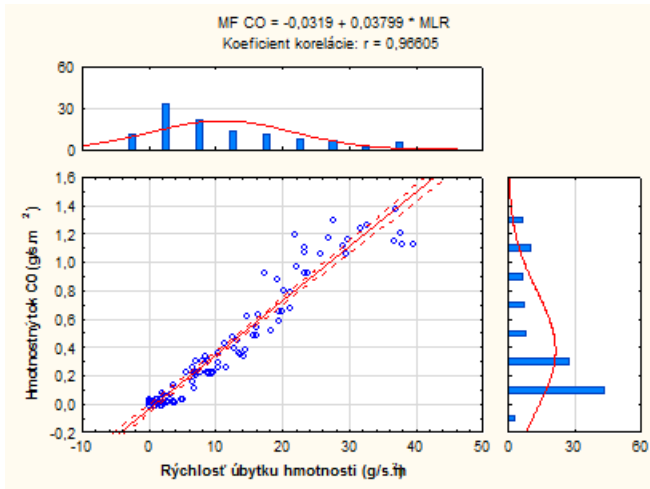
Obr. 5 Štatistická závislosť hmotnostného toku CO od rýchlosti úbytku hmotnosti vzorky PE pri hustote tepelného toku 20 kW/m²

Fig. 5 Statistical dependence of CO mass flow rate on PE sample mass loss rate loaded by heat flux 20 kW/m²



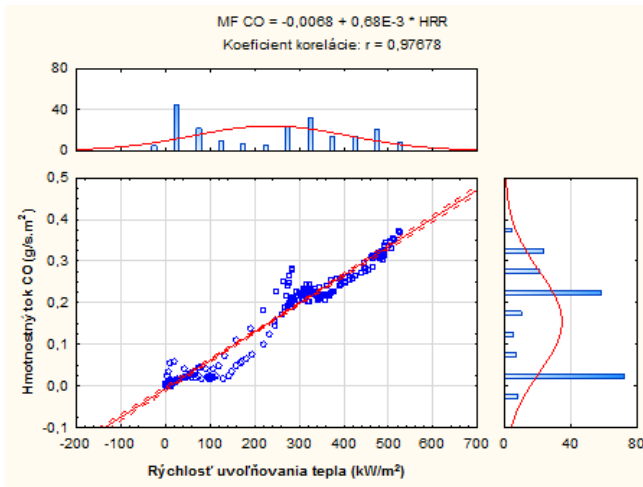
Obr. 6 Štatistická závislosť hmotnostného toku CO od rýchlosti úbytku hmotnosti vzorky PE pri hustote tepelného toku 30 kW/m²

Fig. 6 Statistical dependence of CO mass flow rate on PE sample mass loss rate loaded by heat flux 30 kW/m²



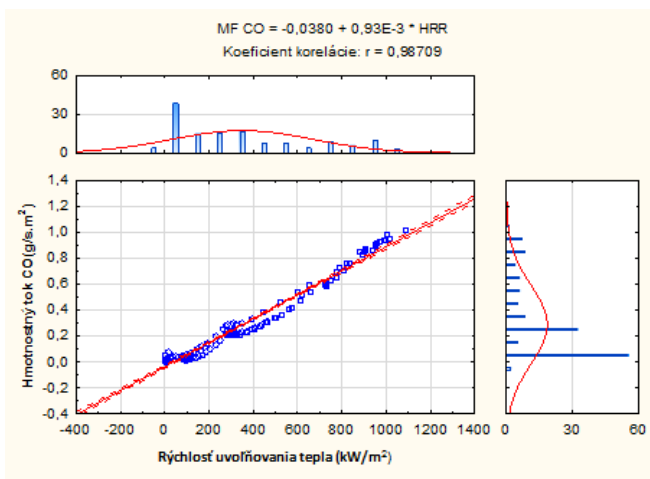
Obr. 7 Štatistická závislosť hmotnostného toku CO od rýchlosti úbytku hmotnosti vzorky PE pri hustote tepelného toku 40 kW/m²

Fig. 7 Statistical dependence of CO mass flow rate on PE sample mass loss rate loaded by heat flux 40 kW/m²



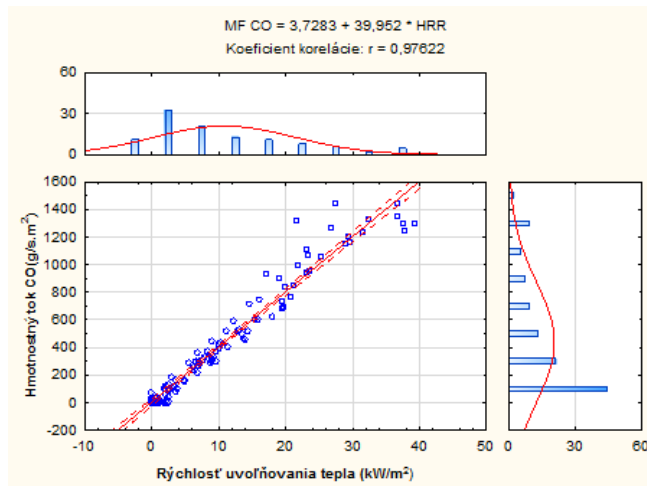
Obr. 8 Štatistická závislosť hmotnostného toku CO od rýchlosti uvoľňovania tepla zo vzorky PE pri hustote tepelného toku 20 kW/m²

Fig. 8 Statistical dependence of CO mass flow rate on heat release rate of PE sample loaded by heat flux 20 kW/m²



Obr. 9 Štatistická závislosť hmotnostného toku CO od rýchlosti uvoľňovania tepla zo vzorky PE pri hustote tepelného toku 30 kW/m²

Fig. 9 Statistical dependence of CO mass flow rate on heat release rate of PE sample loaded by heat flux 30 kW/m²



Obr. 10 Štatistická závislosť hmotnostného toku CO od rýchlosti uvoľňovania tepla zo vzorky PE pri hustote tepelného toku 40 kW/m^2

Fig. 10 Statistical dependence of CO mass flow rate on heat release rate of PE sample loaded by heat flux 40 kW/m^2

štatistickej závislosti okamžitého hmotnostného toku CO od okamžitej rýchlosti úbytku hmotnosti vzorky takmer $0,87$ a pre ostatné skúmané hustoty tepelných tokov nad $0,93$. Nižšia hodnota koeficienta determinácie štatistickej závislosti hmotnostného toku CO od rýchlosti úbytku hmotnosti vzorky pri hustote tepelného toku 20 kW/m^2 (v porovnaní s vyššími hustotami tepelných tokov) je pravdepodobne spôsobená faktom, že uvedená hustota je ešte relatívne blízko kritickej hustoty tepelného toku (z hľadiska iniciácie skúmaného materiálu), teda v oblasti prechodného javu (iniciácie). Koeficient determinácie má však aj pri tejto hustote tepelného toku pomerne vysokú hodnotu ($0,87$), ktorá dokazuje silnú štatistickú závislosť hmotnostného toku CO od rýchlosti úbytku hmotnosti vzorky.

Pri hodnotení vplyvu hustoty externého tepelného toku na proces iniciácie a horenia materiálov (termoplastov) je potrebné zachovať istú mieru opatrnosti, nakoľko na uvedené procesy majú významný vplyv aj ostané vonkajšie podmienky, ako napr. atmosférický tlak a vlhkosť vzduchu. Vplyv atmosférického tlaku na proces horenia n-heptánu skúmali Jun et al. (2008). Prezentované výsledky potvrdzujú, že atmosférický tlak vzduchu (nadmorská výška) má významný vplyv na hmotnostnú rýchlosť horenia horľavých kvapalín (skúmaný LDPE počas skúšky vykazoval správanie podobné horľavej kvapaline), ako aj koncentráciu CO v splodinách horenia. Najvýznamnejší vonkajší vplyv je dostupnosť oxidačného prostriedku

na horenie, vyjadrený ekvivalentným pomerom (danú problematiku podrobne analyzuje Ergut et al., 2007). Význam hustoty externého tepelného toku na proces horenia vyplýva z jej vplyvu na ekvivalentný pomer v zóne horenia.

Získané výsledky môžu byť využité predovšetkým pri ďalšom výskume v oblasti zvyšovania účinnosti horenia, ako vstupné údaje pri modelovaní požiarov (túto problematiku bližšie popisujú, napr. Mózer a Marková, 2007), pri riešení čiastkových úloh požiarneho inžinierstva (predovšetkým výpočet množstva uvoľneného oxidu uhoľnatého pri horení PE a následný výpočet jeho koncentrácie vo vzostupnom prúde spalín a v hornej horúcej vrstve pri dvojzónovom modeli požiaru), ako aj pri riešení čiastkových úloh zisťovania príčin vzniku požiarov (napr. pri rekonštrukcii požiarov v laboratórnej mierke).

ZÁVER

Hustota externého tepelného toku má významný vplyv na časovú závislosť rýchlosti uvoľňovania tepla, maximálnu rýchlosť uvoľňovania tepla, priemernú rýchlosť uvoľňovania tepla, hmotnostnú rýchlosť horenia a výtazok oxidu uhoľnatého pri horení nízkoohusotoného polyetylénu (LDPE). S narastajúcou hustotou tepelného toku, narastá maximálna a priemerná rýchlosť uvoľňovania tepla, hmotnostná rýchlosť horenia a výtazok oxidu uhoľnatého. Hustota externého tepelného toku má však len zanedbateľný vplyv na celkové

uvoľnené tepla (výhrevnosť) počas horenia skúmaného materiálu. Okamžitý hmotnostný tok (výťažok) oxidu uhoľnatého vykazuje silnú štatistickú závislosť od rýchlosti úbytku hmotnosti vzorky, ako aj rýchlosti uvoľňovania tepla. Silná štatistická závislosť okamžitého hmotnostného toku oxidu uhoľnatého od rýchlosti úbytku hmotnosti vzorky naznačuje, že hustota externého tepelného toku ovplyvňuje proces horenia skúmaného materiálu predovšetkým prostredníctvom zmeny ekvivalentného pomeru (pri náraste rýchlosti úbytku hmotnosti vzorky a súčasnom zachovaní množstva prívádzaného vzduchu, narastá ekvivalentný pomer, resp. sa znižuje súčiniteľ nadbytku vzduchu).

Ďalší výskum je potrebné zamerať na posúdenie vplyvu vyšších hustôt externých tepelných tokov (v rozmedzí 50 až 100 kW/m²) na proces horenia skúmaného materiálu, ako aj stanovenie rozdielov vo vplyve hustoty externého tepelného toku na termoplasty, reaktoplasty a prírodné organické polyméry (predovšetkým lignocelulózy materiály). Okrem toho by sa mal ďalší výskum zamerať na exaktné posúdenie kombinovaného vplyvu hustoty externého tepelného toku a atmosférického tlaku a vlhkosti vzduchu na proces iniciácie a horenia uvedených materiálov.

Podakovanie

Tento článok vznikol vďaka podpore v rámci OP Výskum a vývoj pre projekt: CE pre vývoj a aplikáciu diagnostických metód pri spracovaní kovových a nekovových materiálov, ITMS: 26220120048, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja. Článok vznikol rovnako vďaka podpore Vedeckej grantovej agentúry MŠVVaŠ SR a SAV (VEGA) pre projekt č. 1/0446/12.

LITERATÚRA

- BABRAUSKAS, V. 2003. *Ignition Handbook*. Issaquah : Fire Science Publishers, 2003. 1116 p. ISBN 0-9728111-3-3
- DZURENDA, L., JANDAČKA, J. 2010. *Energetické využitie dendromasy : monografia*. Zvolen : Technická univerzita vo Zvolene, 2010. 162 s. ISBN 978-80-228-2082-0
- ERGUT, A. et al. 2007. Emissions from the combustion of polystyrene, styrene and ethylbenzene under diverse conditions. In *Fuel*. ISSN 0016-2361, 2007, Vol. 86, p. 1789–1799
- HORBAJ, P., KIZEK, J. 2006. *Prínos k zníženiu NO_x : optimalizáciou konštrukcie impulzných horákov*. Košice : Technická univerzita v Košiciach, 2006. 100 s. ISBN 80-8073-650-2
- JUN, F. et al. 2008. The influence of low atmospheric pressure on carbon monoxide of n-heptane pool fires. In *Journal of Hazardous Materials*. ISSN 0304-3894, 2008, Vol. 154, p. 476–483
- LADOMERSKÝ, J. et al. 1993. *Spalovanie dreveného odpadu z ekologického a energetického hľadiska : vedecké a pedagogické aktuality 6/1993*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 1993. 68 s. ISBN 80-228-0285-9
- LADOMERSKÝ, J. 2000. Emission analysis and minimization from the wood waste combustion. In *Wood research*. ISSN 0012-6136, 2000, Vol. 45, No. 4, s. 33–44
- LUCHE, J. et al. 2012. High-density polyethylene thermal degradation and gaseous compound evolution in a cone calorimeter In *Fire Safety Journal*. ISSN 0379-7112, 2012, Vol. 54, p. 24–35
- MARTINKA, J. et al. 2012a. Experimental determination of the effect of temperature and oxygen concentration on the production of birch wood main fire emissions. In *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. ISSN 1388-6150, 2012, Vol. 110, No. 1, p. 193–198
- MARTINKA, J. et al. 2012b. Effect of oxygen concentration and temperature on ignition time of polypropylene. In *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. ISSN 1388-6150, 2012, Vol. 110, No. 1, p. 485–487
- MÓZER, V., MARKOVÁ, I. 2007. Modelovanie hasenia SHZ s náplňou CO₂ pre vybraný požiarový scenár. In *Fireco*. Bratislava : Požiarnotechnický a expertízny ústav MV SR, 2007, s. 231–241. ISBN 978-80-89051-08-3
- OSVALD, A. 1997. *Požiarnotechnické vlastnosti dreva a materiálov na báze dreva : vedecké štúdie 8/97/A*. Zvolen : Technická univerzita vo Zvolene, 1997. 52 s. ISBN 80-228-0656-0
- OSVALD, A., OSVALDOVÁ, L. 2003. *Retardácia horenia smrekového dreva : vedecké štúdie 3/2003/B*. Zvolen : Technická univerzita vo Zvolene, 2003. 61 s. ISBN 80-228-1274-9
- SHI, L., CHEW, M. Y. L. 2012. Experimental study of carbon monoxide for woods under spontaneous ignition conditions. In *Fuel*. ISSN 0016-2361, 2012, Vol. 102, p. 709–715
- TEREŇOVÁ, L. 2010. Hydro-isolating belts in structural members of new buildings in terms of the fire safety. In *Fire engineering*. Zvolen : Bratia Sabovci, 2010. s. 403–410. ISBN 978-80-89241-38-5
- ZACHAR, M. 2010. Selected deciduous wood species flash ignition and ignition temperature determination. In *Fire engineering*. Zvolen : Bratia Sabovci, 2010. s. 431–438. ISBN 978-80-89241-38-5
- ISO 5660-1:2002: Reaction to fire tests : Heat release, smoke production and mass loss rate.
- STN EN ISO 1716:2010 : Skúšky reakcie výrobkov na oheň : Stanovenie celkového spalného tepla.
- STN ISO 871:2010 : Plasty : Stanovenie zápalnosti v teplotovzdušnej peci.