Charakteristika spalování dřevní a nedřevní biomasy v bublinkové fluidní vrstvě

Klára OSIČKOVÁ [1,*], Pavel SKOPEC [1], Matěj VODIČKA [1], Jan HRDLIČKA [1]

[1] České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav energetiky, Technická 4, Praha 6, 166 07

*** Email:** klara.osickova@fs.cvut.cz

Tento článek se zabývá charakteristikou spalování dřevní a nedřevní biomasy v bublinkové fluidní vrstvě s důrazem na vznik plynných znečišťujících látek. Experimentální měření byla provedena na laboratorní jednotce kotle s bublinkovou fluidní vrstvou s použitím tří biomasových paliv. Ze získaných dat byl vyhodnocen a posouzen vliv teploty fluidní vrstvy a přebytku spalovacího vzduchu na vznik plynných znečišťujících látek při spalování. Ve sledovaném teplotním rozsahu 800 – 900 °C docházelo zvyšováním teploty k poklesu emisního faktoru CO a NO_x a k nárůstu SO_2. Při zvyšujícím se přebytku spalovacího vzduchu klesalo ve spalinách množství CO a rostly NO_x, zatímco vliv na tvorbu SO_2 nebyl pozorován.

Klíčová slova: biomasa, fluidní spalování, plynné znečišťující látky, emisní faktor, konverzní faktor

1 Úvod

Cílem tohoto článku je vyhodnocení experimentálně naměřených dat ze spalování tří typů biomasových paliv, a to pelet ze smrkového dřeva, slunečnicových slupek a obilných plev. Pro experimenty bylo použito zařízení fluidního kotle s bublinkovou fluidní vrstvou, která obsahovala křemičitý písek jako inertní materiál. Cílem měření bylo zhodnocení vlivu teploty a přebytku spalovacího vzduchu na tvorbu tří vybraných plynných emisních látek.

Měřeny byly emise oxidu uhelnatého (CO), který vzniká jako produkt nedokonalého spalování. Při teplotách pod 800 °C, příliš krátkém čase hoření nebo nedostatku kyslíku (O_2) nedochází k dostatečné oxidaci paliva a tím i větší koncentraci vznikajícího CO. Jde o vysoce toxický plyn, pro jehož snižování se nevyužívá sekundárních metod, ale zasahuje se přímo do spalovacího procesu. To je často v protikladu se snižováním dalších plynných znečišťujících látek. [1; 2]

Dále byly měřeny oxidy dusíku (NO_x), vznikající převážně oxidací dusíkatých složek paliva jako směs oxidu dusnatého (NO) a oxidu dusičitého (NO_2). Existují tři mechanismy vzniku NO_x, a to palivový, termický a promptní. Pro spalování biomasy je z důvodu nižších spalovacích teplot (pod 1000 °C) relevantní pouze palivový mechanismus. Na vznik palivových NO_x má vliv zejména množství přebytku spalovacího vzduchu, přičemž koncentrace NO_x se s vyšším množstvím přebytku spalovacího vzduchu zvyšuje. Pro snižování NO_x se využívá primárních a sekundárních opatření. [1; 2]

Poslední emisní látkou zahrnutou v rámci experimentálních měření je oxid siřičitý (SO_2), který vzniká primárně oxidací síry v palivu. Pro jeho snižování se využívají sekundární metody. Také lze ale využít aditivní metody, například přidání vápence do fluidní vrstvy. [1]

2 Metodika měření

Pro experimentální měření byla využita tři paliva, a to pelety ze smrkového dřeva, pelety ze slunečnicových slupek a pelety z obilných plev. Prvkový rozbor jednotlivých paliv je uveden v Tab. 1.

Tab.1. Hrubá a prvková analýza paliv

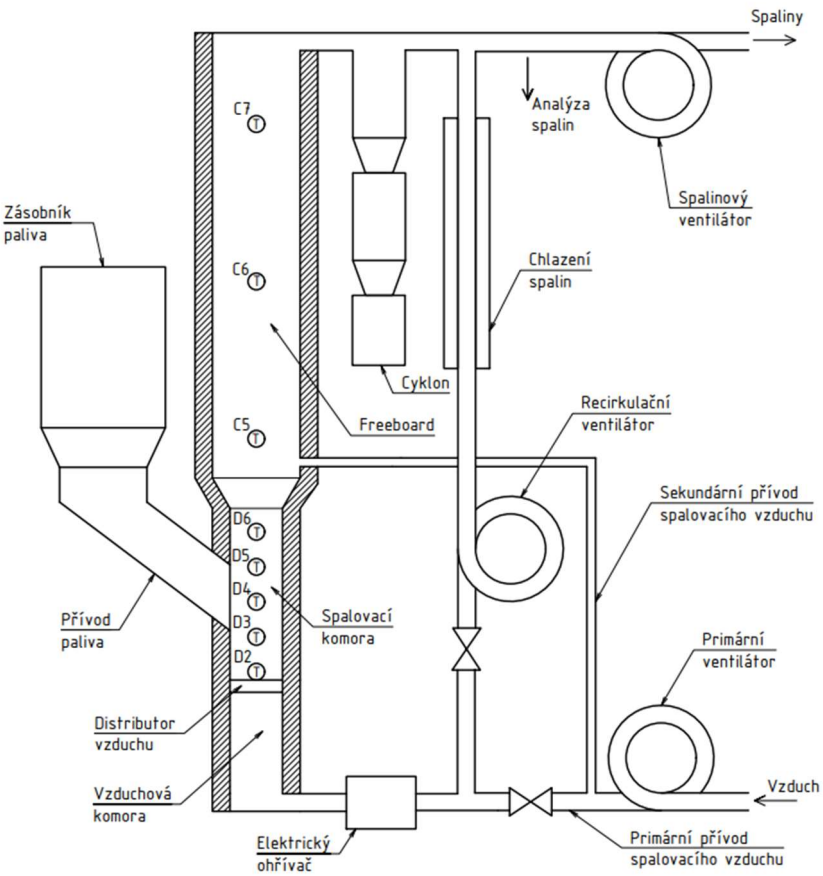
Palivo	**Výhřevnost [MJ . kg^{-1}]**	**C^{daf} [%]**	**H^{daf} [%]**	**N^{daf} [%]**	**S^{daf} [%]**	**O^{daf} [%]**	**Cl^{daf} [%]**	**W^{r} [%]**	**A^{r} [%]**
Dřevěné pelety	16,40	51	6,90	0,30	0,003	41,8	-	7,8	1,5
Slunečnicové pelety	18,56	54,8	6,96	1,32	0,11	36,8	0,0062	6,7	3,5
Pelety z obilných plev	14,26	47,7	7,78	2,19	0,16	42,1	0,16	14,5	4,9

Experimentální měření proběhla pro celkem patnáct různých stavů, přičemž pro každé ze tří paliv bylo naměřeno pět různých stavů. Pro srovnání vlivu teploty a koncentrace O_2 ve spalinách na produkované množství emisí v průběhu spalování byly měřeny stavy při stejné teplotě a různé koncentraci O_2 a stavy při stejné koncentraci O_2 a různých teplotách.

Vyhodnocovány jsou emise CO a NO_x pro paliva z pelet ze smrkového dřeva a slunečnicových slupek. V případě pelet z obilných plev je navíc zahrnut i SO_2. Pro vyhodnocení byl využit emisní faktor vztažený na výhřevnost paliva pro porovnání vlivu teploty a přebytku spalovacího vzduchu. Také byl použit konverzní faktor NO_x pro zhodnocení vlivu množství dusíku (N) vázaného v palivu na vznik NO_x.

Experimentální měření probíhala na experimentální jednotce MiniFluid. Jde o spalovací zařízení s bublinkovou fluidní vrstvou o tepelném výkonu 30 kW. Schéma experimentálního zařízení lze vidět na Obr. 1.

Analýza spalin byla prováděna pomocí infračerveného analyzátoru NDIR, na kterém byly měřeny CO, SO_2 a NO_x, a pro měření O_2 byl použit paramagnetický analyzátor. Teploty se měřily pomocí termočlánků umístěných ve spalovací komoře a freeboardu. Na Obr. 1 jsou jednotlivé termočlánky označeny D2 – D6 a C5 – C7. Průtoky byly měřeny na základě tlakové ztráty na clonce.



Obr. 1: Schéma experimentálního zařízení

2.1 Vyhodnocení měření

Každý z měřených stavů trval minimálně 30 minut a cílem bylo měřit v teplotním rozsahu ± 10 °C a s rozsahem koncentrace O_2 ± 1 % oproti požadovaným hodnotám. Pro posouzení vlivu teploty na množství vznikajících emisí byly měřeny stavy při 8 % koncentraci O_2 ve spalinách a teplotách 800, 850 a 900 °C. Pro posouzení vlivu koncentrace O_2 ve spalinách na množství emisí byly při teplotě 850 °C měřeny stavy s koncentrací O_2 o hodnotách 4, 8 a 12 %.

Data experimentálního měření jsou vyhodnocena na základě emisního faktoru vztaženého na výhřevnost se zahrnutím směrodatné odchylky měření. Pro NO_x byl navíc vypočten také konverzní faktor.

2.1.1 Výpočet emisního faktoru

Emisní faktor lze definovat jako množství vyprodukované emisní látky vztažené dále například na hmotnost, nebo výhřevnost paliv. Naměřené koncentrace jednotlivých emisních látek byly přepočteny na emisní faktor vztažený na výhřevnost paliva podle [3].

Z prvkového množství původního vzorku r paliva byl proveden výpočet měrného objemu spalovacího vzduchu V_{CA}:

$$V_{CA} = (1{,}864 \cdot C^r + 5{,}554 \cdot H^r + 0{,}698 \cdot S^r - 0{,}700 \cdot O^r) \cdot \frac{1}{0{,}21}\ [\mathrm{m_N^3/kg}] \qquad (1)$$

Pro výpočet měrného objemu spalin bylo z hodnoty měřeného kyslíku $O_{2,meas}$ [%] vypočteno množství přebytečného spalovacího vzduchu λ:

$$\lambda = \frac{21}{21 - O_{2,meas}} \; [-] \tag{2}$$

Pro výpočet emisního faktoru vztaženého na výhřevnost paliva byl proveden výpočet měrného objemu spalin V_{FG}:

$$V_{FG} = 1{,}855 \cdot C^r + 0{,}0003 \cdot V_{CA} \cdot \lambda + 0{,}800 \cdot N^r + 0{,}683 \cdot S^r + \\ + 0{,}7805 \cdot V_{CA} \cdot \lambda + 0{,}0091 \cdot V_{CA} \cdot \lambda + 0{,}21 \cdot (\lambda - 1) \cdot V_{CA} \; [\mathrm{m_N^3/kg}] \tag{3}$$

Z výsledků předchozích vzorců lze dále vypočítat emisní faktor vztažený na výhřevnost paliva EF_{LHV}^X (ρ_m^X [$\mathrm{mg/m_N^3}$] je hmotnostní koncentrace jednotlivých znečišťujících látek bez přepočtu na referenční O_2 a index X určuje jednotlivé druhy emisí, LHV [MJ/kg] je výhřevnost paliva):

$$EF_{LHV}^X = \frac{V_{FG} \cdot \rho_m^X}{LHV} \; [\mathrm{g/GJ}] \tag{4}$$

2.1.2 Výpočet konverzního faktoru N-NO

Pro vznik emisí NO_x je při spalování biomasy ve fluidní vrstvě relevantní převážně palivový mechanismus jejich vzniku, proto je zde pro zhodnocení reálné míry oxidace palivového N na NO uveden konverzní faktor. Ten je možné definovat jako procentuální poměr koncentrace emisí NO_x na teoreticky možnou maximální koncentraci emisí NO_x, které mohou vzniknout z N vázaného v palivu. [4]

Objem NO ve spalinách V_{NO} se vypočte podle rovnice (5) (jeden mol plynné látky odpovídá objemu $22{,}4 dm^3$, molární hmotnost N je rovna hodnotě 14 a N^r je obsah N v původním vzorku paliva).

$$V_{NO} = \frac{22{,}4}{14} \cdot N^r [\mathrm{m_N^3/kg}] \tag{5}$$

Maximální koncentrace NO ve spalinách $\varphi_{NO_x(max)}$, přepočtená na suchý plyn, které by se dosáhlo při 100 % konverzi N obsaženého v palivu, se vypočítá podle rovnice (6).

$$\varphi_{\mathrm{NO}(max)} = \frac{V_{\mathrm{NO}}}{V_{FG}} \; [\mathrm{m_N^3/m_N^3}] \tag{6}$$

Konverzní faktor X_{NO} se vypočte jako poměr koncentrace NO ve spalinách φ_{NO} [$\mathrm{m_N^3/m_N^3}$] a maximální koncentrace NO ve spalinách $\varphi_{NO_x(max)}$[$\mathrm{m_N^3/m_N^3}$] podle rovnice (7).

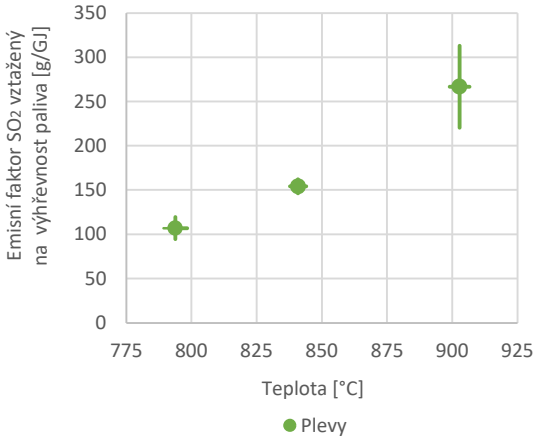
$$X_{NO} = \frac{\varphi_{NO}}{\varphi_{\mathrm{NO}(max)}} \cdot 100 \; [\%] \tag{7}$$

3 Výsledky měření

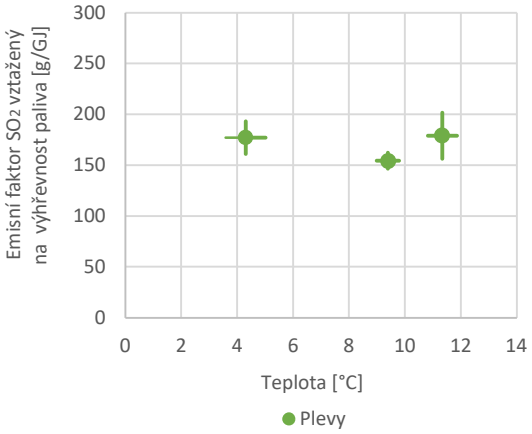
3.1.1 Oxid siřičitý

U některých druhů biomasy, převážně u dřevní, je z důvodu nízké koncentrace síry v palivu možné vznik SO_2 zanedbávat. Emisní faktor SO_2 byl tedy vyhodnocen pouze pro pelety z obilných plev a zbylá dvě paliva zde nejsou uváděna. Na Obr. 2 lze pozorovat teplotní závislost při spalování pelet z obilných plev, kde s rostoucí teplotou stoupá produkované

množství SO_2. Z Obr. 3 lze sledovat, že velikost emisního faktoru není závislá na koncentraci O_2 ve spalinách.



Obr. 2: Vliv teploty na emisní faktor SO_2

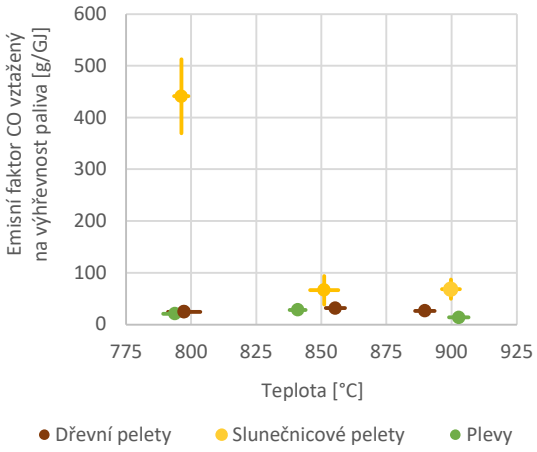


Obr. 3: Vliv koncentrace O_2 ve spalinách na emisní faktor SO_2

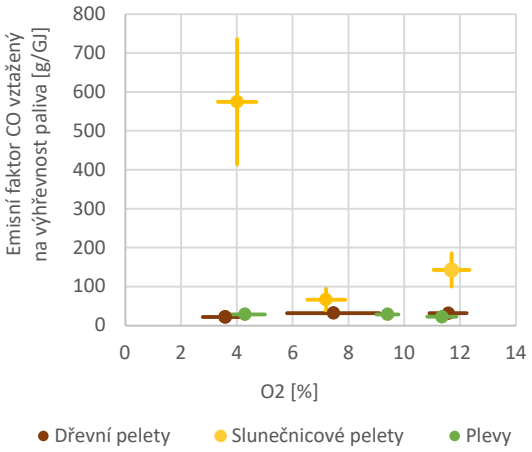
3.1.2 Oxid uhelnatý

Z Obr. 4 je patrný vliv teploty na emisní faktor CO vztažený na výhřevnost paliva. Nejvíce byl patrný vliv teploty při použití pelet ze slunečnicových slupek, kdy množství emisí CO bylo nejvyšší při nízkých teplotách, jelikož nedocházelo k dobrému dohořívání paliva. Při vyšších teplotách, kdy tento problém nenastával, je emisní faktor téměř konstantní. V případě pelet ze smrkového dřeva a obilných plev je vliv teploty na velikost emisního faktoru CO minimální.

Obr. 5 porovnává vliv přebytku spalovacího vzduchu na emisní faktor CO vztažený na výhřevnost paliva. Závislost množství emisí CO na koncentraci O_2 byla nejvíce patrná opět při spalování pelet ze slunečnice, kdy výrazně narůstá produkce CO, jelikož dochází k menší míře jeho oxidace na CO_2. V případě pelet ze smrkového dřeva a obilných plev je vliv přebytku spalovacího vzduchu na velikost emisního faktoru CO z provedených měření minimální.



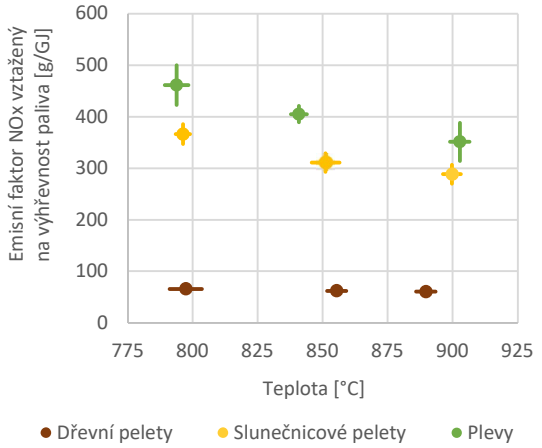
Obr. 4: Vliv teploty na emisní faktor CO při 8 % O_2



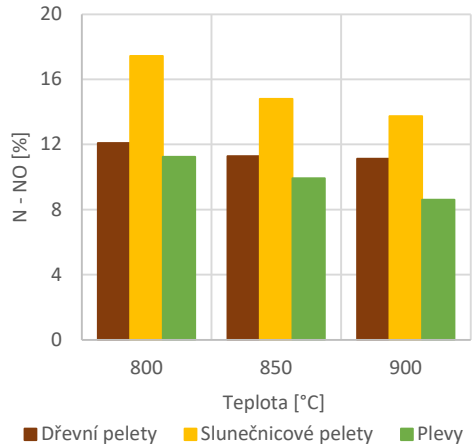
Obr. 5: Vliv koncentrace O_2 ve spalinách na emisní faktor CO

3.1.3 Oxidy dusíku

Z Obr. 6 je zřejmé, že při vyšších teplotách ve sledovaném teplotním rozsahu velikost emisního faktoru NO_x klesá. Stejně tak klesá s vyšší teplotou i konverzní faktor NO_x, jak lze pozorovat na Obr. 7. Nejnižší hodnoty konverzního faktoru mají pelety z obilných plev a jejich hodnoty emisního faktoru, i přes výrazně vyšší obsah N obsaženého v palivu, tak příliš nepřesahují hodnoty u pelet ze slunečnicových slupek.

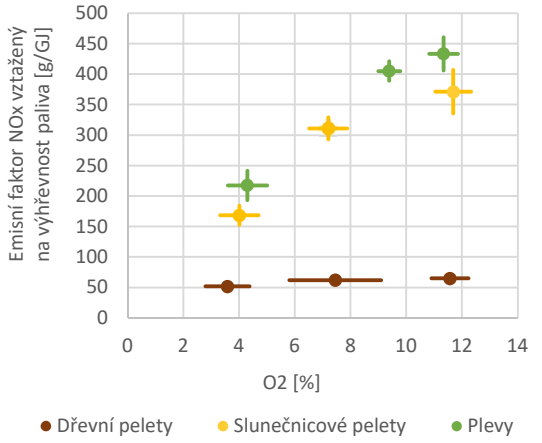


Obr. 6: Vliv teploty na emisní faktor NO_x

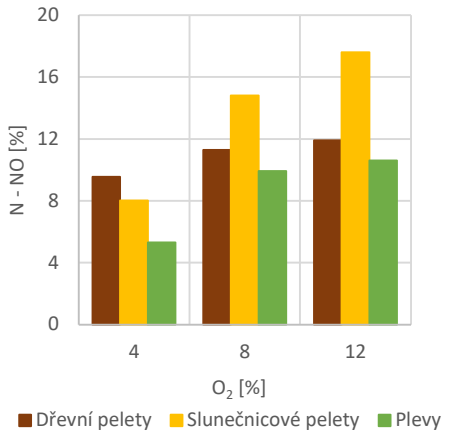


Obr. 7: Vliv teploty na konverzní faktor N – NO

Na Obr. 8 je možné zaznamenat závislost koncentrace O_2 ve spalinách na produkci emisí NO_x, kdy jsou nejnižší hodnoty emisního faktoru při nízké koncentraci O_2 ve spalinách a s jeho rostoucím množstvím se emisní faktor zvyšuje. Nejnižší hodnoty emisního faktoru jsou u pelet ze smrkového dřeva, které mají nejnižší obsah N vázaného v palivu. Na Obr. 9 lze vidět vliv koncentrace O_2 ve spalinách na konverzní faktor NO_x, kdy je možné určit vliv narůstající koncentrace O_2 na rostoucí hodnotu konverzního faktoru, čímž je způsobena vyšší tvorba palivových NO_x. Pelety ze slunečnicových slupek vykazují jako palivo nejhorší vlastnosti z hlediska přeměny N vázaného v palivu, s rostoucí koncentrací O_2 ze 4 % na 12 % dochází k více než dvojnásobnému zvýšení konverzního faktoru.



Obr. 8: Vliv koncentrace O_2 ve spalinách na emisní factor NO_x



Obr. 9: Vliv koncentrace O_2 ve spalinách na konverzní faktor N – NO

4 Závěr

Z měření provedených na experimentální laboratorní jednotce s bublinkovou fluidní vrstvou je patrné, že množství vznikajících emisních látek se dá výrazně ovlivnit opatřeními jako je teplota spalování a množství přebytku spalovacího vzduchu. V průběhu měření docházelo se změnou těchto parametrů k výrazně odlišnému množství vznikajících emisních látek a tím i k různým hodnotám emisních faktorů vyhodnocených pro jednotlivá měření. Se zvyšující se teplotou docházelo ve spalinách k poklesu množství CO a NO_x a k nárůstu SO_2. Při zvyšující se koncentrací O_2 ve spalinách klesal CO a rostly NO_x, na množství SO_2 nebyl zaznamenán vliv použité koncentrace O_2.

Poděkování

Tato práce byla podpořena z projektu Centrum výzkumu nízkouhlíkových energetických technologií č. CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_019/0000753

Použitá literatura

[1] VAN LOO, Sjaak a Jaap KOPPEJAN. Handbook of biomass combustion and co-firing. London: Earthscan, 2008. ISBN 978-1-84407-249-1.

[2] OKA, S. a E. ANTHONY. *Fluidized bed combustion*. New York: M. Dekker, 2004. Mechanical engineering (Marcel Dekker, Inc.), 162. ISBN 0-8247-4699-6.

[3] HRDLIČKA, Jan, Pavel SKOPEC, Tomáš DLOUHÝ a František HRDLIČKA. Emission factors of gaseous pollutants from small scale combustion of biofuels. *Fuel* [online]. 2016, 165, 68-74 [cit. 2022-05-18]. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2015.09.087

[4] DZURENDA, Ladislav, Juraj LADOMERSKY a Emília HRONCOVÁ. Conversion Factor of Fuel-Bound Nitrogen to Oxides in the Process of Spruce Wood Combustion in Boiler Grate Furnaces. *Polish Journal of Environmental Studies* [online]. 2015, 24 [cit. 2022-05-29]. ISSN 1230-1485. Dostupné z: doi:10.15244/pjoes/27408