



národní
úložiště
šedé
literatury

Vliv parciálního tlaku kyslíku ve spalovacím médiu na emise a účinnost procesu fluidního spalování kukuričné slámy

Durda, Tomáš
2014

Dostupný z <http://www.nusl.cz/ntk/nusl-177657>

Dílo je chráněno podle autorského zákona č. 121/2000 Sb.

Tento dokument byl stažen z Národního úložiště šedé literatury (NUŠL).

Datum stažení: 20.03.2024

Další dokumenty můžete najít prostřednictvím vyhledávacího rozhraní nusl.cz.

VLIV PARCIÁLNÍHO TLAKU KYSLÍKU VE SPALOVACÍM MÉDIU NA EMISE A ÚČINNOST PROCESU FLUIDNÍHO SPALOVÁNÍ KUKUŘIČNÉ SLÁMY

INFLUENCE OF OXYGEN PARTIAL PRESSURE IN THE COMBUSTION ATMOSPHERE ON THE EMISSIONS AND EFFICIENCY OF THE FLUIDIZED-BED INCINERATION OF CORN STRAW

**Durda T.^{1,2}, Pohořelý M.^{1,2}, Šyc M.², Svoboda K.², Kameníková P.², Jeremiáš J.²,
Punčochář M.²**

¹*Ústav energetiky, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Technická 5, 166 28
Praha 6*

²*Ústav chemických procesů AV ČR, v.v.i., Rozvojová 135, 165 02 Praha 6*

* Email: durda@icpf.cas.cz, tomas.durda@vscht.cz

This experimental study is focused on the corn straw incineration in a bubbling fluidized-bed reactor. The aim of this study is to compare the influence of oxygen partial pressure in the combustion atmosphere (air, oxygen-enriched air, pure oxygen- oxy -fuel process) on the efficiency of the combustion process, and the emissions of undesirable pollutants (CO, NO_x, SO₂, N₂O, and dust). The efficiency of the combustion process is compared on the basis of chemical unburned carbon (concentration of CO in the exhaust gas) and mechanical unburned particles (content of carbon in the solid form).

Key words: fluidized bed, incineration, combustion, emissions, agricultural biomass

Tato experimentální studie je zaměřena na spalování slámy kukuřice v reaktoru s bublinovou fluidní vrstvou. Cílem studie je porovnat vliv parciálního tlaku kyslíku ve spalovacím médiu (vzduch, vzduch obohacený kyslíkem, čistý kyslík – proces „oxy-fuel“) na účinnost spalovacího procesu a emise nežádoucích polutantů (CO, NO_x, SO₂, N₂O, tuhé znečišťující látky – TZL). Účinnost spalovacího procesu je porovnávána na základně chemického nedopalu (koncentrace CO ve spalinách) a mechanického nedopalu (obsah uhlíku v pevné fázi).

Klíčová slova: fluidní vrstva, spalování, emise, zemědělská biomasa

1. Úvod

Spalování patří mezi metody energetického využití paliva. Tato práce se zabývá moderními spalovacími procesy: (1) spalování paliva čistým kyslíkem s recirkulací spalin (tzv. oxy-fuel proces), (2) spalování paliva vzduchem obohaceným o kyslík v reaktoru s bublinovou fluidní vrstvou. Získané výsledky jsou porovnány s konvenčním spalováním paliva.

Při procesu oxy-fuel je jako oxidační činidlo použit čistý kyslík ve směsi s recirkulovanými surovými (vlhkými) či suchými spalinami, které slouží jako nutná náhrada za dusík ze vzduchu k moderování teploty spalování, zajištění fluidace v případě fluidních ohnišť a jejich dostatek zajišťuje odvod tepla z kotelní části parogenerátoru. Čistý kyslík (nad 95 obj. %) je ve velkokapacitním měřítku získáván pomocí frakční destilace zkapalněného vzduchu.

Spalování vzduchem obohaceným o kyslík má potenciál u jednotek s tepelným výkonem cca 5–50 MW_t. Spalovacím médiem je vzduch obohacený kyslíkem, který je odpadním proudem u jednotek VSA (Vacuum Swing Adsorption), PSA (Pressure Swing Adsorption) a VPSA (Vacuum Pressure Swing Adsorption) používaných k výrobě N₂ ze vzduchu.

2. Cíle práce

Hlavním cílem předkládaného příspěvku bylo proměřit vliv zvýšení parciálního tlaku kyslíku ve spalovacím médiu (vzduch, vzduch obohacený kyslíkem, čistý kyslík s modelovými suchými spalinami (CO₂) – simulovaný proces oxy-fuel) na účinnost spalování kukuřičné slámy ve fluidním reaktoru a na emise jednotlivých význačných polutantů CO, SO₂, NO_x, N₂O, HCl a TZL.

Sledovanými operačními vlivy byly:

- vliv záměny spalovacího média vzduchu za směs O₂ a CO₂ (21 obj. % O₂ ve směsi),
- vliv zvýšení parciálního tlaku kyslíku ve spalovacím médiu, kde na vstupu do fluidního reaktoru byla koncentrace O₂ v rozmezí 21–30 obj. %.

Spalovací média byla:

- vzduch (21 obj. % O₂ a 79 obj. % N₂) – experiment A,
- vzduch obohacený kyslíkem (30 obj. % O₂ a 70 obj. % N₂) – experiment B,
- směs O₂ a CO₂ (21 obj. % O₂ a 79 obj. % CO₂) – experiment C,
- směs O₂ a CO₂ (30 obj. % O₂/ 70 obj. % CO₂) – experiment D.

3. Experimentální část

3.1 Vlastnosti použitých materiálů

Pro spalování v reaktoru s fluidní vrstvou byla jako palivo použita sláma z celé rostliny kukuřice (*Zea mays*) vypěstované na kontaminované půdě na Příbramsku. Uvedené palivo a jeho vlastnosti jsou blíže popsány v literatuře [1–3].

Průměrné hodnoty chemicko-palivo-energetických vlastností biopaliva jsou uvedené v Tab. 1. Složení popela kukuřičné slámy a materiálu fluidní vrstvy měřené XRF (X-ray fluorescence) analýzou je uvedeno v Tab. 2. Obsah vlhkosti v palivu se měnil v závislosti na teplotě a relativní vlhkosti vzduchu v provozní hale, kde bylo palivo upravováno a skladováno.

Jako materiál fluidní vrstvy byl použit keramzit, vzhledem k vhodným mechanicko-fluidačně-transportním vlastnostem a ke svému katalytickému vlivu na proces spalování [3, 4].

Tab. 1 Vlastnosti biopaliva

Palivo - sláma kukuřice	původní stav	suchý stav
Vlhkost (hm. %)	8,32	-
Hořlavina (hm. %)	87,4	95,3
Popel (hm. %)	4,32	4,71
Prchavá hořlavina (hm. %)	65,1	71,1
Fixní uhlík (hm. %)	22,2	24,2
Spalné teplo (MJ.kg ⁻¹)	17,0	18,8
Výhřevnost (MJ.kg ⁻¹)	15,8	17,5
Uhlík (hm. %)	42,1	46,0
Vodík (hm. %)	5,54	6,04
Dusík (hm. %)	1,27	1,39
Kyslík (hm. %)	38,3	41,8
Síra - celková (hm. %)	< 0,130	< 0,140
Síra - spalitelná (hm. %)	0,106	0,117
Chlor (hm. %)	0,132	0,146
Fluor (hm. %)	0,00564	0,00621

Tab. 2 Složení popela biopaliva a materiálu fluidní vrstvy měřené XRF analýzou

Složka	keramzit (hm. %)	popel z kukuřičné slámy (hm. %)
Al ₂ O ₃	30,7	1,07
CaO	4,77	7,06
Cl	-	1,71
Fe ₂ O ₃	11,2	1,34
K ₂ O	2,41	31,8
MgO	2,11	4,54
MnO	0,115	0,300
Na ₂ O	0,595	1,17
P ₂ O ₅	0,257	10,8
SO ₃	0,275	2,77
SiO ₂	43,4	36,9
TiO ₂	3,61	-
Suma	99,4	99,5

4. Experimentální zařízení

Experimentální fluidní reaktor s hustou bublinovou fluidní vrstvou, na kterém byly provedeny experimenty spalování kukuřičné slámy, se nachází na Ústavu chemických procesů AV ČR a je detailně popsán v literatuře [5–10].

Emise význačných polutantů byly měřeny on-line pomocí analyzátoru Horiba PG-350 (pro měření emisí NO_x, SO₂, CO, CO₂) a Uras 14 (pro měření emisí N₂O). Obsah tuhých znečišťujících látek (prachu) byl stanoven dle ČSN EN 13284–1 a obsah těžkých kovů dle ČSN EN 14385 [1–3].

4.1 Experimentální podmínky

Společné parametry uvedených experimentů byly: počáteční objem nehybné vrstvy (650 ml), poměr výšky nehybné vrstvy a vnitřního průměru reaktoru (cca 1). $U_{\text{přeb}} = 2 \times U_{\text{mf}}$ (bez započtení transportního plynu), jednalo se tudíž o bublinovou fluidní vrstvu. Provozní podmínky jednotlivých experimentů jsou uvedeny v Tab. 3.

Experimenty byly vedeny za srovnatelných provozních podmínek. Teplota ve vrstvě, která spolu se stechiometrickým koeficientem vzduchu má hlavní vliv na spalovací proces, byla téměř identická. Rozdíl mezi stechiometrickými koeficienty (λ) u jednotlivých experimentů byl přijatelný.

Účinnost spalovacího procesu určuje, vedle teploty, zejména stechiometrický koeficient vzduchu, parciální tlak kyslíku v reakční zóně, obsah CO ve spalinách (chemický nedopal) a množství hořlaviny v popelovinách (mechanický nedopal).

Tab. 3 Provozní podmínky experimentů

Experiment	A	B	C	D
λ (-)	1,94	1,98	1,76	1,99
materiál fluidní vrstvy	keramzit	keramzit	keramzit	keramzit
délka experimentu (hod:min)	6:37	2:52	2:10	2:19
dávkování paliva (g/h)	259	369	289	364
dávkování suchého paliva (g/h)	238	338	265	335
O ₂ ve spalinách* (obj. %)	9,31	14,0	9,20	14,7
t fluidní vrstva (°C)	750 ± 10	747 ± 10	747 ± 10	728 ± 10
t freeboard (°C)	746 ± 10	671 ± 10	719 ± 10	724 ± 10
t horký cyklon (°C)	324 ± 10	298 ± 10	349 ± 10	344 ± 10
t vzorkování spalin (°C)	188 ± 10	181 ± 10	235 ± 10	230 ± 10

* v suchých spalinách bez pneumotransportu

5. Výsledky a diskuze

Emise sledovaných polutantů jsou pro jednotlivé experimenty uvedeny v Tab. 4, bilance popelovin v Tab. 5. a pro posouzení účinnosti spalovacího procesu je uveden v Tab. 6 obsah kyslíku a oxidu uhelnatého ve spalinách a obsah nedopalu v popelovinách.

Při spalování vzduchem (experiment A) byla průměrná hodnota CO 309 mg/m³ a obsah nedopalu 0,18 hm. % (vztažen na suché palivo). Jak je patrné z Tab. 4 a Tab. 6, zvýšení koncentrace kyslíku z 21 obj. % na 30 obj. % (spalování vzduchem obohaceným kyslíkem – experiment B) mělo vliv na snížení průměrné hodnoty emisí CO a vedlo k výraznému snížení mechanického nedopalu v popelovinách. Z výsledků je patrné, že spalování za podmínek experimentu B probíhalo účinněji, tj. došlo k vyššímu využití paliva. Průměrná hodnota emisí CO a nedopalu (vztažen na suché palivo) byla při experimentu C výrazně vyšší než při spalování vzduchem, tj. došlo k zhoršení účinnosti spalovacího procesu. K stejnemu závěru se dospělo např. v literatuře [11, 12] zabývající se spalováním uhlí kyslíkem s recirkulací spalin. Při zvýšení parciálního tlaku kyslíku resp. zvýšení koncentrace O₂ z 21 obj. % na 30 obj. ve směsi O₂/CO₂ na vstupu do reaktoru došlo

k výraznému snížení emisí CO ve spalinách a nedopalu v popelovinách. Ze všech provedených spalovacích experimentů proběhlo spalování kukuřičné slámy s největší účinností za podmínek experimentu D (30 obj. % O₂ a 70 obj. % CO₂) a následně při experimentu B (30 obj. % O₂ a 70 obj. % N₂).

Nicméně je důležité poznamenat, že vlivem zvýšení parciálního tlaku kyslíku ve spalovacím médiu dochází ke zvýšení teploty částic paliva oproti průměrné teplotě ve fluidní vrstvě. To může vést k častějším problémům s aglomerací fluidní vrstvy, ke kterým dochází v důsledku slepování částic popelovin s materiélem fluidní vrstvy (vytváření shluků). Spalování obohaceným vzduchem má velký potenciál pro menší decentralizované jednotky s tepelným výkonem cca 5–50 MW_t, kde obohacený vzduch, je získán jako odpadní produkt z jednotek VSA, PSA, VPSA pro výrobu dusíku ze vzduchu, a je použit jako spalovací médium. Naproti tomu při spalování za podmínek oxy-fuel procesu je využíván čistý kyslík, který je velkoobjemově získán z frakční destilace zkapalněného vzduchu. Právě kvůli drahému zdroji čistého kyslíku a návratnosti investice, je výhodnější využít proces oxy-fuel u jednotek ve výkonovém měřítku výrazně větším než 50 MW_t. Při experimentu A nabýval obsah tuhých znečišťujících látek (TZL, prach) ve spalinách za horkým cyklonem průměrné hodnoty cca 54 mg/m³. V důsledku zvýšení parciálního tlaku kyslíku ve spalovacím vzduchu (experiment B) se obsah prachu zvýšil cca 2x. Obsah prachu byl ze všech provedených experimentů nejvyšší u experimentu D. Při experimentu C, byl obsah prachu ve spalinách vyšší přibližně o 36 % než při spalování vzduchem (experiment A).

Tab. 4 Emise sledovaných polutantů

experiment	A	B	C	D	výkonové měřítko 5-50 MW
sledovaná látka / spalovací médium	21 O ₂ /79 N ₂	30 O ₂ /70 N ₂	21 O ₂ /79 CO ₂	30 O ₂ /70 CO ₂	legislativní limit
CO (mg/m ³)*	309	278	501	106	650 ¹⁾ 500 ²⁾
SO ₂ (mg/m ³)*	86,6	304	134	193	800 ¹⁾ 400 ²⁾
NO _x (mg/m ³)*	563	1140	615	1290	400 ¹⁾ 500 ²⁾
HCl (mg/m ³)*	0,686	4,46	9,24	10,6	—
TZL (mg/m ³)*	54,4	104	74,1	139	250 ¹⁾ 30 ²⁾
N ₂ O (mg/m ³)*	20,8	60,5	155	116	—
CO ₂ (g/m ³)*	147	261	—	—	—

* přepočítáno na 11 % O₂ a normální teplotu (0 °C) a tlak (101,325 kPa) ve spalinách bez pneumotransportu

¹⁾Vyhláška 415/2012 Sb. - Specifické emisní limity platné do 31. 12. 2017 pro spalování stacionárního zdroje s fluidním ložem (hodnota NO_x a SO₂ se vztahuje pro spalování ve fluidním loži, hodnota CO a TZL se vztahuje k spalování biomasy) [13].

²⁾Vyhláška 415/2012 Sb. - Specifické emisní limity platné od 1. 1. 2018 pro spalování stacionárního zdroje s fluidním ložem (hodnota SO₂ se vztahuje pouze pro spalování ve fluidním loži, hodnota CO se vztahuje k spalování biomasy s výjimkou spalování výlisků biomasy) [13].

Zvýšení parciálního tlaku kyslíku ve vzduchu mělo vliv na zvýšení konverze síry, dusíku a chloru z paliva do plynu, tj. na emise SO₂, NO_x a plynných chloridů vyjádřených jako HCl. Jak je patrné z výsledků (Tab. 4) záměna spalovacího média (vzduch, směs 21 obj. % O₂ a 79 obj. CO₂) měla mírný vliv na zvýšení emisí SO₂, NO_x a významný vliv na zvýšení emisí plynných chloridů vyjádřených jako HCl, jenž bylo dáno výrazným zvýšením konverze chloru z paliva do plynu. Při zvýšení parciálního tlaku kyslíku ve směsi O₂ s CO₂ (experiment D) došlo k výraznému zvýšení emisí NO_x a mírnému zvýšení emisí SO₂ a HCl oproti experimentu C. Souhrnně lze říci, že v důsledku zvyšování parciálního tlaku kyslíku ve spalovacím médiu dochází ke zvyšování emisí NO_x, SO₂, což koresponduje např. s literaturou [11, 14].

Tab. 5 Bilance popelovin

experiment	spalovací medium	položka	FV	HC	FA
A	21 O ₂ /79 N ₂	četnost (hm. %)	66,6	30,9	2,50
		nedopal (hm. %)	<0,1	6,25	5,82
B	30 O ₂ /70 N ₂	četnost (hm. %)	65,7	32,9	1,37
		nedopal (hm. %)	<0,1	5,16	6,18
C	21 O ₂ /79 CO ₂	četnost (hm. %)	52,3	46,2	1,48
		nedopal (hm. %)	<0,1	7,32	5,68
D	30 O ₂ /70 CO ₂	četnost (hm. %)	70,6	27,7	1,77
		nedopal (hm. %)	<0,1	6,27	4,98

FV – fluidní vrstva

HC – horký cyklon

FA – ulétavý popílek

Tab. 6 Obsah O₂, CO ve spalinách a obsah nedopalu v popelovinách

experiment	A	B	C	D
spalovací médium	21 O ₂ /79 N ₂	30 O ₂ /70 N ₂	21 O ₂ /79 CO ₂	30 O ₂ /70 CO ₂
O ₂ * [obj. %]	9,31	14,0	9,20	14,7
CO** [mg/m ³]	309	278	501	106
n/F ^d [hm. %]	0,182	0,0916	0,182	0,0906

*v suchých spalinách bez pneumotransportu

**přepočítáno na 11 % O₂ a normální teplotu (0 °C) a tlak (101,325 kPa) ve spalinách bez pneumotransportu

n – nedopal

F^d – palivo v suchém stavu

Tab. 7 Emisní faktory sledovaných látek

experiment	A	B	C	B
sledovaná látka / spalovací médium	21 O ₂ /79 N ₂	30 O ₂ /70 N ₂	21 O ₂ /79 CO ₂	30 O ₂ /70 CO ₂
NO _x [mg/kg]	6420	7200	6310	7890
SO ₂ [mg/kg]	988	1910	1380	1190
CO [mg/kg]	3520	1750	5140	650
N ₂ O [mg/kg]	236	376	1580	704
TZL [mg/kg]	932	628	759	799
CO ₂ [g/kg]	1680	2110	–	–
HCl [mg/kg]	12	27	96	65

Uvedené výsledky naznačují, že pro porovnání konverze N, S a Cl do spalin při rozdílné rychlosti dávkování nebo rozdílném objemu spalin apod. je nutné též porovnávat výtěžky jednotlivých polutantů, tj. emisní faktory, které jsou pro jednotlivé experimenty uvedené v Tab. 7. Emisní faktory polutantů SO₂, NO_x, N₂O a HCl (plynné chloridy vyjádřené jako HCl) jsou vyšší při spalování paliva vzduchem obohaceným kyslíkem (experiment B), než při spalování paliva vzduchem (experiment A). To je dáné lepšími podmínkami oxidace. Vlivem záměny spalovacího média, vzduchu za směs O₂ a CO₂ (21 obj. % O₂), došlo k snížení výtěžku NO_x, TZL a ke zvýšení výtěžku SO₂, HCl, a N₂O. Při zvýšení parciálního

tlaku kyslíku ve směsi O₂ a CO₂ (experiment D) byly výtěžky NO_x a TZL vyšší, naproti tomu nižší výtěžky SO₂, HCl a N₂O oproti experimentu C, viz Tab. 7.

6. Závěr

Zvýšení parciálního tlaku kyslíku ve spalovacím vzduchu přineslo zvýšení účinnosti spalovacího procesu a také zvýšení konverze kyselých složek (N, S, Cl) z paliva do plynu a tím zvýšení emisí NO_x, SO₂, a plyných chloridů vyjádřených jako HCl. Zvýšil se také obsah prachu a koncentrace N₂O ve spalinách. Naproti tomu, záměna spalovacího média tj. spalování za podmínek procesu oxy-fuel s 21 obj. % O₂ ve spalovacím médiu oproti spalování vzduchem, přineslo zhoršení účinnosti spalovacího procesu. Dále měla záměna spalovacího média mírný vliv na zvýšení emisí NO₂, SO₂ a výrazný vliv na konverzi Cl z paliva do plynu a tím tedy na zvýšení koncentrace plyných chloridů ve spalinách. Spalování za podmínek oxy-fuel procesu (30 obj. % O₂ ve spalovacím médiu) přineslo výrazné zvýšení účinnosti spalovacího procesu a výrazné zvýšení emisí NO_x a SO₂ ve spalinách oproti experimentu C (21 obj. % O₂ a 79 obj. % CO₂). Dále došlo k mírnému zvýšení konverze Cl z paliva do plynu, a tudíž k zvýšení emisí plyných chloridů vyjádřených jako HCl ve spalinách. Při experimentu D byly emise HCl nejvyšší ze všech diskutovaných experimentů.

Byla prokázána možnost účinně spalovat vhodně předupravenou slámu kukuřice ve fluidním reaktoru s bublinovou fluidní vrstvou, kde spalovacím médiem byl vzduch, obohacený vzduch kyslíkem a kyslík ve směsi s oxidem uhličitým. Jako nejjednodušší spalovací proces se jeví spalování obohaceným vzduchem o kyslík a to zejména díky možnosti využít vzduch obohacený kyslíkem jako odpadního produktu z výroby čistého dusíku v jednotkách VSA, PSA, VPSA vedoucí ke zlepšení účinnosti spalovacího procesu díky vysokému parciálnímu tlaku kyslíku ve spalovacím médiu a zmenšení objemu spalin na jednotku výkonu.

SYMBOLY A ZKRATKY

VSA – Vacuum Swing Adsorption

PSA – Pressure Swing Adsorption

VPSA – Vacuum Pressure Swing Adsorption

Experiment A – spalovací médium vzduch (21 obj. % O₂ a 79 obj. % N₂)

Experiment B – spalovací médium vzduch obohacený kyslíkem (30 obj. % O₂ a

70 obj. % N₂)

Experiment C – proces oxy-fuel, spalovací médium směs 21 obj. % O₂ a 79 obj. % CO₂

Experiment D – proces oxy-fuel, spalovací médium směs 30 obj. % O₂ a 70 obj. % CO₂

PODĚKOVÁNÍ

Tato práce byla podpořena díky finanční podpoře projektů Technologické agentury České republiky BROZEN č. TA01020366 a podpoře projektů Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy č. 20/2014 (specifický vysokoškolský výzkum).

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] POHOŘELÝ M., ŠYC M., DURDA T., HARTMAN M., SVOBODA K., PUNČOCHÁŘ M. Spalování kontaminované kukuřičné slámy ve fluidní vrstvě písku. *1st International Conference on Chemical Technology (ICCT 2013)*, Poster Presentations, pp. 1-16, Mikulov, Czech Republic, April 08-10, 2013.
- [2] POHOŘELÝ M., ŠYC M., KRČEK M., TOŠNAROVÁ M., DURDA T., BLUDSKÁ J., SVOBODA K., HARTMAN M., PUNČOCHÁŘ M. Fluidní spalování kontaminované biomasy II. *Res. Report No. 6*, pp. 38, Ústav chemických procesů AV ČR, v.v.i, Praha, 2012.
- [3] POHOŘELÝ M., DURDA T., ŠYC M., TOŠNAROVÁ M., KRČEK M., PUNČOCHÁŘ M. Fluidní spalování kontaminované biomasy III. *Res. Report No. 4*, pp. 27, Ústav chemických procesů AV ČR, v. v. i., Praha, 2013.
- [4] HARTMAN M., TRNKA O., POHOŘELÝ M. Minimum and Terminal Velocities in Fluidization of Particulate Ceramsite at Ambient and Elevated Temperature. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2007, vol. 46, no. 22, p.7260–7266.
- [5] POHOŘELÝ M., SVOBODA K., ŠYC M., DURDA T., PUNČOCHÁŘ M., HARTMAN M. Zařízení pro fluidní spalování pevných paliv či suspenzí. Pat. No. PV 2013-638. Applied: 13.08.20.
- [6] POHOŘELÝ M., SVOBODA K., ŠYC M., DURDA T., PUNČOCHÁŘ M., HARTMAN M. Zařízení pro fluidní spalování pevných paliv či suspenzí. Pat. No. PUV-28341. Applied: 13.08.20, Patented: 14.03.31.
- [7] HARTMAN M., SVOBODA K., POHOŘELÝ M., TRNKA O. Combustion of Dried Sewage Sludge in a Fluidized-Bed Reactor. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2005, vol. 44, p 3432–3441.
- [8] POHOŘELÝ M., SVOBODA K., TRNKA O., BAXTER D., HARTMAN M. Gaseous Emissions from the Fluidized-bed Incineration of Sewage Sludge. *Chem. Pap.*, 2005, vol. 59, no. 6b, p. 458–463.
- [9] POHOŘELÝ M., VOSECKÝ M., HEJDOWÁ P., PUNČOCHÁŘ M., SKOBLIA S., STAF M., VOŠTA J., KOUTSKÝ B., SVOBODA K. Gasification of Coal and PET in Fluidized Bed Reactor. *Fuel*, 2006, vol. 85, no. 17–18, p. 2458–2468.
- [10] DURDA T., POHOŘELÝ M., ŠYC M., KAMENÍKOVÁ P., SVOBODA K., JEREMIÁŠ M., PUNČOCHÁŘ M.: Spalování kontaminované kukuřičné slámy vzduchem obohaceným o kyslík ve fluidním loži. *2nd International Conference on Chemical Technology (ICCT 2014)*, Poster Presentations P62, (6 pp.full text on flash memory), Mikulov, Czech Republic, 07-09 April 2014.
- [11] DUAN L., ZHAO CH., ZHOU W., QU CH., CHEN X. O_2/CO_2 coal combustion characteristics in a 50 kW_{th} circulating fluidized bed. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2011, vol. 5, no. 4, p. 770–776.
- [12] LASEK J.A., JANUSZ M., ZUWALA J., GLÓD K., ILUK A.:Oxy-fuel combustion of selected solid fuels under atmospheric and elevated pressures. *Energy*, 1-8, in press, online 27 June 2013
- [13] Vyhláška č. 415/2012 o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší, Ministerstvo vnitra České Republiky, 2012.
- [14] WU K. K., CHANG Y. CH., CHEN CH. H., CHEN Y. D. High-efficiency combustion of natural gas with 21–30% oxygen-enriched air. *Fuel*, vol. 89, no. 9, p. 2455–2462.