

SPALOVÁNÍ KUKUŘIČNÉ SLÁMY V REAKTORU S BUBLINOVOU FLUIDNÍ VRSTVOU

Tomáš Durda^{a,b}, Jaroslav Moško^{a,b}, Michael Pohořelý^{a,b}, Karel Svoboda^a, Boleslav Zach^{a,b}, Michal Šyc^a,
Michal Jeremiáš^a, Aneta Krausová^{a,b}, Miroslav Punčochář^a

^a Ústav chemických procesů AV ČR, v. v. i., Rozvojová 135, 165 02 Praha 6,

^b Ústav energetiky, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Technická 5, 166 28 Praha 6,
email: durda@icpf.cas.cz

Článek se zabývá nízkoteplotním spalováním kukuřičné slámy s velmi nízkým bodem tání popela v reaktoru s bublinovou fluidní vrstvou. Je pozorován vliv záměny primárního materiálu fluidní vrstvy, vliv záměny spalovacího média a vliv zvýšení parciálního tlaku kyslíku ve spalovacím médiu na emise vybraných polutantů (CO, N₂O, NO_x, SO₂, HCl, TZL) a na obsah nedopalu v popelu. Pro sledování vlivu jednotlivých parametrů na emise polutantů a na obsah nedopalu v popelu byly provedeny spalovací testy ve třech režimech: (1) spalování vzduchem, (2) spalování vzduchem obohaceným o kyslík, (3) spalování směsí kyslíku a oxidu uhličitého. Použití keramzitu místo písku jako primárního materiálu fluidní vrstvy při spalování vzduchem způsobilo snížení nedopalu v popelu, snížení emisí CO a TZL a zvýšení emisí SO₂. Nahrazení dusíku oxidem uhličitým ve spalovacím médiu způsobilo zvýšení nedopalu v popelu a zvýšení emisí CO, N₂O, NO_x, SO₂, HCl a TZL. Zvýšení parciálního tlaku kyslíku ve spalovacím médiu způsobilo snížení nedopalu v popelu, snížení emisí CO a N₂O a zvýšení emisí NO_x, SO₂, HCl a TZL.

Klíčová slova: fluidní vrstva, spalování, emise, polutanty, kukuřičná sláma, zemědělská biomasa, biopalivo, spalování kyslíkem, oxy-fuel

Došlo 18. 2. 2016, přijato 21. 3. 2016

1. Úvod

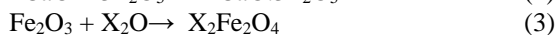
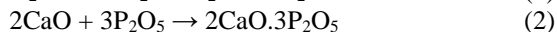
Práce se zabývá spalováním nedřevní zemědělské biomasy ve fluidní vrstvě moderními metodami, kterými jsou nízkoteplotní spalování, spalování vzduchem obohaceným o kyslík a spalování za podmínek tzv. „oxy-fuel procesu“ pomocí směsi kyslíku (čistota nad 95 % obj.) a oxidu uhličitého. Spalování vzduchem obohaceným o kyslík má potenciál zejména u malých decentralizovaných jednotek (1 – 50 MW), kde je možné využít vzduch obohacený kyslíkem jako odpadní proud z výroby dusíku. V druhém případě je používán „čistý“ kyslík jako oxidační činidlo ve směsi s CO₂, který modeluje recyklované suché spaliny. Recyklované spaliny slouží při spalování „čistým“ kyslíkem jako nutná náhrada za dusík ze vzduchu k moderování teploty spalování a zajištění fluidace v případě fluidních ohnišť (jejich dostatek zajišťuje odvod tepla z kotelní části parogenerátoru). Pro proces „oxy-fuel“ je kyslík získáván nejčastěji pomocí frakční destilace zkapalněného vzduchu. Spalování za podmínek procesu „oxy-fuel“ je považováno za jednu z možných technologií úpravy spalin pro záchyt CO₂ ze spalování.

Biomasa je dlouhodobě využívána jako obnovitelný zdroj energie. Biomasa pro termické procesy zahrnuje jak odpady dřevozpracujícího průmyslu, traviny, slámu, energetické rychle-růstoucí plodiny, tak i organické odpady apod. [1].

Vassilev a kol. [2 – 6] se zabývali složením a možnostmi využití různých druhů biomasy. Z výše uvedených studií je patrné, že spalování zemědělské biomasy

ve fluidních ohništích je problematické z důvodu vysokého obsahu alkalických kovů v popelu a nízké hustoty. Při použití písku jakožto běžného materiálu fluidní vrstvy dochází ke vzniku směsných oxidů (eutektik) s nízkým bodem tání, které zapříčiňují problémy spojené se sintrací a aglomerací fluidní vrstvy vedoucí až k defluidaci a odstavení celého spalovacího zařízení [1, 7, 8]. Při spalování slámy či trávy dochází ke vzniku nízko-tavných eutektik zejména při vysokém obsahu draslíku či dalších alkalických kovů v palivu reagujících s křemenným pískem [1, 7 – 12].

Oxid draselný, respektive uhličitán draselný, reaguje s oxidem křemičitým dle rovnice 1 za vzniku eutektické směsi s teplotou tání 770 °C. Oxid vápenatý reaguje s oxidem fosforečným dle rovnice 2 za vzniku eutektické směsi s teplotou tání 774 °C [1, 7].



Je také známo, že oxid železitý reaguje přednostně s alkalickými kovy (X = K nebo Na) dle rovnice 3. Teplota tání těchto látek (eutektické směsi) je 1135 °C [7]. Materiál bohatý na oxid železitý je tudíž možno použít pro řešení problémů spojených s aglomerací fluidní vrstvy. Problémy spojené s defluidací vrstvy je možné řešit pomocí aditiv, náhradou materiálu fluidní vrstvy nebo spolu-spalováním s uhlím. Vhodná aditiva obecně zvyšující teplotu tání popela jsou např. kaolín, keramika, oxid hlinitý, oxid vápenatý, oxid hořečnatý a dolomit [8].

Průvodním jevem defluidace je shlukování (aglomerace, sintrování, slinování a spékání) drobných částic do větších agregátů. K tomuto procesu může docházet jak při nižších teplotách (sušení při vyšších vlhkostech), tak při teplotách vysokých (spékání částic při spalování). Ke shlukování částic dochází působením adhezivních sil vyvolaných přilnavostí jejich povrchů. Značná hybnost rychle se pohybujících částic ve fluidní vrstvě působí proti kohezním silám a má tendenci rozbít a rozdužovat tvořící se shluky [7, 13].

Sun a kol. [9] sledovali vliv náhrady křemenného písku za aluminu na aglomeraci fluidní vrstvy při spalování stonků bavlníku s vysokým obsahem K_2O (33 % hm.) v popelu. Aluminu jako prevenci před aglomerací fluidní vrstvy použili také Ninduangdee a kol. [14] při spalování skořápek z palmových jader a Aromdee a kol. [15] při spalování skořápek burských oříšků. Shimizu a kol. [16] použili porézní aluminu jako alternativní materiál fluidní vrstvy při spalování cedrových pelet. Öhman a kol. [17] použili přídavek kaolinu do fluidní vrstvy písku jako prevenci před aglomerací při spalování pšeničné slámy nebo kůry, obojí s vyšším obsahem draslíku v popelu (20,7 % hm. draslíku v popelu pšenice, 6,36 % hm. draslíku v popelu kůry). Přidání malého množství kaolinu do fluidní vrstvy zvýšilo kritickou teplotu, při které docházelo k aglomeraci fluidní vrstvy. Při spalování slámy z pšenice byla kritická teplota zvýšena o 100 °C, v případě spalování kůry pouze o 10 °C. Přidaný kaolin, resp. jeho hlavní složka kaolinit ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$), byl přeměněn na částice metakaolinu ($Al_2Si_2O_7$), na který se draslík vázal.

Llorente a kol. [18] použili vápenec místo běžně používaného písku pro zvýšení kritické teploty, při které dochází ke slinování a aglomeraci primárního materiálu fluidní vrstvy a popela. Dále prokázali, že použití vápence jako materiálu fluidní vrstvy eliminuje možné problémy s aglomerací a také snižuje usazování slinutého popela na výměnících tepla. Chou a kol. [19] zjistili, že přídavek CaO nebo $CaCO_3$ má příznivý vliv na emise těžkých kovů při spalování směsného paliva (piliny, polyetylen, polypropylen) ve fluidním loži. Ve své práci také uvedli, že $CaCO_3$ má silnější inhibiční vliv na defluidaci vrstvy než CaO .

Pro komplexnost přístupu ke spalování kukuřičné slámy s velmi vysokým obsahem draslíku je třeba zdůraznit známý fakt, že v redukční atmosféře jsou charakteristické teploty deformace, měknutí, tání a tečení popelu o 50 – 150 °C nižší než v atmosféře oxidační [20].

Diego a kol. [21] spalovali antracit směsí kyslíku a oxidu uhličitého (35 % obj. O_2 a 65 % obj. CO_2) a vzduchem obohaceným o kyslík (35 % obj. O_2 a 65 % obj. N_2) ve fluidním reaktoru. Materiálem fluidní vrstvy byl písek a pro suché odsíření byl použit vápenec. Sledován byl vliv teploty a vliv recirkulujících spalin s postupným přídavkem SO_2 , NO a $H_2O(g)$ na emise NO , N_2O , SO_2 a CO . Byl zaznamenán pokles emisí SO_2 s rostoucí teplotou do 850 °C při spalování antracitu vzduchem obohaceným o kyslík (35 % obj. O_2 a 65 % obj. N_2) a pokles

emisí SO_2 s rostoucí teplotou do 920 °C při užití spalovacího média směsí kyslíku a oxidu uhličitého (35 % obj. O_2 a 65 % obj. CO_2). Nad uvedené reakční teploty docházelo ke zvýšení emisí SO_2 s rostoucí spalovací teplotou. V obou reakčních atmosférách (vzduch obohacený kyslíkem, směs kyslíku a oxidu uhličitého) je vliv teploty na emise NO a N_2O stejný. S rostoucí teplotou emise NO rostou a emise N_2O klesají [21].

Stejnou závislost vlivu teploty na emise NO a N_2O zjistili de las Obras-Lozcertales a kol. [22], kteří spalovali antracit, bituminózní uhlí a lignit v reaktoru s bublinovou fluidní vrstvou. Diego a kol. [21] uvádějí, že při spalování vzduchem obohaceným o kyslík (35 % obj. O_2 a 65 % obj. N_2) i při spalování směsí kyslíku a oxidu uhličitého (35 % obj. O_2 a 65 % obj. CO_2) docházelo s rostoucí teplotou k exponenciálnímu poklesu emisí CO . Při spalování antracitu směsí kyslíku a oxidu uhličitého (35 % obj. O_2 a 65 % obj. CO_2) byl také sledován vliv přídavku jednotlivých plynů (SO_2 , NO a $H_2O(g)$) do recirkulovaných spalin.

Přídavek SO_2 do recirkulovaných spalin při spalovací teplotě 850 °C (35 % obj. O_2 a 65 % obj. CO_2) měl výrazný vliv na zvýšení emisí CO , mírný vliv na snížení emisí NO a žádný vliv na emise N_2O . Naproti tomu při spalování za teploty 925 °C (35 % obj. O_2 a 65 % obj. CO_2) měl přídavek SO_2 do recirkulovaných spalin mírný vliv na snížení emisí NO , slabý vliv na zvýšení emisí CO a žádný vliv na emise N_2O . Přídavek NO do recirkulovaných spalin neměl významný vliv na emise SO_2 , N_2O a CO při spalovací teplotě 925 °C. Přídavek vodní páry do recirkulovaných spalin výrazně snížil emise NO , zvýšil emise SO_2 a měl slabý vliv na zvýšení emisí CO a N_2O při spalování směsí kyslíku a oxidu uhličitého (35 % obj. O_2 a 65 % obj. CO_2) [21].

Duan a kol. [23] se zabývali sledováním emisí NO během spalování tří různých typů biomasy (rýžové slupky, dřevní piliny a moučka) a bituminózního uhlí vzduchem, a směsí kyslíku a oxidu uhličitého v cirkulující fluidní vrstvě. Spalování všech paliv probíhalo za teploty 850 °C a při přebytku kyslíku 1,05. Obsah dusíku v suchém stavu byl 1,12 % hm. u slupek rýže, 0,39 % hm. v případě dřevních pilin, 0,75 % hm. pro dřevní moučku a 1,04 % hm. v případě bituminózního uhlí. Při spalování rýžových slupek směsí kyslíku a oxidu uhličitého byla nižší konverze palivového N do plynu, a tudíž i emise NO byly nižší než při spalování vzduchem. Stejný trend byl pozorován i u ostatních výše zmíněných paliv.

Rešerší bylo zjištěno, že pro spalování pevných paliv směsí kyslíku a oxidu uhličitého modelujícího proces „oxy-fuel“ platí:

- Při spalování uhlí je konverze uhlíku při užití spalovací směsí O_2+N_2 vyšší než v případě směsí O_2+CO_2 při stejné koncentraci O_2 ve spalovacím médiu a stejné teplotě spalování. Důvodem je intenzifikace Boudouardovy reakce vyšším parciálním tlakem CO_2 . Při Boudouardově reakci dochází k oxidaci fixního uhlíku (pevně vázaného uhlíku) a redukcí oxidu uhli-

čitého na oxid uhelnatý, což má za následek zpomalení spalovacího procesu. Důvodem je silně endotermní charakter diskutované reakce, který způsobuje snižování teploty ve spalovacím prostoru a teploty hořící částice [27].

- S rostoucí teplotou dochází ke zvýšení emisí NO a k poklesu emisí N₂O [23]. To lze vysvětlit vyšší oxidací intermediátu NCO na NO místo reakce na N₂O [24]. Také je sníženo množství fixního uhlíku, na kterém může docházet k heterogenní redukční reakci NO na N₂O [21, 24 – 26].
- Je vyšší konverze palivového dusíku na NO při spalování biomasy než při spalování bituminózního uhlí. To je dáno vyšším podílem prchavé hořlaviny v biomase oproti bituminóznímu uhlí. Při odplynění biomasy vzniká oproti uhlí více plynných dusíkatých látek, které snadněji reagují na NO [22].
- Náhrada spalovacího vzduchu, respektive směsi kyslíku a dusíku, za směs kyslíku a oxidu uhličitého vedla k vyšším koncentracím SO₂ ve spalinách [21, 27].
- Optimální teplota pro suché odsíření (dávkování vápence do fluidní vrstvy) za podmínek „oxy-fuel“ se pohybuje v intervalu 880 – 925 °C v závislosti na parciálním tlaku CO₂, na složení spalovacího média, respektive spalin, a na parciálním tlaku vodní páry. Dále může být optimální teplota pro suché odsíření ovlivněna druhem a složením paliva [21, 28, 29]. Optimální teplota pro odsíření dle Diega a kol. je 900 – 925 °C [21, 28] a dle Díeze a kol. je 880 – 890 °C [29].

2. Cíl

Cílem práce bylo proměřit vliv záměny materiálu fluidní vrstvy, vliv záměny spalovacího média a vliv zvýšení parciálního tlaku kyslíku ve spalovacím médiu na emise jednotlivých významných polutantů (CO, NO_x, N₂O, SO₂, HCl, tuhé znečišťující látky – TZL) a na obsah mechanického nedopalu (nespáleného uhlíku) v popelu. Koncentrace O₂ ve spalovacím médiu byla na vstupu do fluidního reaktoru v rozsahu 21 – 30 % obj..

Materiálem fluidní vrstvy byly:

- písek – experiment A,
- keramzit – experiment B až E.

Spalovací média byla:

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

3. Experimentální část

3.1. Vlastnosti použitých materiálů

Jako biopalivo pro všechny experimenty byla použita sláma z celých rostlin kukuřice seté vypěstovaných

v České republice. Jedná se o problematické biopalivo pro spalování z důvodu nízké sypané váhy a velmi vysokého obsahu draslíku v popelu, který způsobuje sintraci a aglomeraci materiálu fluidní vrstvy. Pro spalování byla použita velikostní frakce drcených slámových pelet 1,0 – 1,6 mm. Palivo-energetické vlastnosti jsou uvedeny v tab. 1.

Chemické složení popela z použitého biopaliva a keramzitu je uvedené v tab. 2. Křemenný písek se skládal z 99,7 % hm. SiO₂, 0,2 % hm. Al₂O₃ a zbylých 0,1 % hm. byly příměsi, přičemž obsah jednotlivých komponent příměsí nebyl větší než 0,02 % hm.. Z chemického složení popela je patrný vysoký obsah K₂O, který má společně s SiO₂ významný vliv (za teploty nad 800 °C) na tvorbu eutektických směsných oxidů fungujících jako pojídlo pro jemné částice popela a písku. Následkem toho dochází k vzniku aglomerátů, které mohou zapříčinit defluidaci vrstvy.

Tab. 1 Palivo-energetické vlastnosti kukuřičné slámy

Tab. 1 Proximate and ultimate analysis and calorific values of corn straw

Vlastnost, veličina	Jednotka	Biopalivo		
		raw	dry	daf
Vlhkost, W	hm. %	8,32	–	–
Hořlavina, h	hm. %	87,4	95,3	100,0
Popel, A	hm. %	4,32	4,71	–
Prchavá hořlavina, V	hm. %	65,1	71,1	74,6
Fixní uhlík, FC	hm. %	22,2	24,2	25,4
Spalné teplo, HHV	MJ.kg ⁻¹	17,0	18,8	19,8
Výhřevnost, LHV	MJ.kg ⁻¹	15,8	17,5	18,4
C	hm. %	42,1	46,0	48,2
H	hm. %	5,54	6,04	6,34
N	hm. %	1,27	1,39	1,45
O	hm. %	38,3	41,8	43,8
S celková	hm. %	< 0,13	< 0,13	< 0,13
S spalitelná	hm. %	0,106	0,117	0,124
Cl	g.kg ⁻¹	0,132	0,146	0,154

Kromě křemenného písku byl jako materiál fluidní vrstvy použit keramzit a to z důvodu dobré znalosti jeho chování a vhodných mechanicko-transportních vlastností [30]. Keramzit obsahuje výrazně nižší podíl oxidu křemičitého a výrazně vyšší obsah oxidu železitého než křemenný písek, což má výrazný vliv na snížení pravděpodobnosti aglomerace materiálu fluidní vrstvy s popelem biopaliva [1, 7].

Mezi základní fyzikální vlastnosti partikulárních materiálů patří sypaná hmotnost, skutečná a zdánlivá hustota, rozdělení částic dle velikosti, chování při fluidaci, např. prahová rychlost fluidace a další charakteristiky jako porozita částic a mezerovitost vrstvy částic.

Primárním materiálem fluidní vrstvy byl písek – experiment A a keramzit – experimenty B – E. Práh fluidace písku i keramzitu experimentálně stanovený za provozních podmínek kotle (750 °C a tlak blízký atmosférickému) a vypočítaný činil 15 cm.s⁻¹. Prahová rychlost fluidace částic kukuřice byla vypočtena 22 cm.s⁻¹ (750 °C

a 101,325 kPa). Výsledky naznačují, že částice kukuřice budou primárně hořet ve vrstvě, nebo na jejím povrchu.

Tab. 2 Složení laboratorně připraveného popela biopaliva a materiálu fluidní vrstvy (keramzitu) měřené XRF analýzou

Tab. 2 Composition of laboratory pretreated ash from corn straw and of fluidized bed material (ceramsite) measured by XRF analysis

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

PMD – pod mezí detekce (below specific limit of detection)

Tab. 3 Fyzikální vlastnosti materiálu fluidní vrstvy a biopaliva

Tab. 3 Physical properties of fluidized bed material and biofuel

Materiál	Keramzit	Biopalivo
Velikost částic (mm)	0,80–1,12	1,0–1,6
Střední velikost částic (mm)	0,960	1,30
Sypná hmotnost (kg.m ⁻³)	676	315
Zdánlivá hustota (kg.m ⁻³)	1142	952
Skutečná hustota (kg.m ⁻³)	1999	1454
Porozita částice (%)	43	35
Mezerovitost vrstvy (%)	41	67
Prahová rychlost fluidace* (m.s ⁻¹)	0,25	0,33
Prahová rychlost fluidace** (m.s ⁻¹)	0,15	0,22
Prahová rychlost úplné fluidace* (m.s ⁻¹)	0,32	0,43
Prahová rychlost úplné fluidace** (m.s ⁻¹)	0,20	0,32

*při 25 °C a 101,325 kPa (at 25 °C and 101,325 kPa)

**při 750 °C a 101,325 kPa (at 750 °C and 101,325 kPa)

3.2. Experimentální jednotka

Experimenty byly provedeny na reaktoru s hustou bublinovou fluidní vrstvou (obr. 1) [31 – 39].

On-line analýza spalin byla provedena pomocí multifunkčního analyzátoru Horiba PG-350, který obsahuje infračervený analyzátor pro měření obsahu CO, CO₂ a SO₂, paramagnetický analyzátor pro měření koncentrace O₂ a chemiluminiscenční analyzátor pro měření emisí NO_x (suma NO₂ a NO) [40]. Pro měření emisí N₂O byl použit infračervený analyzátor Uras 14. Obsah TZL byl stanoven dle ČSN EN 13284–1 a emise plyných chloridů vyjádřených jako HCl byly stanoveny dle ČSN EN 1911. Vzhledem k lokálním dispozicím v místě odběru nelze realizovat isokinetický odběr spalin. Obsah plyných chloridů vyjádřených jako HCl (respektive Cl⁻) ve spalinách byl stanoven iontovou chromatografií na přístroji Dionex ICS-5000 po jejich absorpci v roztoku NaOH o koncentraci 0,01 mol.l⁻¹ – 0,1 mol.l⁻¹.

3.3. Experimentální podmínky

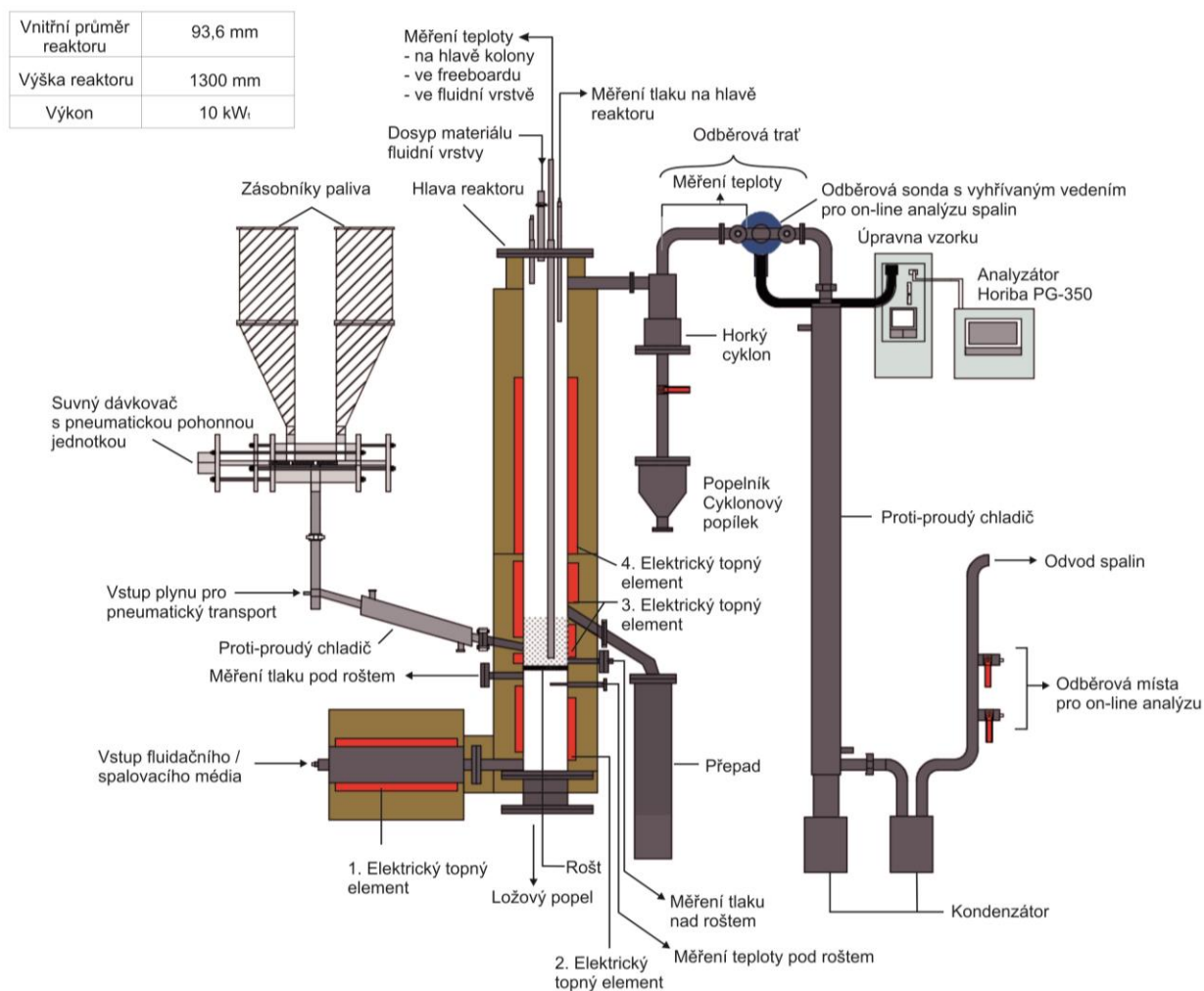
Společné parametry uvedených experimentů byly:

- objemový tok primárního (fluidačního) média 2 m³.h⁻¹ (0 °C; 101,325 kPa),
- objemový tok sekundárního (transportního) média – pneumotransportu 1 m³.h⁻¹ (0 °C; 101,325 kPa),
- počáteční objem nehybné vrstvy (650 ml),
- poměr výšky nehybné vrstvy a vnitřního průměru reaktoru (cca 1),
- $U_{přeb} = 2xU_{mf}$ (bez započtení transportního plynu), jednalo se tudíž o bublinovou fluidní vrstvu.

Provozní podmínky jednotlivých spalovacích pokusů jsou uvedeny v tab. 4. Teplota ve vrstvě, která má spolu se součinitelem přebytku vzduchu hlavní vliv na spalovací proces, byla téměř identická. Rozdíl mezi součinitelem přebytku vzduchu (λ) u jednotlivých spalovacích experimentů byl přijatelný.

Kvalitu spalovacího procesu určuje vedle teploty a přebytku vzduchu také parciální tlak kyslíku v reakční zóně, obsah CO ve spalinách (chemický nedopal) a množství hořlaviny v popelu (mechanický nedopal). Spalování zemědělské biomasy probíhalo za teploty 750 °C. Materiálem fluidní vrstvy byl křemenný písek (experiment A) a keramzit (experimenty B až E).

Měněným parametrem byla rychlost dávkování paliva, aby součinitel přebytku vzduchu, resp. kyslíku (λ), byl v rozsahu 1,8 – 2.



Obr. 1 Schéma experimentálního zařízení pro spalování ve fluidní vrstvě [31–39]
Fig. 1 Scheme of experimental unit for bubbling fluidized-bed combustion [31–39]

Tab. 4 Provozní podmínky experimentů
Tab. 4 Operating conditions during the tests

Experiment	A	B	C	D	E
Materiál fluidní vrstvy	písek	keramzit	keramzit	keramzit	keramzit
Spalovací médium	21 O ₂ /79 N ₂	21 O ₂ /79 N ₂	30 O ₂ /70 N ₂	21 O ₂ /79 CO ₂	30 O ₂ /70 CO ₂
λ (-)	1,79	1,94	1,98	1,86	1,99
Délka experimentu (h:min)	6:50	6:37	2:52	2:10	2:19
Dávkování paliva (g.h ⁻¹)	320	260	370	290	360
O ₂ ve spalínách* (obj. %)	8,6	9,3	14,0	9,2	14,7
Teplota ve fluidní vrstvě (°C)	760 ± 10	750 ± 10	750 ± 10	750 ± 10	730 ± 10
Teplota ve freeboardu (°C)	760 ± 10	750 ± 10	740 ± 10	720 ± 10	720 ± 10
Teplota v horkém cyklu (°C)	350 ± 10	320 ± 10	300 ± 10	350 ± 10	340 ± 10
Teplota v odběrovém místě pro vzorkování spalín (°C)	200 ± 10	190 ± 10	180 ± 10	240 ± 10	230 ± 10

*v suchých spalínách bez pneumatického transportu

*in dry flue gas basis and calculation without pneumatic transport gas

4. Výsledky a diskuse

V této práci jsou uváděny průměrné hodnoty emisí (dále jen emise) sledovaných polutantů (CO, NO_x, N₂O, SO₂, HCl, tuhé znečišťující látky – TZL) za normálních podmínek (0 °C, 101,325 kPa) a referenčního obsahu kyslíku ve spalínách – 11 %, viz tab. 5.

Obsah nedopalu je uveden v tab. 6. Ani v jednom z uvedených experimentů nedošlo k aglomeraci (sintraci) materiálů fluidní vrstvy.

4.1. Porovnání experimentu A a B

Jako prevence před aglomerací byl jako primární materiál fluidní vrstvy použit keramzit (experimenty B až E) místo křemenného písku (experiment A) a nízká spalovací teplota 750 °C. Záměna písku (experiment A, 21 % obj. O₂ a 79 % obj. N₂) za keramzit (experiment B, 21 % obj. O₂ a 79 % obj. N₂) přinesla pokles emisí CO a TZL ve spalínách o cca 25 %, viz tab. 5. Kromě snížení emisí CO a TZL přinesla záměna písku za keramzit také snížení obsahu nedopalu v popelu (tab. 6) o cca 50 %. Uvedené lze částečně přisoudit zvýšení přebytku vzduchu z 1,79 (experiment A, 21 % obj. O₂ a 79 % obj. N₂) na 1,94 (experiment B, 21 % obj. O₂ a 79 % obj. N₂).

Koncentrace plynných chloridů vyjádřených jako HCl se v obou případech pohybovala na úrovni cca 1 mg.m⁻³, viz tab. 5. Použití keramzitu mělo mírný vliv na zvýšení emisí SO₂ ve spalínách, cca o 1/3. Nízké emise SO₂ (tab. 5) byly dány nízkým obsahem spalitelné síry v palivu.

Při obou diskutovaných spalovacích testech (experiment A a B) byly emise CO, SO₂ a TZL pod specifickým emisním limitem dle vyhlášky 415/2012 Sb. Koncentrace N₂O (tab. 5) byla ve spalínách nízká a v obou

případech téměř identická. Naproti tomu emise NO_x byly nad hodnotou specifického emisního limitu. Spalování kukuřičné slámy vzduchem tudíž probíhalo kvalitněji na keramzitu než na písku.

4.2. Porovnání experimentu B a D

Záměna spalovacího média – vzduchu (experiment B, 21 % obj. O₂ a 79 % obj. N₂) za spalovací médium obsahující 21 % obj. O₂ a 79 % obj. CO₂ (experiment D) přinesla zvýšení emisí CO a TZL i zvýšení obsahu nedopalu v popelu (tab. 6). Z výše uvedeného vyplývá, že došlo ke zhoršení kvality procesu spalování biopaliva. Ke stejnému závěru dospěly i jiné výzkumné týmy, např. v literatuře [42, 43] zabývající se spalováním uhlí kyslíkem s recirkulací spalin.

Při porovnání experimentů B (21 % obj. O₂ a 79 % obj. N₂) a D (21 % obj. O₂ a 79 % obj. CO₂) je zřejmé, že u experimentu D byly významně zvýšeny i emise N₂O, HCl a slabě emise NO_x a SO₂, viz tab. 6, což je v souladu s prací Diego a kol. pro jimi sledované polutanty (CO, N₂O, NO, SO₂). Opačný trend u emisí NO_x zjistil Duan a kol. [23], což lze vysvětlit nízkým obsahem N v palivu, nižší spalovací teplotou a absencí primárních opatření pro redukci NO_x (stupňovitý přívod vzduchu) a zejména použitím experimentálního spalovacího zařízení s cirkulující fluidní vrstvou. Zvýšení emisí SO₂ při záměně CO₂ za N₂ lze vysvětlit snížením samo-odsiřovací schopnosti popela z důvodu zvýšení parciálního tlaku CO₂ v plynu a tím zabránění kalcinace a následně žádoucí nepřímé sulfatace.

V testu D byly emise SO₂, CO a TZL ve spalínách pod hodnotou specifického emisního limitu dle vyhlášky 415/2012 Sb. Naproti tomu emise NO_x byly nad hodnotou specifického emisního limitu.

Tab. 5 Průměrné hmotnostní koncentrace sledovaných polutantů ve spalínách a jejich legislativní limity

Tab. 5 Average mass concentrations of selected pollutants in the flue gas and their specific limits in the Czech Republic

Experiment	A	B	C	D	E	Legislativní limit pro	
Sledovaná látka / spalovací médium	21 O ₂ /79 N ₂	21 O ₂ /79 N ₂	30 O ₂ /70 N ₂	21 O ₂ /79 CO ₂	30 O ₂ /70 CO ₂	výkonové měřítko 5–50 MW	
NO _x (mg.m ⁻³)	–	563	1140	615	1290	400 ¹⁾	500 ²⁾
SO ₂ (mg.m ⁻³)	56	87	152	134	193	800 ¹⁾	400 ²⁾
CO (mg.m ⁻³)	395	309	78	501	106	650 ¹⁾	500 ²⁾
N ₂ O (mg.m ⁻³)	21	21	16	155	116	–	–
TZL (mg.m ⁻³)	213	54	104	74	139	250 ¹⁾	30 ²⁾
HCl (mg.m ⁻³)	0,9	1,0	4,5	9,2	10,6	–	–

*v suchých spalínách za normálních podmínek (0 °C; 101,325 kPa) bez pneumatického transportu

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) [41]

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) [41]

*in dry flue gas basis at the normal conditions (0 °C; 101,325 kPa) and calculation without pneumatic transport gas

1) Decree 415/2012 Sb. – Specific emission limits for fluidized bed stationary sources validated by 31. 12. 2017. (NO_x and SO₂ in relation to fluidized bed combustion, CO and dust in relation to combustion of biomass) [41]

2) Decree 415/2012 Sb. – Specific emission limits for fluidized bed stationary sources validate from 1. 1. 2018. (SO₂ in relation to fluidized bed combustion, CO in relation to combustion of biomass except for pellets and briquettes from biomass) [41]

Tab. 6 Uhlíkový nedopal v popelu (ztráta žiháním při teplotě 815 °C)**Tab. 6** Unburned char in the ash (loss of ignition at 815 °C)

Experiment	A	B	C	D	E
Spalovací médium	21 O ₂ /79 N ₂	21 O ₂ /79 N ₂	30 O ₂ /70 N ₂	21 O ₂ /79 CO ₂	30 O ₂ /70 CO ₂
Materiál fluidní vrstvy	písek	keramzit	keramzit	keramzit	keramzit
n/F	0,151	0,0776	0,0419	0,167	0,0833
n/F ^d	0,167	0,0846	0,0458	0,182	0,0906
n/C _F ^d	0,365	0,182	0,100	0,398	0,215

n – uhlíkový nedopal (unburned char), C_F^d– obsah uhlíku v suchém palivu (content of carbon in dry fuel basis)
F – palivo původní (raw fuel), F^d–suché palivo (dry fuel)

4.3. Porovnání experimentu C a E

Porovnáním experimentu C (30 % obj. O₂ a 70 % obj. N₂) a E (30 % obj. O₂ a 70 % obj. CO₂) bylo pozorováno zvýšení emisí CO, N₂O, NO_x, SO₂, HCl a TZL ve spalinách (tab. 5) a mechanického nedopalu v popelu (tab. 6). Uvedené je v souladu s výsledky publikovanými v literatuře [27, 28] a výsledky získanými při užití nižšího parciálního tlaku kyslíku ve spalovacím médiu (kapitola 4.2. – porovnání experimentu B a D).

U experimentu C (30 % obj. O₂ a 70 % obj. N₂) i E (30 % obj. O₂ a 70 % obj. CO₂) byly pouze emise NO_x nad specifickým emisním limitem dle vyhlášky 415/2012 Sb., ostatní legislativně sledované polutanty plnily uvedený limit.

4.4. Porovnání experimentu B a C

Při spalování diskutovaného biopaliva vzduchem obohaceným o kyslík (experiment C, 30 % obj. O₂ a 70 % obj. N₂) byly významně sníženy emise CO i N₂O a snížen nedopal v popelu a zvýšeny emise SO₂, NO_x, HCl a TZL ve spalinách oproti spalování biopaliva vzduchem (experiment B, 21 % obj. O₂ a 79 % obj. N₂).

Zvýšení parciálního tlaku kyslíku vede ke zvýšení teploty hořící částice, a tím i ke zvýšení četnosti prasklých (puklých) částic. Fragments částic jsou pak rychle unášeny nad vrstvu, kde již není tak intenzivní přestup tepla a je i obvykle mírně nižší teplota. Vyšší parciální tlak kyslíku intenzifikuje proces spalování, což se projevuje vyšším stupněm vyhoření neprasklých i prasklých částic ve vrstvě, na ní i nad ní. Je nutné poznamenat, že většina částic biopaliva je spalována prohořivacím mechanismem. Z výše uvedeného vyplývá, že dochází ke zvýšení obsahu TZL ve spalinách a snížení nedopalu v popelu při spalování vzduchem obohaceným o kyslík (experiment C) proti spalování vzduchem (experiment B), viz tab. 5 a tab. 6. Stejný závěr publikoval Czakiert a kol. [44], který zjistil, že ztráty způsobené nedopalem jsou výrazně nižší za podmínek spalování obohaceným vzduchem o kyslík než při spalování vzduchem v reaktoru s cirkulující fluidní vrstvou.

Konverze síry z paliva do spalin na molárním základě byla cca o 50 % nižší u pokusu B (21 % obj. O₂ a 79 % obj. N₂) proti pokusu C (30 % obj. O₂ a 70 % obj. N₂), což je v souladu s daty publikovanými Czakiertem a kol. [44].

Zvýšení koncentrace kyslíku v reakční zóně mělo vliv i na zvýšení emisí NO_x, což je ve shodě s jinými výzkumnými týmy např. literatura [24, 43, 44] a mělo vliv i na snížení emisí N₂O. Czakiert a kol. [44] prokázali, že koncentrace kyslíku ve spalovacím médiu je klíčovým faktorem při formování emisí NO_x a N₂O z palivového N. Dále jsou emise NO a N₂O významně ovlivňovány teplotou v reaktoru a též teplotou hořících částic. Teplota hořící částice diskutovaného biopaliva je v případě užití spalovacího média obohaceného vzduchem o kyslík vyšší než při užití vzduchu. Je patrné, že emise NO_x a N₂O budou vznikat zejména reakcemi probíhajícími v plynné fázi, kde jsou prekursory HCN či NH₃ z důvodu vysokého obsahu prchavé hořlaviny v diskutovaném biopalivu. Roli hraje také homogenní reakce NCO na NO a heterogenní reakce NCO na povrchu fixního uhlíku na NO [24].

4.5. Porovnání experimentu D a E

Porovnáním experimentu D (21 % obj. O₂ a 79 % obj. CO₂) a E (30 % obj. O₂ a 70 % obj. CO₂) bylo pozorováno násobné snížení emisí CO (tab. 5) a významné snížení mechanického nedopalu v popelu (tab. 6).

Z výsledků je zřejmé, že zvýšení parciálního tlaku kyslíku ve spalovací směsi O₂ a CO₂ (experiment E, 30 % obj. O₂ a 70 % obj. CO₂) přineslo zvýšení emisí SO₂ a NO_x, mírné zvýšení koncentrace HCl a snížení emisí N₂O oproti experimentu D, (21 % obj. O₂ a 79 % obj. CO₂). Uvedené je v souladu s výsledky publikovanými v literatuře [27, 28, 29].

5. ZÁVĚR

Článek se zabývá nízkoteplotním spalováním kukuřičné slámy (750 °C) s velmi nízkým bodem tání popela v reaktoru s bublinovou fluidní vrstvou. Spalovací testy probíhaly ve třech režimech, kterými jsou spalování vzduchem, spalování vzduchem obohaceným o kyslík a spalování směsi kyslíku a oxidu uhličitého. V rámci spalovacích testů byl sledován vliv záměny primárního materiálu písku za keramzit při spalování kukuřičné slámy vzduchem, vliv záměny N₂ za CO₂ ve směsi s O₂ ve spalovacím médiu a vliv zvýšení parciálního tlaku kyslíku ve směsi s N₂ nebo CO₂ ve spalovacím médiu.

Bylo zjištěno, že:

- použití keramzitu, místo písku, jako primárního materiálu fluidní vrstvy při spalování vzduchem způsobilo snížení nedopalu v popelu, snížení emisí CO a TZL a zvýšení emisí SO₂.
- Nahrazení dusíku oxidem uhličitým ve spalovacím médiu způsobilo zvýšení nedopalu v popelu, zvýšení emisí CO, N₂O, SO₂, HCl a TZL a jen velmi mírné zvýšení emisí NO_x.
- Zvýšení parciálního tlaku kyslíku ve spalovacím médiu způsobilo snížení nedopalu v popelu, snížení emisí CO a N₂O a zvýšení emisí NO_x, SO₂, HCl a TZL.

Spalování vzduchem obohaceným o kyslík se jeví jako nejzajímavější alternativa ke spalování vzduchem vedoucí ke zlepšení účinnosti spalovacího procesu díky vysokému parciálnímu tlaku kyslíku ve spalovacím médiu a zmenšení objemu spalin na jednotku výkonu. Výhodou tohoto procesu může být také využití vzduchu obohaceného kyslíkem jako vedlejšího produktu z výroby čistého dusíku např. na molekulových sítích. Nevýhodou tohoto procesu je výrazné zvýšení emisí některých polutantů (NO_x, SO₂, HCl, TZL) a tím i zvýšení nároků na čištění spalin.

Symboly a zkratky

Experiment A – spalovací médium vzduch – směs kyslíku a dusíku (21 % obj. O₂ a 79 % obj. N₂), materiál fluidní vrstvy písek

Experiment B – spalovací médium vzduch – směs kyslíku a dusíku (21 % obj. O₂ a 79 % obj. N₂), materiál fluidní vrstvy keramzit

Experiment C – spalovací médium vzduch obohacený kyslíkem – směs kyslíku a dusíku (30 % obj. O₂ a 70 % obj. N₂), materiál fluidní vrstvy keramzit

Experiment D – spalovací médium směs kyslíku a oxidu uhličitého (21 % obj. O₂ a 79 % obj. CO₂), materiál fluidní vrstvy keramzit

Experiment E – spalovací médium směs kyslíku a oxidu uhličitého (30 % obj. O₂ a 70 % obj. CO₂), materiál fluidní vrstvy keramzit

TZL – tuhé znečišťující látky

PMD – pod mezí detekce

Poděkování

Tato práce vznikla díky finanční podpoře projektu Technologické agentury České republiky BROZEN č. TA01020366 a podpoře projektu Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy č. 20/2016 (specifický vysokoškolský výzkum).

Literatura

1. Werther J., Saenger M., Hartage E. U., Ogada T., Siagi Z. Combustion of agricultural residues. *Progress in Energy and Combustion Science* 26, 2000, 1.
2. Vassilev S.V., Baxter D., Andersen L. K., Vassileva Ch. G.: An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel* 89, 2010, 913.
3. Vassilev S.V., Baxter D., Andersen L. K., Vassileva Ch. G., Morgan T. J.: An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass, *Fuel* 94, 2012, 1.
4. Vassilev S.V., Baxter D., Andersen L. K., Vassileva Ch. G.: An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase–mineral and chemical composition and classification. *Fuel* 105, 2013, 40.
5. Vassilev S.V., Baxter D., Andersen L. K., Vassileva Ch. G.: An overview of the composition and application of biomass ash. Part 2. Potential utilisation, technological and ecological advantages and challenges. *Fuel* 105, 2013, 19.
6. Vassilev S.V., Baxter D., Vassileva Ch. G.: An overview of the behaviour of biomass during combustion: Part I. Phase-mineral transformations of organic and inorganic matter. *Fuel* 112, 2013, 391.
7. Hartman M., Trnka O., Svoboda K., Veselý V.: Agglomerace částic a defluidační jevy ve fluidní vrstvě. *Chemické listy* 97, 2003, 942.
8. Saenger M., Hartage E. U., Werther J., Ogada T., Siagi Z.: Combustion of coffee husks. *Renewable Energy* 23(1), 2001, 103.
9. Sun Z., Jin B., Zhang M., Liu R., Zhang Y.: Experimental study on cotton stalk combustion in a circulating fluidized bed. *Energy* 33, 2008, 1224.
10. Chaivatamaset P., Sricharoon P., Tia S., Bilitewski B.: The characteristics of bed agglomeration/defluidization in fluidized bed firing palm fruit bunch and rice straw. *Thermal Engineering* 70(1), 2014, 737.
11. Chaivatamaset P., Tia S.: The characteristics of bed agglomeration during fluidized bed combustion of eucalyptus bark. *Applied Thermal Engineering* 75, 2015, 1134.
12. Billen P., Creemers B., Costa J., Caneghem J. V., Vandecasteele C.: Coating and melt induced agglomeration in a poultry litter fired fluidized bed combustor. *Biomass and Bioenergy* 69, 2014, 71.
13. Liu H., Feng Y., Wu S., Liu D.: The role of ash particles in the bed agglomeration during the fluidized bed combustion of rice straw. *Bioresource Technology* 100(24), 2009, 6505.
14. Ninduangdee P., Kuprianov V. I.: Combustion of palm kernel shell in a fluidized bed: Optimization of biomass particle size and operating conditions. *Energy Conversion and Management* 85, 2014, 800.
15. Arromdee P., Kuprianov V. I.: Combustion of peanut shells in a cone-shaped bubbling fluidized-bed combustor using alumina as the bed material. *Applied Energy* 97, 2012, 470.

16. Shimizu T., Han J., Choi S., Kim L., Kim H.: Fluidized-bed combustion characteristics of cedar pellets by using an alternative bed material. *Energy and Fuels* 20(6), 2006, 2737.
17. Öhman M., Nordin A.: The role of kaolin in prevention of bed agglomeration during fluidized bed combustion of biomass fuels. *Energy and Fuels* 14, 2000, 618.
18. Llorente M. J. F., Cuadrado R. E., Laplaza J. M. M., García J. E. C.: Combustion in bubbling fluidised bed with bed material of limestone to reduce the biomass ash agglomeration and sintering. 85, 2006, 2081.
19. Chou J. D., Lin Ch. L.: Inhibition of agglomeration/defluidization by different calcium species during fluidized bed incineration under different operating conditions. *Powder Technology* 219, 2012, 165.
20. Černý V., Janeba B., Teyssler J.: *Parní kotle*. SNTL Praha, Praha 1983.
21. de Diego L. F., de las Obras-Loscertales M., Rufas A., García-Labiano F., Gayán P., Abad A., Adánez J.: Pollutant emissions in a bubbling fluidized-bed combustor working in oxy-fuel operating conditions: Effect of flue gas recirculation. *Applied Energy* 102, 2013, 860.
22. de las Obras-Loscertales M., Mendiare T., Rufas A., de Diego L. F., García-Labiano F., Gayán P., Abad A., Adánez J.: NO and N₂O emissions in oxy-fuel combustion of coal in a bubbling fluidized-bed combustor. *Fuel* 150, 2015, 146.
23. Duan L., Duan Y., Zhao Ch., Anthony E. J.: NO emission during co-firing coal and biomass in a oxy-fuel circulating fluidized bed combustor. *Fuel* 150, 2015, 8.
24. Pels J.R., Wójtowicz M.A., Kapteijn F., Moulijn J.A.: Trade-off between NO_x and N₂O in fluidized-bed combustion of coals. *Energy Fuel* 9, 1995, 43.
25. Svoboda K., Čermák J., Trnka O.: Chemistry and Emission of Nitrogen Oxides (NO, NO₂, N₂O) in Combustion of Solid Fuels I. Heterogeneous reaction – N₂O + NO. *Chem. Papers* 54(2), 2000, 104.
26. Svoboda K., Čermák J., Hartman M.: Chemistry and Emission of Nitrogen Oxides (NO, NO₂, N₂O) in Combustion of Solid Fuels II. Heterogeneous reaction – N₂O. *Chem. Papers* 54(2), 2000, 118.
27. Czakiert T., Bis Z., Muskala W., Nowak W.: Fuel conversion from oxy-fuel combustion in a circulating fluidized bed. *Fuel Processing Technology* 87, 2006, 531.
28. de Diego L.F., Rufas A., García-Labiano F., de las Obras-Loscertales M., Abad A., Gayán P., Adánez J.: Optimum temperature for sulphur retention in fluidised beds working under oxy-fuel combustion conditions. *Fuel* 114, 2013, 106.
29. Díez L. I., Lupiáñez C., Guedea I., Bolea I., Romeo L. M.: Anthracite oxy-combustion characteristics in a 90 kW_{th} fluidized bed reactor. *Fuel processing Technology* 139, 196–203, 2015.
30. Hartman M., Trnka O., Pohořelý M.: Minimum and terminal velocities in fluidization of particulate ceramics at ambient and elevated temperature. *Ind. Eng. Chem. Res.* 46(22), 2007, 7260.
31. 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., Patented: 15.02.25.
32. 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.
33. Pohořelý M.: Spalování stabilizovaných kalů z čistíren odpadních vod ve fluidní vrstvě. Diplomová práce, Ústav energetiky VŠCHT Praha & Ústav chemických procesů AV ČR, v. v. i., Praha 2004.
34. Pohořelý M.: Vliv reakčních podmínek na fluidní zplyňování uhlí, dřeva a plastů. Doktorská disertační práce. Ústav energetiky VŠCHT Praha & Ústav chemických procesů AV ČR, v. v. i., Praha (2010).
35. Hartman M., Svoboda K., Pohořelý M., Trnka O.: Combustion of Dried Sewage Sludge in a Fluidized-Bed Reactor. *Ind. Eng. Chem. Res.* 44, 3432–3441 (2005).
36. Pohořelý M., Svoboda K., Trnka O., Baxter D., Hartman M.: Gaseous Emissions from the Fluidized-bed Incineration of Sewage Sludge. *Chem. Pap.* 59, 458–463 (2005).
37. Pohořelý M., Vosecký M., Hejdová P., Punčochář M., Skoblia S., Staf M., Vošta J., Koutský B., Svoboda K.: Gasification of Coal and PET in Fluidized Bed Reactor. *Fuel* 85, 2458–2468 (2006).
38. Šyc M., Pohořelý M., Kameníková P., Habart J., Svoboda K., Punčochář M.: Willow Trees from Heavy Metals Phytoextraction as Energy Crops. *Biomass Bioenerg.* 37, 106–113 (2012).
39. Pohořelý M., Durda T., Moško J., Zach B., Svoboda K., Šyc M., Kameníková P., Jeremiáš M., Brynda J., Krausová A., Hartman M., Punčochář M.: Fluidní spalování suchého stabilizovaného čistírenského kalu z čistírny odpadních vod Brno - Modřice. *Paliva* 7(2), 36–41 (2015).
40. Instruction manual, Portable gas analyzer PG-350E, HORIBA GmbH, 2012.
41. Vyhláška č. 415/2012 Sb. o přípustné úrovni znečištění a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší (novela 155/2014).
42. Duan L., Zhao Ch., Zhou W., Qu Ch., Chen X.: O₂/CO₂ coal combustion characteristics in a 50 kW_{th} circulating fluidized bed. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 5(4), 2011, 770.
43. Lasek J. A., Janusz M., Zuwała J., Glód K., Iluk A.: Oxy-fuel combustion of selected solid fuels under atmospheric and elevated pressures. *Energy* 62, 2013, 105.
44. Czakiert T., Sztekler K., Karski S., Markiewicz, Nowak W.: Oxy-fuel circulating fluidized bed combustion in a small pilot-scale test rig. *Fuel processing technology* 91, 2010, 1617.

Summary

Tomáš Durda^{a,b}, Jaroslav Moško^{a,b}, Michael Pohořelý^{a,b}, Karel Svoboda^a, Boleslav Zach^{a,b}, Michal Šyc^a, Michal Jeremiáš^a, Aneta Krausová^{a,b}, Miroslav Punčochář^a

^a*Institute of Chemical Process Fundamentals of the Czech Academy of Sciences, v.v.i., Rozvojová 135, 165 02 Prague 6, Czech Republic, email: durda@icpf.cas.cz*

^b*Department of Power Engineering, University of Chemistry and Technology Prague, Technická 5, 166 28 Prague 6, Czech Republic, email: michael.pohorely@vscht.cz*

Combustion of Corn Straw in a Bubbling Fluidized-Bed Reactor

The paper deals with low-temperature bubbling fluidized-bed combustion of corn straw with very low melting point of ash. The research study was focused on influence of change of selected parameters on emissions of pollutants. Parameters that were changed within the tests were: primary fluidized bed material, combustion medium composition and concentration of oxygen in combustion medium. In order to observe influence of investigated combustion characteristics on emissions of pollutants and on unburned carbon content of the ash, tests were performed in three different combustion atmospheres: (1) air combustion, (2) oxygen enriched air combustion, (3) oxy-fuel combustion. When ceramsite was used as primary fluidized bed material instead of silica sand during air combustion, unburned carbon content of the ash and emissions of CO and dust decreased, while emissions of SO₂ increased. When N₂ was substituted by CO₂ in combustion medium, unburned carbon content of the ash, emissions of CO, N₂O, NO_x, SO₂, HCl and dust emission increased. When oxygen partial pressure in combustion atmosphere was raised, unburned carbon content of the ash and emissions of CO and N₂O decreased, while emissions of NO_x, SO₂, HCl and dust increased.

Keywords: fluidized bed, combustion, emissions, pollutants, corn straw, agricultural biomass, biofuel, air combustion, oxy-fuel combustion