



Zkušenosti s oxy-fuel spalováním ve stacionární fluidní vrstvě

Pavel SKOPEC^{1}, Jan HRDLIČKA¹, Matěj VODIČKA¹*

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

* Email: p.skopec@fs.cvut.cz

Oxy-fuel spalování je jednou z možných cest vedoucích ke snížení emisí vyprodukovaného oxidu uhličitého ze stacionárních energetických spalovacích zdrojů. Tento článek pojednává o využití této technologie při spalování uhlí v kotli se stacionární fluidní vrstvou. Z teoretického porovnání oxy-fuel spalování a spalování vzduchem vyplývá významný závěr, že při konstantním příkonu v palivu není možné nastavit stejnou teplotu fluidní vrstvy a zároveň stejný průtok fluidačního média při vzduchovém a oxyfuel režimu. Tento fakt je rovněž potvrzen měřením na 30 kW experimentálním reaktoru.

Klíčová slova: oxy-fuel spalování, stacionární fluidní vrstva

1 Úvod

Konvenční spalovací technologie využívají ke spalování vzduch. Ten obsahuje 79 % dusíku, který ředí vzniklý oxid uhličitý. Zachytávání takto zředěného CO₂ je ale dostupnými post-combustion technologiemi (např. aminovou vypírkou) poměrně složité a drahé [1]. Při oxy-fuel spalování se jako spalovací médium používá směs čistého kyslíku, obvykle s čistotou 95%, a recirkulovaných spalin. Spaliny pak tvoří převážně směs vodní páry a CO₂ a následné zpracování CO₂, kdy jsou odstraňovány ostatní minoritní složky, je jednodušší. Při oxy-fuel spalování dochází k zcela odlišným poměrům daným změnou objemu spalin a jejich složením. Spaliny z oxy-fuel spalování mají jiné látkové vlastnosti, které se projevují např. při sdílení tepla a významná je také změna spalovací teploty [2]. Tento příspěvek prezentuje sérii prvních výsledků z experimentálního zařízení, které pracuje na principu stacionární fluidní vrstvy v oxyfuel režimu.

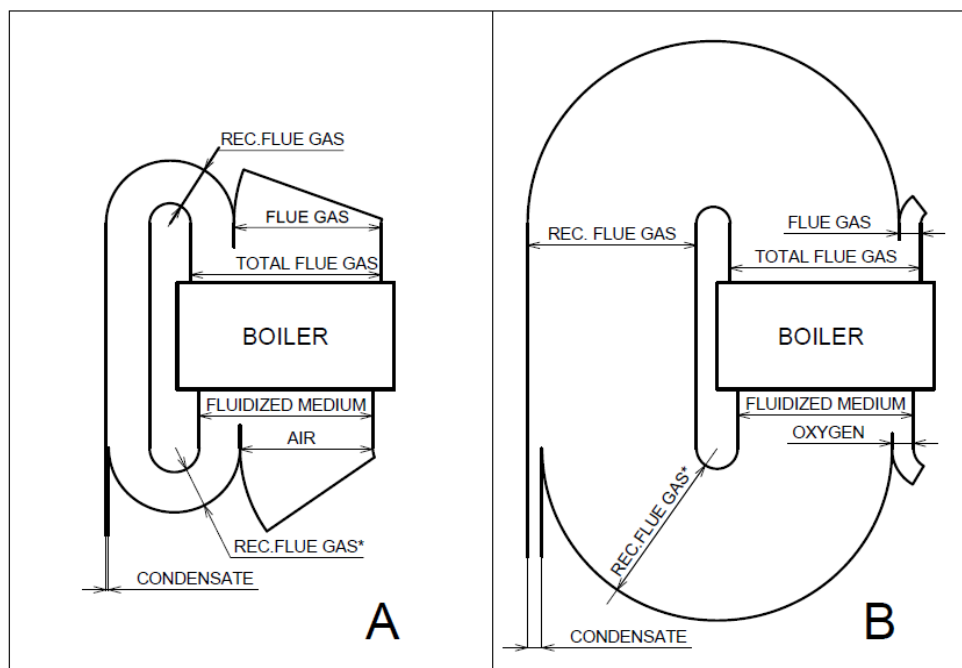
2 Teoretická analýza

Spalování ve fluidní vrstvě potřebuje pro správný provoz dostatečné množství fluidačního média, které uvádí do vzhledu inertní materiál fluidní vrstvy a palivo. Objem oxidačního média při oxy-fuel spalování je asi 5x menší než při spalování vzduchem (bez uvažování recirkulace spalin). Takto snížený objem fluidačního média by nestačil k rozvinutí dostatečné fluidace, a proto je nutné zvýšit objem fluidačního média pomocí recirkulovaných spalin. Správně nastavená recirkulace spalin tedy zajistí dostatečnou fluidaci, ale rovněž způsobí snížení teploty spalování. V případě spalování s čistým kyslíkem, by totiž adiabatická teplota plamene přesáhla i 3000°C, což je teplota, které nejsou schopné odolávat běžné



konstrukční materiály kotlů. Základní schéma průtoku jednotlivých médií při vzduchovém a oxy-fuel spalování je zobrazeno na Obr. 1.

Zavedením poměrně velkého množství recirkulace spalin se přibližujeme podmínkám spalování se vzduchem. Dochází k nahrazení dusíku převážně oxidem uhličitým a vodní parou (pro případ horké recirkulace, kdy nedochází ke kondenzaci vodní páry) čímž se značně mění látkové vlastnosti spalin.



Obr. 1. Porovnání průtoků plynů při vzduchovém (část A) a oxy-fuel spalování (část B)

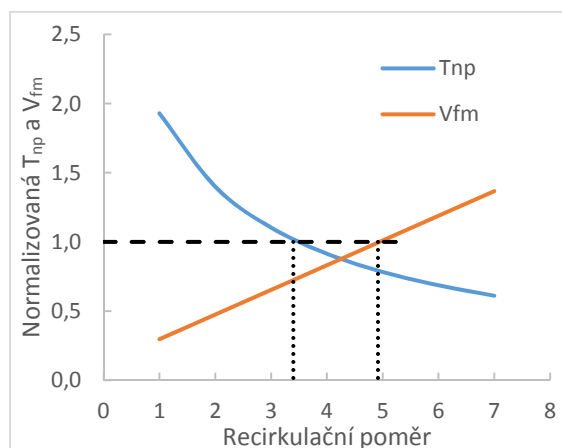
Pomocí standardní metodiky pro výpočty spalování a fluidaci se vzduchem upravené pro spalování kyslíkem a s recirkulovanými spalinami lze provést bilanční porovnání mezi oxy-fuel spalováním a vzduchovým spalováním. Způsob provedení těchto bilančních výpočtů je podrobněji představen v [3]. Z článku [3] vyplývá, že není možné nastavit takovou recirkulaci spalin, aby bylo při oxy-fuel podmínkách spalování dosaženo stejné teploty spalování (a tedy i stejné teploty fluidní vrstvy) a stejného objemu fluidačního média jako při spalování se vzduchem. To ukazuje i Obr. 2, kde je provedeno porovnání oxy-fuel spalování a vzduchového spalování zavedením normalizované teploty nechlazeného plamene T_{np} a normalizovaného objemu fluidačního média V_{fm} . Oba tyto parametry jsou dány poměrem vypočítané veličiny pro daný stav ku stavu referenčnímu:

$$T_{np} = T_{np1}/T_{np0} \quad [-] \quad (1)$$

$$V_{fm} = V_{fm1}/V_{fm0} \quad [-] \quad (2)$$

Referenční hodnoty T_{np0} a V_{fm0} jsou vypočítány pro referenční stav spalování vzduchem (40% přebytek kyslíku, recirkulační poměr 0,3 a teplota recirkulace nad teplotou kondenzace vodní páry) a jsou rovny $T_{np0}=1400^{\circ}\text{C}$ a $V_{fm0}=9,01 \text{ m}_n^3/\text{kg}$. Recirkulační poměr je definován vztahem 3:

$$r = \frac{V_{REC}}{V_{FG}} \quad [-] \quad (3)$$

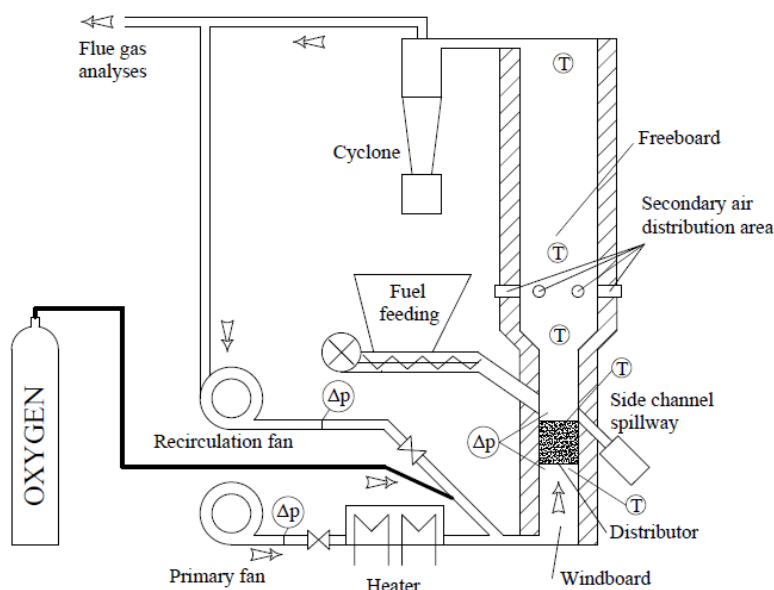


Obr. 2. Teoretické posouzení vlivu velikosti recirkulace na adiabatickou teplotu plamene a objem fluidačního média s uvažováním recirkulace spalín bez kondenzace vodní páry

Z Obr. 2 lze pomocí čárkované černé čáry (T_{np} a $V_{fm} = 1$) protnout křivky závislosti normalizované teploty nechlazeného plamene a normalizovaného objemu fluidačního média a tím vyčíst hodnotu recirkulačního poměru, pro který bude mít oxy-fuel stav spalování stejnou teplotu nechlazeného plamene či stejný objem fluidačního média. Obrázek potvrzuje, že není možné dosáhnout stejných podmínek při spalování vzduchem a při spalování kyslíkem. V případě, že bychom chtěli dosáhnout stejné teploty nechlazeného plamene ($r=3,4$), musíme počítat se snížením objemu fluidačního média o více než jednu čtvrtinu, což v případě fluidního spalování může vést k nedostatečné fluidaci a problémům s tím spojených. V případě požadavku na zabezpečení stejného objemu fluidačního média je nutné zvýšit množství recirkulace až na hodnotu $r=4,9$. V tomto okamžiku ovšem dochází ke snížení teploty nechlazeného plamene o téměř 300°C . To by vedlo i ke značnému snížení teplot ve spalovací komoře a tím i ke snížení kvality spalování.

3 Experimentální zařízení

Laboratorní experimentální zařízení je navrženo tak aby splňovalo celou řadu požadavků a jistou univerzálnost použití. Zařízení funguje jak v bezspalovacím režimu tak i ve spalovacím režimu za použití vzduchu jako fluidačního média, či spalovacím režimu za použití vzduchu obohaceného kyslíkem a čistě v oxy-fuel režimu s použitím recirkulace spalín. Zařízení se skládá z několika modulů, které jsou zaměnitelné, to umožňuje pokrytí řady požadavků pro různé provozní režimy. Na Obr. 3 je zobrazeno schéma uspořádání jednotky s naznačením jednotlivých toků a pozicemi měřících bodů. Podrobnější popis jednotlivých částí zařízení je uveden v [4]. Přívod kyslíku pro oxy-fuel režim je řešen ze svazku tlakových lahví, který je umístěn vně laboratoře. Na svazku je umístěn redukční ventil, do jednotky tak přichází kyslík o maximálním tlaku 10 bar. V trase kyslíku je dále zařazen regulační ventil a rotametr pro indikaci průtoku. Vstup kyslíku je umístěn do potrubí recirkulace spalín mezi recirkulační ventilátor a vstup recirkulace do hlavního vzduchového potrubí. Tepelný výkon jednotky se pohybuje mezi 20 až 30 kW, což odpovídá 2-5 kg paliva hodinově, v závislosti na jeho výhřevnosti.



Obr. 3. Zjednodušené schéma laboratorní jednotky

4 Výsledky a diskuze

Pro experimentální testování oxyfuel režimu bylo použito hnědé uhlí z dolu Bílina typ hp1, jehož základní kvalitativní znaky jsou uvedeny v Tab. Tab. 1.

Tab. 1. Složení uhlí Bílina, typ hp1

C^r [%]	H^r [%]	N^r [%]	S^r [%]	A^r [%]	W^r [%]	Q_i^r [MJ/kg]
47,88	3,86	0,63	0,8	13	18	21,14

Prezentované výsledky zahrnují testování jak částečných oxyfuel stavů, tak jeden plný oxyfuel stav. Aby byly jednotlivé stavy porovnatelné, bylo cílem udržet teplotu fluidní vrstvy na stejné hodnotě 890 °C ($\pm 10^\circ\text{C}$) a koncentraci O_2 v suchých spalínách mezi 3 až 5 % pro různé provozní stavy (to odpovídá cca 5 až 6 % přebytku kyslíku). Výsledky měřených stavů jsou uvedeny v Tab. 2., kde jednotlivé veličiny jsou průměrné hodnoty z přibližně hodinu trvajících měření při ustálených stabilních podmínkách. Pro jednotlivé stavy byl zvolen vždy konstantní přívod kyslíku, který se během měření neměnil. Dále byla pomocí přívodu paliva a nastavením poměrů mezi recirkulací a primárním vzduchem nastavena teplota fluidní vrstvy a přebytek kyslíku ve spalínách. Tyto tři parametry byly drženy po celou dobu provozu stabilního stavu konstantní.

Stav označený v Tab. 2. jako „Částečný oxy-fuel 5“ se nejvíce přibližoval k plnému oxy-fuelu. Z důvodu nepříznivých tlakových poměrů v zařízení a za provozu zjištěných netěsností ovšem nebylo možné plně odstavit primární ventilátor. I přes velmi nízký průtok vzduchu došlo k naředění spalin a konečné složení suchých spalin bylo - $\text{CO}_2 = 75 \%$, $\text{N}_2 = 19\%$, $\text{O}_2 = 6\%$. Během měření bylo zjištěno, že oproti teoretickým stechiometrickým výpočtům vychází měřený průtok vzduchu, měřená rychlost fluidace a měřená koncentrace CO_2 pro každý stav vždy o něco menší. Tento jev by mohl být přičten netěsnostem a úniku fluidačního média ještě před vstupem do spalovací komory.



Tab. 2. Výsledky měření

	Částečný oxy-fuel 1	Částečný oxy-fuel 2	Částečný oxy-fuel 3	Částečný oxy-fuel 4	Částečný oxy-fuel 5
Teplota fluidní vrstvy [°C]	892	892	890	889	895
Přívod paliva [g/s]	1,41	1,34	1,35	1,42	1,66
Příkon [kW]	30	28	29	30	35
Průtok vzduchu [m_N^3/hod]	21,18	21,0	18,0	17,5	2,00
Průtok kyslíku [m_N^3/hod]	1,5	2	2,5	3	6,7
Průtok recirkulace [m_N^3/hod]	24,1	25,5	29,3	31,1	45,7
Recirkulační poměr r	0,89	1,03	1,24	1,27	4,95
Koncentrace O ₂ ve spalinách [%]	2,41	2,56	3,19	3,81	5,77
Koncentrace CO ₂ ve spalinách [%]	21,83	24,26	26,50	27,59	75,34
Koncentrace O ₂ ve fluidačním médiu [%]	15,17	15,22	15,68	16,74	19,50
Fluidační rychlost [m/s]	1,64	1,70	1,74	1,81	1,91
Teplota recirkulace [°C]	46,6	49,6	52,0	54,9	71,4

Změřené rychlosti fluidace odpovídají přibližně 10 násobku minimální rychlosti fluidace. Tím je zaručena velice dobře vyvinutá fluidní vrstva a je naopak třeba ohlídat případné další zvýšení rychlosti, neboť bychom se pohybovali na hraně úletové rychlosti.

Rovněž je patrný i předpoklad, že čím více se přibližujeme k plnému oxy-fuel režimu, tím větší příkon v palivu je potřeba, aby byla udržena stabilní teplota fluidní vrstvy. Tento fakt je potvrzen i výpočtem teploty nechlazeného plamene v Tab. 3. Výpočet vychází z naměřených dat koncentrací a průtoků jednotlivých médií a ukazuje, že se zvyšujícím se oxy-fuel režimem teplota nechlazeného plamene klesá.

Tab.3. Výsledky výpočtu teploty nechlazeného plamene

	Částečný oxy-fuel 1	Částečný oxy-fuel 2	Částečný oxy-fuel 3	Částečný oxy-fuel 4	Částečný oxy-fuel 5
Teplota nechlazeného plamene [°C]	1441	1406	1362	1375	1235

5 Závěr

Hlavním cílem provedených prací bylo prakticky ověřit možnost spalování uhlí ve stacionární fluidní vrstvě v oxyfuel režimu. Pro zmapování celého procesu a rovněž pro identifikaci přechodu ze vzduchového do oxyfuel režimu byly testovány 4 stavy tzv. částečného oxyfuel režimu a jeden téměř plného oxyfuel režimu. Výsledky experimentů byly rovněž porovnány s výsledky výpočtu vytvořeného bilančního modelu. Ve všech případech byly zjištěny odchylky mezi měřenými a vypočtenými veličinami cca 10-15 %, z čehož je usuzováno na netěsnosti zařízení a únik fluidačního média do okolí. Experimenty potvrdily, že je bez problémů možné udržet plně rozvinutou fluidaci i při plném i částečném oxyfuel režimu a zároveň udržet teplotu fluidní vrstvy a koncentraci kyslíku ve spalinách na konstantní úrovni. Ve shodě s výpočtovým modelem bylo experimentálně ověřeno, že s vyšší mírou oxyfuel režimu klesá adiabatická teplota plamene a pro udržení konstantní teploty



fluidní vrstvy je tak potřeba zvyšovat tepelný příkon v palivu. Snížení adiabatické teploty plamene určené výpočtem o přibližně 14 % mezi měřenými stavy 1 a 5 bylo kompenzováno naměřeným zvýšením tepelného příkonu o přibližně 15 %, což lze považovat za velmi dobrou shodu.

Poděkování

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS13/181/OHK2/3T/12 s názvem „Studium chování fluidní vrstvy pro spalování nekonvenčních paliv“ a projektem TA03020312 „Výzkum oxyfuel spalování ve stacionární fluidní vrstvě pro CCS technologie“.

Použitá literatura

- [1] Buhre, B.J.P.; Elliott, L.K.; Sheng, C.D.; Gupta, R.P.; Wall, T.F. Oxy-fuel combustion technology for coal-fired power generation. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2005, č. 31, s. 283-307.
- [2] Wall, T.; Liu, Y.; Spero, Ch.; Elliot L. An overview on oxyfuel coal combustion - State of the art research and technology development. *Chemical Engineering Research and Design*. 2009, č. 87, s. 1003-16.
- [3] Skopec, P.; Hrdlička, J. Specific features of the oxy-fuel combustion conditions in a bubbling fluidized bed. In ERIN, The 9th International Conference for Young Researchers and PhD Students, May 4th-6th, 2015, Moníec
- [4] Skopec, P.; Hrdlička, J.; Opatřil, J.; Štefanica, J. Studium problematiky využití fluidní vrstvy pro spalování biomasy a alternativních paliv. In *Sborník přednášek z konference Energie z biomasy XIV*. Brno: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013, s. 69-73. ISBN 978-80-214-4775-2