

VÝBĚR INERTNÍCH MATERIÁLŮ PRO FLUIDNÍ SPALOVÁNÍ BIOMASY

Pavel Skopec, Jiří Štefanica, Jan Hrdlička

Kontakt: Pavel Skopec, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav energetiky,
E-mail: p.skopec@fs.cvut.cz, Tel: 224 352 538

Příspěvek pojednává o výběru inertních materiálů pro fluidní spalování biomasy. Je zkoumáno sedm různých materiálů – tři druhy křemičitých písků, dva druhy olivínů, keramzit a popel. Výběr je proveden na základě analýzy základních fluidních charakteristik, jako je mezní rychlost fluidace a úletová rychlost. Mezní rychlost fluidace je určována jak teoretickým výpočtem tak i experimentálně. Výsledky jsou porovnány s mezní rychlostí fluidace pro palivo, dřevní peletu, a jsou vybrány vhodné materiály.

Klíčová slova: fluidace, mezní rychlost fluidace, úletová rychlost, inertní materiál fluidní vrstvy, keramzit

ÚVOD

V současnosti je výrazně podporována a upřednostňována výroba energie z obnovitelných zdrojů, podíl obnovitelných zdrojů na domácí spotřebě ČR v roce 2010 dosahoval 10,28 % [1]. V rámci EU je pro ČR cílem dosažení podílu 13 % do roku 2020. Biomasa představuje stabilní a hojně využívaný obnovitelný zdroj energie s velkým potenciálem pro další rozšíření. Ročně je využíváno přibližně 94 PJ energie biomasy na výrobu elektřiny a tepla. Největší zbytkový potenciál má zemědělská biomasa (161,4 PJ), tradičně využívaná lesní dendromasa (28,3 PJ) a BRKO (25 PJ) mají mnohem nižší zbytkový potenciál. Uvedené odhady využitelného potenciálu počítají se zajištěním 100 % potravinové soběstačnosti. [2]

Spalování představuje nejjednodušší a nejrozšířenější způsob energetického využití biomasy. Na rozdíl od fosilních zdrojů je biomasa mnohem více rozptýlená a pro její efektivní spalování se tedy lépe hodí menší, decentralizované zdroje, které zajistí kratší dopravní vzdálenost. Pro spalování biomasy je využívána hlavně technologie roštového spalování a v menším měřítku fluidního spalování. Fluidní spalování může být realizováno v bublinkující vrstvě (zřetelná oddělená vrstva a freeboard), která je vhodná pro výkony do 30 MW, nebo v cirkulující vrstvě (vrstva expanduje přes celou výšku kotle) používané pro výkony nad 30 MW. Oproti roštovému způsobu spalování se fluidní spalování vyznačuje vyšší stabilitou při kolísání vlastností paliva, lepší možností regulace spalování a nižšími hodnotami emisí znečišťujících látek. Z těchto důvodů je fluidní spalování vhodnou volbou zvláště u nekvalitních paliv, odpadní a vlhké biomasy. [3]

Fluidní vrstva je tvořena inertním materiálem, do něhož je přiváděno palivo. Hmotnostní materiál (palivo představuje obvykle pouze několik hmotnostních procent) zajišťuje nízkou spalovací teplotu (obvykle 750 – 950 °C, což je výhodné z hlediska spékání popelovin) a rovnoměrný teplotní profil. Při spalování fosilních paliv je možné jako inertní materiál použít vlastní popel. Při spalování biomasy je kvůli nízkému obsahu popeloviny nutné použít jiné materiály. Tento článek se zabývá fluidačními vlastnostmi různých inertních materiálů, cílem je vybrat vhodné materiály z hlediska fluidačních vlastností pro spalování biomasy v bublinkující vrstvě.

TEORIE

Důležitými vlastnostmi z hlediska fluidace jsou mezní rychlosti – mezní rychlost fluidace a mezní rychlost úletu. Jejich hodnoty závisí na vlastnostech materiálu (hustota ρ , sféricita Φ , efektivní průměr částice D_{ef} a mezerovitost ε případně sypaná hmotnost ρ_s) a vlastnostech plynu (dynamická viskozita μ a hustota plynu ρ_g). Pro určení prahové rychlosti fluidace existuje řada korelací, nejpoužívanější je Ergunova rovnice (1) [4]:

$$\frac{1,75}{\varepsilon^3 \cdot \Phi} \cdot Re^2 + 150 \cdot \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3 \cdot \Phi^2} \cdot Re = Ar \quad (1)$$

Archimedovo číslo Ar se dále určí z rovnice (2) a Reynoldsovo číslo Re_p z rovnice (3) [4]:

$$Ar = \frac{D_{eff}^3 \cdot \rho_g \cdot (\rho - \rho_g) \cdot g}{\mu^2} \quad (2)$$

$$Re_p = \frac{D_{eff} \cdot u \cdot \rho_g}{\mu} \quad (3)$$

Pro výpočet úletové rychlosti byla použita metoda analogická k pádové rychlosti částice v tekutině. Určuje se určit ze vztahu (4) kde C_D vyjadřuje odporový koeficient částice. Existuje celá řada korelací pro jeho výpočet, pro tento případ byla vybrána rovnice (5) [4]:

$$u_t = \left(\frac{4 \cdot D_{eff} (\rho - \rho_g) \cdot g}{3 \cdot \rho_g \cdot C_D} \right)^{1/2} \quad (4)$$

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \cdot [1 + (8,1716 \cdot e^{-4,0655 \cdot \Phi}) \cdot Re_p^{0,0964 + 0,5565 \cdot \Phi}] + \frac{73,69 \cdot (e^{-5,0748 \cdot \Phi}) \cdot Re_p}{Re_p + 5,378 \cdot e^{6,2122 \cdot \Phi}} \quad (5)$$

Zajímá nás počátek úletové rychlosti, tedy okamžik kdy první částice nezanedbatelné velikosti začínají být unášeny z vrstvy. Jako efektivní rozměr dosazovaný do výpočtu byl uvažován průměr d_5 , tedy rozměr, který se určí z křivky rozsevu a vyjadřuje rozměr částice, který je pro 95 % částic menší než tato hodnota. Hodnoty průměru d_5 jsou uvedeny v tabulce Tabulka 7 spolu s dalšími charakteristickými průměry určenými z granulometrické analýzy.

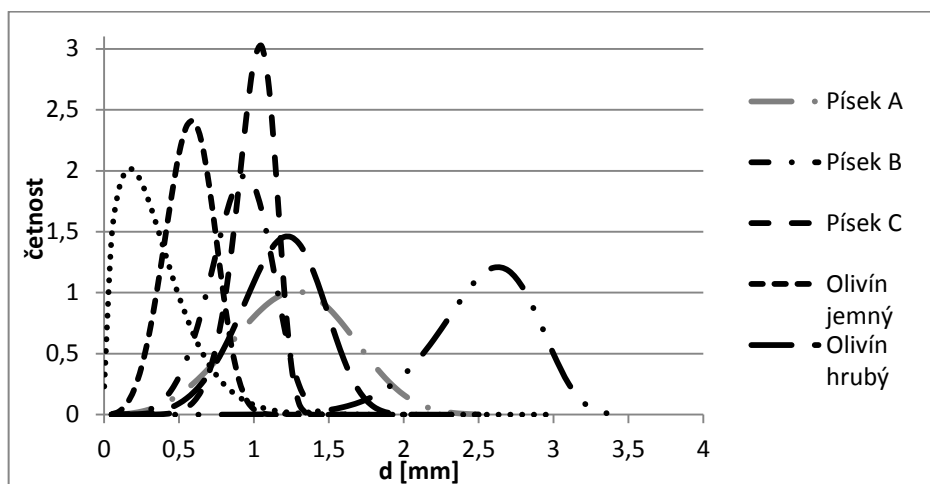
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Pro výpočet bylo vybráno sedm různých materiálů, které se běžně používají jako materiály fluidní vrstvy. Jsou to tři druhy křemičitých písků (dále označeny jako Písek A, B a C), dva druhy olivínů (jemný a hrubý), keramzit a uhelný popel. Základní materiálové vlastnosti jsou shrnuty v tabulce Tabulka 6. Olivínový písek se od křemičitého liší v chemickém složení. Zatímco křemičitý písek je z více než 95% tvořen oxidem křemičitým SiO_2 , olivín tvoří z 50% oxid hořečnatý MgO , z 41% oxid křemičitý SiO_2 a ze 7% oxid železitý Fe_2O_3 . Olivín má ze zkoumaných materiálů největší hustotu a jeho dva vzorky se liší pouze zrnitostí. Keramzit je materiál nepřírodního původu. Vyrábí se za vysokých teplot ve speciálních rotačních pecích z cyprisového jílu. Je to materiál pórovitý, ze zkoumaných materiálů má nejnižší hustotu, jeho tvar je téměř kulový (sféricita 0,95).

Tabulka 6 Vlastnosti použitých materiálů

		Písek A	Písek B	Písek C	Olivín jemný	Olivín hrubý	Keramzit	Popel
Hustota ρ	[kg/m ³]	2650	2650	2650	3200	3200	800	1800
Sypná hmotnost ρ_s	[kg/m ³]	1500	1380	1480	1620	1580	530	970
Mezerovitost ε	[-]	0,434	0,479	0,442	0,479	0,506	0,338	0,461
Sféricita Φ	[-]	0,8	0,75	0,8	0,75	0,66	0,95	0,63

Zkoumané materiály byly podrobeny síťové analýze s cílem určit granulometrii materiálů a stanovit charakteristické rozměry pro další výpočty. Jednotlivé křivky byly proloženy Rosin-Rammlerovou aproximací, výsledné křivky četnosti jsou na obrázku Obr. 5. Je patrné, že materiály mají velice rozdílnou granulometrii. Písek A má ze zkoumaných vzorků nejširší rozložení částic. Naopak písek C obsahuje částice téměř uniformních velikostí (v rozsahu od 0,75 do 1,3 mm). Tyto vlastnosti významně ovlivňují proces fluidace. Mezi charakteristické rozměry jsou považovány střední průměr, modus a medián. Výsledky z granulometrických zkoušek jsou uvedeny v tabulce Tabulka 7.



Obr. 5 Křivky četností použitých materiálů

Tabulka 7 Charakteristické rozměry vzorků

	Písek A	Písek B	Písek C	Olivín jemný	Olivín hrubý	Keramzit	Popel
d_p [mm]	1,16	0,86	0,96	0,54	1,11	2,41	0,20
d_{mod} [mm]	1,28	0,94	1,04	0,59	1,22	2,63	0,17
d_{med} [mm]	1,26	0,91	1,01	0,57	1,19	2,56	0,29
d_s [mm]	0,62	0,55	0,75	0,3	0,71	1,9	0,05

Jako palivo jsou uvažovány dřevní pelety válcovitého tvaru o průměru 6 mm a délce 5-30 mm. Z geometrických charakteristik byla vypočítána sféricita ($\Phi=0,78$) a efektivní průměr (7,71 mm), hustota byla uvažována 1260 kg/m³ a sypná hmotnost 725 kg/m³.

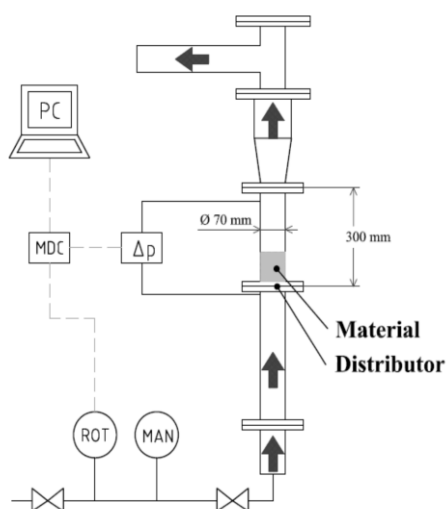
Prahová rychlost fluidace byla vypočtena pomocí Ergunovy rovnice (1). Byla spočítána pro všechny tři charakteristické rozměry. Teoretický výpočet minimální rychlosti fluidace byl ověřen měřením na experimentálním zařízení (viz Obr. 6). Experimentální zařízení se skládá ze dvou základních částí. První část zajišťuje distribuci vzduchu a zaznamenává průtok vzduchu. Druhá část je vytvořena z plexisklových trubek a obsahuje samotné místo, kde dochází k fluidaci. Změření tlakové difference z místa pod distributorem a z místa nad vrstvou se po odečtení tlakové ztráty distributoru zjistí tlaková ztráta samotného materiálu.

VÝSLEDKY A DISKUZE

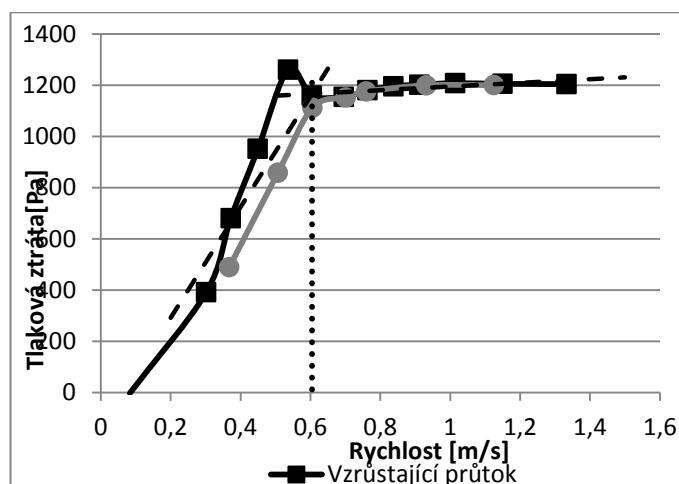
Přechod mezi pevnou vrstvou a bublinkující fluidní vrstvou je dobře popsitelný závislostí tlakové ztráty na rychlosti proudění (příklad z měření pro Písek C uveden na Obr. 7). Tato závislost má dvě zřetelné oblasti – nárůst tlakové ztráty spolu s rychlostí v oblasti kdy se materiál nachází v pevné vrstvě a ustálení tlakové ztráty na hodnotě přibližně rovné hmotnosti vrstvy, kdy se již tlaková ztráta s rychlostí nemění a materiál je ve vlnosu. Na Obr. 7 jsou uvedeny dvě křivky. Jedna křivka vyjadřuje závislost tlakové ztráty na rychlosti při vzrůstajícím průtoku vzduchu, druhá křivka platí pro klesající průtok vzduchu. Mezní rychlost fluidace je pak dána jako průsečík dvou regresních přímek (v Obr. 7 zobrazeny čárkovanou čarou), jedna přímka prochází body, vyznačujícími růst tlakové ztráty, druhá prochází konstantní hodnotou tlakové ztráty při rozvinuté fluidaci. Malý pik tlakové ztráty, kdy se závislost lomí do konstantní hodnoty, je způsobena zhuštěním materiálu při plnění do zařízení a také kohézními silami, působícími mezi jednotlivými zrny.

V tabulce Tabulka 8 je uvedeno porovnání mezi napočítanými hodnotami mezních rychlostí fluidace $u_{mf/cal}$ a experimentálně určenou mezní rychlostí fluidace $u_{mf/meas}$. Pro každý materiál byla $u_{mf/cal}$ spočítána pro tři charakteristické rozměry. Teoreticky napočítaná rychlost s nejmenší odchylkou od změřené rychlosti je

zvýrazněna. Pro popel nebylo možné experimentálně určit mezní rychlost fluidace z důvodu příliš nízkých rychlostí a nedostatečného rozsahu použitého průtokoměru.



Obr. 6 Experimentální zařízení



Obr. 7 Závislost tlakové ztráty na rychlosti pro materiál Písek C

Tabulka 8 Porovnání vypočtených a naměřených mezních rychlostí fluidace

	Charakteristický rozměr		$U_{mf/cal}$	Odchylka	$U_{mf/meas}$
		[mm]	[m/s]	[%]	[m/s]
Písek A	d_p	1,16	0,652	-12,6	0,747
	d_{med}	1,26	0,711	-4,7	
	d_{mod}	1,28	0,722	3,2	
Písek B	d_p	0,86	0,551	-6,2	0,587
	d_{med}	0,91	0,59	0,5	
	d_{mod}	0,94	0,613	4,4	
Písek C	d_p	0,96	0,549	-10,6	0,614
	d_{med}	1,01	0,583	-5,1	
	d_{mod}	1,04	0,602	-1,8	
Olivín jemný	d_p	0,54	0,366	-18,6	0,45
	d_{med}	0,57	0,398	-11,6	
	d_{mod}	0,59	0,419	-7	
Olivín hrubý	d_p	1,11	0,834	-15,1	0,982
	d_{med}	1,19	0,894	-8,9	
	d_{mod}	1,22	0,916	-6,7	
Keramzit	d_p	2,41	0,42	13,3	0,48
	d_{med}	2,56	0,441	8,12	
	d_{mod}	2,63	0,452	5,8	
Popel	d_p	0,2	0,018	-	-
	d_{med}	0,288	0,038	-	
	d_{mod}	0,173	0,014	-	

Experimentální měření ukazuje, že pro výpočet mezní rychlosti fluidace je vhodné použít hodnotu modu, případně mediánu. Odchylka vypočtených a naměřených hodnot je nejnižší pro hodnotu modu (do 7 %). Navzdory tomu, že se v literatuře doporučuje použití středního průměru pro výpočet mezní rychlosti fluidace, je výpočet hodnoty středního průměru více ovlivnitelný nevhodným rozložením použitých sít. Nejlepším řešením by bylo nejdříve provést jedno zkušební měření, na jehož základě by se pro oblast největších četností velikostí částic zhusťla síť sít pro další měření.

Materiál vhodný pro spalování pelet biomasy by měl mít mezní rychlost fluidace nižší než pelety a zároveň vyšší rychlost úletu. Porovnání těchto rychlostí je uvedeno v tabulce Tabulka 9. V praxi se z důvodu zajištění dostatečného promíchávání vrstvy běžně používají rychlosti fluidačního vzduchu na úrovni dvou až třinásošku mezní rychlosti fluidace. Této podmínce nevyhovuje pouze popel, kde by pro mezní rychlost fluidace pelety došlo k překročení úletové rychlosti.

Tabulka 9 Porovnání mezních rychlostí a úletových rychlostí materiálů s mezní rychlostí pelety

	U_{mf}	U_{mf} peleta	U_t
Písek A	0,75	1,59	4,1
Písek B	0,59		3,4
Písek C	0,61		4,6
Olivín jemný	0,45		2,2
Olivín hrubý	0,98		3,6
Keramzit	0,42		5,5
Popel	0,17		1,5

Další důležitou vlastností pro výběr inertního materiálu je velikost intervalu rychlostí mezi mezní rychlostí fluidace a úletovou rychlostí. Čím větší je tento interval, tím větší je možnost regulace kotle. Obecně je při výběru vhodného materiálu fluidní vrstvy nutné přihlídnout nejen k fluidačním vlastnostem ale je nezbytné zabývat se také celou řadou dalších vlastností materiálů, jako jsou např. abrazivní vlastnosti a sklonu ke spékání. Dalším kritériem může být minimalizace nákladů na provoz ventilátorů. S tím souvisí tlaková ztráta vrstvy respektive hustoty inertního materiálu. Díky nízké hustotě bude mít keramzit zhruba třetinovou tlakovou ztrátu v porovnání s křemičitými písky a čtvrtinovou v porovnání s olivínem. Rozhoduje samozřejmě také cena materiálů.

Dále je nutné podotknout, že napočítané rychlosti fluidace byly provedeny pro laboratorní teploty (20 °C) a to z důvodu porovnatelnosti s experimentálním měřením. V praxi probíhá spalování za vyšších teplot (750 – 950 °C). Zvyšování teploty způsobuje snižování hustoty ale zároveň zvyšování dynamické viskozity. Tyto dva efekty působí proti sobě a pro každý materiál je třeba rychlosti přepočítat na danou teplotu, protože má každý materiál jinou závislost fluidačních rychlostí na teplotě.

Velký vliv na distribuci paliva ve vrstvě má také samotný přísun paliva do spalovací komory. Pokud se materiál dává sypáním do vrstvy, je nutné, aby byla fluidační rychlost větší a docházelo k většímu míchání. Palivo by jinak zůstalo ležet na hladině fluidní vrstvy a odhořívalo by tam, což by vedlo k nerovnoměrnému rozložení teplot ve vrstvě. Dávkování paliva přímo do vrstvy je v tomto případě vhodnější variantou.

ZÁVĚR

Na základě výpočtu charakteristických fluidačních rychlostí byly porovnávány různé druhy inertních materiálů fluidní vrstvy. Zkoumáno bylo sedm druhů inertních materiálů fluidní vrstvy. Materiály byly nejdříve podrobeny síťové analýze, ze které byly určeny charakteristické rozměry materiálu vstupující do výpočtu. Teoreticky spočítané hodnoty mezní rychlosti fluidace byly ověřeny na experimentálním zařízení. Dále byla vypočtena mezní rychlost fluidace paliva – dřevní pelety. Na základě porovnání těchto rychlostí pak byly určeny vhodné materiály. Nejlepší vlastnosti vykazoval materiál keramzit, který má největší rozsah rychlostí mezi mezní rychlostí fluidace a úletovou rychlostí a dovoluje nejlepší možnosti regulace fluidního zařízení.

LITERATURA

- [1] ERÚ, (2012): Energetický regulační věstník 5
- [2] M. zemědělství, (2012): Akční plán pro biomasu 2012 - 2020, Praha
- [3] HRDLIČKA, J. (2009): Fluidní kotel na biomasu s inertní náplní liapor, Brno
- [4] KUNII, D. ; LEVENSPIEL O., (1991): Fluidization Engineering, Butterworth-Heinemann