



Vlastnosti agropelet a jejich dopad na produkci emisí

Martin LISÝ^{,1}, David JECHA¹, Marek BALÁŠ¹, Jan NAJSER²*

¹ Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Technická 2896/2, 61669 Brno

² VŠB-TU Ostrava, Centrum ENET, 17. listopadu 15/2172, 708 33 Ostrava -Poruba,

* **Email:** lisy@fme.vutbr.cz

Příspěvek shrnuje základní výsledky studie základních vlastností agropelet, popřípadě dřevních pelet, aby mohlo dojít ke srovnání jednotlivých vlastností. Pelety využívané v ČR můžeme rozdělit na 2 velké skupiny – dřevní a nedřevní (agropelety). Zatímco dřevní pelety jsou hojně využívány i v zařízeních o malých výkonech, prakticky veškerá spotřeba pelet nedřevních je realizována v sektoru velké energetiky, tedy v teplárnách a elektrárnách.

Klíčová slova: biomasa, vlastnosti agropelet, spalování, emise

1 Úvod

S ohledem na energetický význam biomasy a jejich následných produktů se v našich podmínkách převážná část biomasy využívá ke spalování. Pro efektivní využití biomasy je nutné vstupní surovinu náležitě upravit. Tyto procesy zpravidla vyžadují přidanou energii, a je proto nutné optimalizovat formu tak, aby byla potencionální energie výsledného produktu efektivní v porovnání s dodanou energií při zpracování. Nejčastější mechanickou úpravou nedřevní biomasy je lisování do briket nebo pelet.

Většinová produkce nedřevních pelet v ČR slouží jako palivo pro teplárny a elektrárny, avšak použití automatických kotlů menších výkonů je na vzestupu. Automatické kotle na spalování pelet mohou být, díky svému bezobslužnému provozu, zajímavou alternativou pro běžně užívané zdroje vytápění - jako např. zemní plyn – přičemž jejich zavedení je podporováno i formou tzv. kotlíkových dotací. Nejčastěji využívaným palivem v automatických peletových kotlech jsou pelety dřevní. Spalování pelet nedřevních, tzv. agropelet totiž přináší řadu komplikací, kvůli nimž není efektivní spalování agropelet v kotlech určených pro dřevní pelety možné. Především jde o větší tvorbu popela a jeho spékavost.

Agropelety dostupné na českém trhu jsou nejčastěji složeny z odpadu zemědělské produkce (sláma, zbytky z čištění semen, nestandardní semena, osiny, atd.), ale i z rostlin pěstovaných záměrně pro energetické účely (žitovec, šťovík, konopí). Agropelety mohou být vyráběny i z fermentačních zbytků z bioplynových stanic, tzv. digestátu.

Pro výzkumnou část projektu byl proveden palivářský rozbor vzorků agropelet (sláma, šťovík a digestát ...) a vzorků dřevních pelet. Cílem bylo stanovit základní palivové vlastnosti a porovnat je s dosaženými parametry emisí. Následně se pokusit stanovit závislost mezi vlastnosti paliva a produkovanými emisemi.



2 Výsledky palivových rozborů a jejich vyhodnocení

U vybraných vzorků paliv byly stanoveny následující vlastnosti.

- Stanovením sušiny a obsahu vody dle ČSN EN 12880
- Zkouška stanovení ztráty žiháním dle ČSN EN 15169
- Elementární analýza
- Měření spalného tepla kalorimetrickou metodou a výpočet výhřevnosti dle ČSN ISO 1928.

Zkouška stanovení sušiny a obsahu vody společně se zkouškou ztráty žiháním byly provedeny ve dvou po sobě jdoucích krocích a to sušení a žihání vzorku.

Tab. 1 Výsledky stanovení sušiny a obsahu vody

Vzorek	Obsah sušiny w_{dr} [% hm.]	Obsah vody w_w [% hm.]	Směrodatná odchylka	Interval spolehlivosti
Sláma	92,5	7,5	0,1	0,1
Šťovík	91,4	8,6	0,2	0,2
Digestát	91,6	8,4	0,1	0,1
Slunečnice	92,9	7,1	0,2	0,2
Dřevo	91,2	8,8	0,1	0,1

Tabulka 1 ukazuje srovnání obsahů vody w_w daného vzorku, jež je jedním z nejdůležitějších parametrů spalovaného paliva. Obsah vody má zásadní vliv na konečnou výhřevnost vzorku a je tak výchozím parametrem určení kvality pelet. Standardní hodnota w_w pro většinu vyráběných pelet se pohybuje okolo 8 - 10 % hm. [1], přičemž kvalitnější dřevní i nedřevní pelety dosahují až 7,5 % hm. Vlhkosti [2, 3]. Nižšího obsahu vody v peletách zpravidla dosaženo nebývá, protože vlhkost počáteční suroviny vstupující do granulačního procesu následně ovlivňuje soudržnost pelet [1].

V Tabulce 2 jsou shrnuty výsledky elementární prvkové analýzy, která udává koncentraci daných prvků v původním vzorku. Z dosažených výsledků nejsou patrné zásadní rozdíly mezi jednotlivými palivy, které by měli mít zásadní vliv na spalovací proces, resp. které by zásadně ovlivnily výsledné emise. Z hlediska dopadů na výsledné emise, zejména na emise TZL bude mít výraznější vliv složení popeloviny, než obsah balastních látek v palivu, který je víceméně shodný u všech vzorků nedřevní biomasy.



Tab. 1 Porovnání prvkové bilance měřených vzorků

	C [%_{hm.}]	H [%_{hm.}]	N [%_{hm.}]	S [%_{hm.}]	O [%_{hm.}]
Šťovík	43,28	5,86	1,31	0,09	44,29
Seno	42,20	5,98	0,68	0,05	45,84
Svitoh	46,62	5,96	3,28	0,00	42,82
Slunečnice	45,24	5,87	0,90	0,03	43,57
Slunečnice slupky	46,48	5,96	0,80	0,04	42,51
Kakaové slupky	45,49	6,19	2,39	0,11	39,43
Sláma	39,70	5,54	1,60	0,08	41,41
Čistá sláma	43,19	5,82	0,53	0,00	44,43
Sláma 90 kal 10	41,88	5,52	0,39	0,00	41,46
Sláma 80 kal 20	39,10	4,83	0,67	0,00	37,37
Sláma 70 kal 30	37,19	4,36	0,44	0,00	31,93
Sláma 60 kal 40	36,04	4,23	0,40	0,01	30,27
Dřevo – Timbory	46,29	6,25	0,28	0,00	46,62
Dřevo – Biomac	48,30	6,08	0,80	0,00	44,50
Dřevo	46,17	6,05	0,62	0,00	46,53
Čistý digestát	41,68	5,45	1,91	0,04	39,60
Smrkové piliny s digestátem	46,23	6,12	0,61	0,00	43,34

Hodnota výhřevnosti původního vzorku LHV^a , viz. Tabulka 3, je veličinou, která udává konečný energetický potenciál daného vzorku při reálném spalení. Tato veličina je základním parametrem srovnání pro výrobce i spotřebitele, ať už se jedná o jakýkoliv typ paliva.

Nejvyšší výhřevnosti původního vzorku LHV^a dosahují, dle předpokladů, vzorky dřevních pelet. Průměrem výhřevnosti dřevních pelet na českém trhu je $16\,500\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ [4], čímž se námi měřený vzorek dřevní brikety řadí k tomu lepším, co se nabízí, přičemž některé komerčně dostupné dřevní pelety udávají výhřevnost až $18\,000\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ [5]. Někteří výrobci užívají poněkud zavádějících hodnot výhřevnosti, když místo výhřevnosti vzorku uvádějí výhřevnost samotné sušiny, která je samozřejmě vyšší [4]. Jak ukazuje i naše měření, výhřevnost agropelet bývá v zásadě o něco nižší, než v případě dřevních pelet. Námi měřené vzorky jsou si s ohledem na výhřevnost dosti podobné a všechny překračují hodnotu $15\,500\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.



Tab. 3 Výhřevnost paliv

	Výhřevnost při 20 °C [kJ.kg ⁻¹]	
	Vzorek v dodaném stavu	Vzorek v suchém stavu
Šťovík	14 925	16 569
Seno	14 478	15 942
Svitoh	16 452	17 753
Slunečnice	15 637	17 778
Slunečnice slupky	16 391	17 740
Kakaové slupky	16 715	18 233
Sláma	13 750	15 273
Čistá sláma	14 875	15 973
Sláma 90 kal 10	14 532	15 386
Sláma 80 kal 20	13 408	14 137
Sláma 70 kal 30	12 990	13 603
Sláma 60 kal 40	12 672	13 285
Dřevo – Timbory	16 049	17 548
Dřevo – Biomac	16 904	17 987
Dřevo	15 814	17 356
Čistý digestát	14 575	16 143
Smrkové piliny s digestátem	16 223	17 507

Výpočet spalného tepla z elementární analýzy

Výpočet spalného tepla je možno provést podle prvkového složení v hořlavině. Vychází z empirických vzorců, stanovujících teoretickou hodnotu spalného tepla hořlaviny HHV_{teor}^{daf} z obsahu prvků uhlíku, vodíku, dusíku, síry a kyslíku v hořlavině. Již v roce 1843 byly uveřejněny rovnice francouzského chemika P. Dulonga, které však nejsou zcela vyhovující pro dřevo a další druhy tuhých paliv s vyšším podílem kyslíku. Mimo Dulongovy rovnice je uvedeno dalších 9 rovnic těchto autorů [6],:

D. I. Mendělejev (1897)

$$HHV_{teor}^{daf} = 339 \cdot C^{daf} + 1256 \cdot H^{daf} - 109 \cdot (O^{daf} - S^{daf}) \quad (1)$$

G. Strache a R. Lant (1924)

$$HHV_{teor}^{daf} = 340,6 \cdot C^{daf} + 1432 \cdot H^{daf} - 153,2 \cdot O^{daf} + 104,6 \cdot S^{daf} \quad (1)$$

W. Steuer (1926)



$$HHV_{teor}^{daf} = 339 \cdot (C^{daf} - \frac{3}{8} \cdot O^{daf}) + 239 \cdot (\frac{3}{8} \cdot O^{daf}) + 1444 \cdot (H^{daf} - \frac{O^{daf}}{16}) + 105 \cdot S^{daf} \quad (3)$$

E. Grummel a J. Daveies (1933)

$$HHV_{teor}^{daf} = (15,22 \cdot H^{daf} + 987,5) \cdot (\frac{C^{daf}}{3} + H^{daf} - \frac{O^{daf} - S^{daf}}{8}) \quad (42)$$

R. Michel (1938)

$$HHV_{teor}^{daf} = 340,3 \cdot C^{daf} + 1243,2 \cdot H^{daf} + 62,8 \cdot N^{daf} + 190,9 \cdot S^{daf} - 98,4 \cdot O^{daf} \quad (5)$$

V. Boie (1953)

$$HHV_{teor}^{daf} = 351,6 \cdot C^{daf} + 1162,2 \cdot H^{daf} - 117,6 \cdot (O^{daf} + S^{daf}) \quad (6)$$

$$HHV_{teor}^{daf} = 351,6 \cdot C^{daf} + 1162,2 \cdot H^{daf} - 104,6 \cdot O^{daf} + 96,3 \cdot S^{daf} \quad (7)$$

$$HHV_{teor}^{daf} = 351,6 \cdot C^{daf} + 1162 \cdot H^{daf} - 110,9 \cdot O^{daf} + 104,6 \cdot S^{daf} \quad (8)$$

F. Schuster (1957)

$$HHV_{teor}^{daf} = 339 \cdot C^{daf} + 1423 \cdot (H^{daf} - \frac{O^{daf}}{8}) + 92 \cdot S^{daf} \quad (3)$$

kde HHV_{teor}^{daf} – teoretická hodnota spalného tepla hořlaviny [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$];

C^{daf} – koncentrace uhlíku v hořlavíně [% hm.];

H^{daf} – koncentrace vodíku v hořlavíně [% hm.];

O^{daf} – koncentrace kyslíku v hořlavíně [% hm.];

S^{daf} – koncentrace síry v hořlavíně [% hm.];

N^{daf} – koncentrace dusíku v hořlavíně [% hm.].

Srovnáním teoretické hodnoty spalného tepla hořlaviny HHV_{teor}^{daf} se spalným teplem hořlaviny vypočteným z výsledků kalorimetrické metody HHV^{daf} u vybraných vzorků, viz Tab. 4, bylo v případě vzorku šťovíku a dřeva zjištěno přibližně stejné hodnoty spalného tepla teoretického i měřeného. U vzorku slámy a digestátu je již odchylka teoretické hodnoty od naměřené o něco vyšší, nicméně i v případě digestátu, jehož hodnoty se liší nejvíce, nedosáhla ani 5 %.

Při porovnání dílčích výsledků rovnic, se kterými byla teoretická hodnota spalného tepla v hořlavíně HHV_{teor}^{daf} počítána, s hodnotou určenou z kalorimetru HHV^{daf} bylo zjištěno, že rovnice popisující nejlépe všechny čtyři vzorky je nejstarší z nich, tedy rovnice dle D. I. Mendělejeva z roku 1897. Tyto měření tak dokazují vhodnost použití této rovnice pro paliva z biomasy. Nejméně přesné výsledky naopak vykazuje rovnice dle F. Schustera z roku 1957.



Tab. 4 Srovnání teoretické hodnoty spalného tepla v hořlavině se spalným teplem vypočteným z kalorimetrického měření

Vzorek		Sláma	Šťovík	Digestát	Slunečnice	Dřevo
Spalné teplo vypočtené z kalorimetrického měření HHV^{daf} [kJ.kg ⁻¹]		19809	19771	21124		20267
Rovnice pro výpočet spalného tepla z prvkového složení	Průměrná hodnota výsledků daných rovnic HHV_{teor}^{daf} [kJ.kg ⁻¹]	19248	21877	19594	20879	20071
	Mendělejev	19609	22097	19924	21221	20403
	Strache	18843	21684	19193	20658	19724
	Steuer	19949	22663	20250	21645	20772
	Grummel	18444	21221	18813	20223	19347
	Michel	20132	22652	20485	21704	20966
	Boie 1	19232	21687	19562	21213	19866
	Boie 2	19838	22273	20181		20634
	Boie 3	19563	22032	19918		20380
Schuster	17626	20579	18018	19489	18547	

Protože žádná z těchto rovnic není navržena konkrétně pro spalné teplo biomasy, je výsledná teoretická hodnota spalného tepla hořlaviny HHV_{teor}^{daf} vypočtena jako aritmetický průměr z výsledků rovnic (1)–(9).

3 Závěr

Agropelety dostupné na českém trhu jsou nejčastěji složeny z odpadu zemědělské produkce (sláma, zbytky z čištění semen, nestandardní semena, osiny, atd.), ale i z rostlin pěstovaných záměrně pro energetické účely (žitovec, šťovík, konopí). Agropelety mohou být vyráběny i z fermentačních zbytků z bioplynových stanic, tzv. digestátu.

Stanovením sušiny a obsahu vody dle ČSN EN 12880 byl zjištěn obsah vody, jež má zásadní vliv na celkovou výhřevnost paliva. Testované pelety vykazovaly vlhkost cca 8 % hm., což je pro pelety standardní hodnota.

Zkouškou stanovení ztráty žíháním dle ČSN EN 15169 byl zjištěn obsah popele ve vzorku. Nejmenší obsah popele 0,8 % hm. byl dle očekávání naměřen na vzorku dřevní pelety. Pelety ze slámy a šťovíku obsahují cca 6 % popele a vzorek digestátu téměř dvojnásobek. Vysoký obsah popele má negativní vliv na činnost kotle a zároveň snižuje výslednou výhřevnost vzorku.



Dále bylo provedeno měření spalného tepla kalorimetrickou metodou a výpočet výhřevnosti dle ČSN ISO 1928. Výpočtem z naměřených hodnot spalného tepla byla určena výhřevnost jednotlivých vzorků, jež je základním porovnávacím kritériem všech paliv. Jak potvrzuje i naše měření, výhřevnost agropelet bývá v zásadě nižší než u dřevních pelet.

Poslední část byla věnována teoretickému výpočtu spalného tepla ze známých empiricky stanovených vzorců. Tyto vzorce počítaly spalné teplo pomocí základního prvkového složení C, H, O, N a S v hořlavině. Výsledkem bylo spalné teplo hořlaviny, které bylo po srovnání se spalným teplem naměřeným kalorimetricky víceméně stejné (odchylka nepřesáhla 5 %).

Po dokončení rozborů paliv a vyhodnocení výsledků byly zahájeny spalovací zkoušky s využitím jednotlivých paliv. Tyto testy v současné chvíli probíhají a vyhodnocena je pouze první sada měření. Při těchto zkouškách byly stanovovány plynné emise a tuhé znečišťující látky (TZL) ve spalinách. Spalovací zkoušky byly realizovány jednak na kotli Verner A 251.1 pro spalování různých druhů obnovitelných paliv s posuvným roštem pro rozduřování paliva, dále pak na kotli BETA s hořákem pro spalování dřevních pelet s otočnou spalovací komorou.

Dosažené výsledky jsou ve stručnosti shrnuty v následující tabulce č. 5.

Tab. 5 Výsledky spalovacích zkoušek

		O ₂ [%]	NO _x [mg/m ³ _n]	CO [mg/m ³ _n]	TZL [mg/m ³ _n]
Seno	Verner	11,00	697,85	930,04	491
Řepka	Verner	10,41	613,17	754,60	631
Pšenice	Verner	9,15	465,92	369,71	259
Směs	Verner	10,25	761,93	173,78	193
Dřevo	Verner	7,89	346,71	120,31	28,5
Řepka	BETA	8,9	628,35	2403,31	566
Směs	BETA	7,9	525,51	968,70	253
Seno	BETA	7,3	487,06	1195,62	255
Dřevo	BETA	7,25	303,56	150,65	41,3

Z dosažených výsledků jednoznačně vyplývá, že na totožném zařízení jsou při použití agropelet emise TZL řádově vyšší než při spalování dřevních pelet. Také plynné emise jsou vyšší než při použití dřevních pelet. U obou typů použitých hořáků se dále velmi negativně projevilo spékání paliva v prostoru hořáku a vynašeče popele. Oba hořáky se jeví pro spalování agropelet jako nevhodné, byť při spalování dřevních pelet dosahují velmi dobrých parametrů.

Co se týká emisí TZL, která jsou pro úspěšný návrh kotle na spalování agropelet klíčové, je patrný rozdíl i pro jednotlivá agropaliva. Protože u standartních, výše uvedených zkoušek, nebyl patrný zásadní rozdíl ve vlastnostech paliv, byly analyzovány také jednotlivé vzorky zachyceného tuhého úletu. Měření bylo provedeno na RTG difraktometru D8 Advance



diffractometer (Bruker AXS, Germany) s detektorem LynxEye, který poskytuje v kratším čase difraktogram s většími intenzitami a lepším odstupem od šumu. Konkrétní vyhodnocení prozatím není dokončeno. Obecně lze říci, že vzorky obsahují 25-60% amorfni podíl. Konkrétní výsledky jsou v tuto chvíli stále vyhodnocovány. Následně bude porovnáno složení popeloviny s celkovým obsahem zachycených TZL.

Poděkování:

Projekt byl realizován za podpory Technologické agentury České republiky v rámci programu Epsilon, projekt č. TH02020025 Výzkum a vývoj automatického kotle na spalování biomasy

Použitá literatura

- [1] KOTT, Jiří: Výroba pelet z biomasy - technické a ekonomické aspekty. Biom.cz [online]. 2010-12-20 [cit. 2016-04-14]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyroba-pelet-z-biomasy-technicke-a-ekonomicke-aspekty>>. ISSN: 1801-2655.
- [2] TZB-info : Kotle - 1. část [online]. 2012-03-19 [cit. 2016-05-04]. Dostupné z WWW: <<http://vytapani.tzb-info.cz/teorie-a-schemata/8382-kotle-1-cast>>. ISSN 1801-4399.
- [3] JANDAČKA, Jozef a Milan MALCHO. Biomasa ako zdroj energie. Vyd. 1. Žilina: Juraj Štefuň – GEORG, 2007. ISBN 978-80-969161-4-6.
- [4] TZB-info : náklady na vytápění dřevními peletami [online]. 2010-02-22 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z WWW: <<http://oze.tzb-info.cz/biomasa/6263-naklady-na-vytapani-drevnimi-peletami>>. ISSN 1801-4399.
- [5] STUPAVSKÝ, Vladimír: Pelety z biomasy - dřevěné, rostlinné, kůrové pelety. Biom.cz [online]. 2010-01-01 [cit. 2016-04-14]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/pelety-z-biomasy-drevene-rostlinne-kurove-pelety>>. ISSN: 1801-2655.
- [6] KLOBUŠNÍK, Lubomír. Pelety: palivo budoucnosti. České Budějovice: Sdružení Harmonie, 2003. ISBN 8023919563.