

**VPLYV PŘÍDAVNÝCH LÁTKOK NA TEPLITU
TAVITELNOSTI POPOLA A EMISIÍ TUHÝCH ČASTÍC
PRI SPAĽOVANÍ FYTOMASY**

Tézy inauguračnej prednášky

2021

doc. Ing. Radovan Nosek, PhD.

doc. Ing. Radovan Nosek, PhD.
Žilinská univerzita v Žiline

Téma inauguračnej prednášky

**VPLYV PRÍDAVNÝCH LÁTOK NA TEPLITU TAVITEĽNOSTI POPOLA A EMISÍÍ
TUHÝCH ČASŤÍČ PRI SPAĽOVANÍ FYTOMASY**

Študijný odbor: **Energetické stroje a zariadenia**

Komisia:

Predseda komisie:

prof. Ing. Jozef Jandačka, PhD.

SjF ŽU v Žiline

Členovia komisie:

Prof. dr hab. inž. Andrzej Szlęk

prof. Ing. Miroslav Rimár, CSc.

prof. Ing. František Urban, CSc.

Politechnika Slaska -Gliwice, PL

FVT TUKE so sídlom v Prešove

Sjf STU v Bratislave

Oponenti:

prof. Ing. Dagmar Juchelková, PhD.

prof. Ing. Ladislav Dzurenda, PhD.

prof. RNDr. Milan Malcho, CSc.

VŠB-TU Ostrava, CZ

TU vo Zvolene

SjF ŽU v Žiline

© R. Nosek, 2021

ISBN 978-80-554-1807-0

ANOTÁCIA

Fytomasa, ako obnoviteľný zdroj energie, má pre budúcnosť obrovský potenciál. Ten okrem jej širokej dostupnosti a nízkej ceny spočíva najmä v jej flexibilita a možnosti využitia v rôznych aplikáciách. Napriek niektorým nedostatkom si tak zasluhuje omnoho väčšiu pozornosť, najmä na území Slovenskej republiky.

Tuhé ušľachtilé biopalivá ako pelety a brikety, doposiaľ využívané hlavne u drevnej suroviny, majú v prípade fytomasy prídavný význam, práve kvôli riedkosti energie. Jedným z dôležitých parametrov peliet z fytomasy, ktoré ovplyvňujú kvalitu procesu spaľovania, je tavitelnosť popola. Jedným z riešení, ako sa vysporiadať s týmto najväčším nedostatkom fytomasy, je použitie vhodných aditív a materiálov, ktoré túto teplotu dokážu zvýšiť.

V práci sú uvedené vplyvy rôznych druhov aditív pridávaných do drevných peliet za účelom zvýšenia teploty tavitelnosti popola paliva. Taktiež analyzované aj ich vplyv na ostatné vlastnosti peliet, na prevádzkové parametre zdrojov tepla a na produkciu emisií. Hlavným cieľom práce bola výroba peliet z fytomasy s obsahom drevných pilín a papierenského kalu v rôznych pomeroch, pre ktoré sa následne urobila analýza výkonových a emisných parametrov počas spaľovania v malom zdroji tepla.

V rámci ďalšieho výskumu bol skúmaný vplyv samotného papierenského kalu na spoluspaľovanie s drevnými pilinami vo forme peliet.

Kľúčové slová: fytomasa, pelety, aditíva, teplota tavitelnosti.

OBSAH

ABSTRAKT	Chyba! Záložka nie je definovaná.
OBSAH.....	4
ZOZNAM OBRÁZKOV	6
ZOZNAM TABULIEK	7
ZOZNAM SKRATIEK A ZNAČIEK	8
ÚVOD.....	10
1 FYTOMASA	11
1.1 Zdroje fytomasy	12
1.1.1 Energetické plodiny	12
1.1.2 Reziduá, poľnohospodárske zvyšky	13
1.1.3 Zvyšky poľnohospodársko-priemyselné	13
1.2 Zloženie fytomasy.....	13
1.2.1 Zloženie paliva a vplyv na jeho vlastnosti	13
2 Spôsoby zušľacht'ovania fytomasy pre energetické účely	17
2.1 Tuhé biopalivá - spaľovanie fytomasy.....	18
2.1.1 Pelety	18
2.1.2 Brikety	20
3 Aditíva a materiály na spoluspaľovanie s fytomasou.....	21
3.1 Aditíva pridávané do fytomasy	21
3.1.1 Aditíva na báze kremičitanov hliníka.....	22
3.1.2 Aditíva na báze síry	22
3.1.3 Aditíva na báze vápnika	23
3.1.4 Aditíva na báze fosforu	23
3.2 Materiály vhodné na spoluspaľovanie s fytomasou.....	24
3.2.1 Spoluspaľovanie fytomasy a rašeliny	25
3.2.2 Spoluspaľovanie fytomasy a uhlia	25
3.2.3 Spoluspaľovanie fytomasy a zemného plynu	26
3.2.4 Spoluspaľovanie fytomasy a dendromasy	27
3.2.5 Využitie papierenského kalu ako aditíva.....	28
3.3 Problémy pri spaľovaní fytomasy.....	31
3.3.1 Opatrenia na redukcii problémov pri spaľovaní fytomasy	33
4 Analýza a vyhodnotenie vlastností peliet z fytomasy	35
4.1 Príprava vstupných surovín.....	35
4.1.1 Drvenie vstupných surovín.....	36
4.2 Peletovanie slamy	37
4.3 Prvkový rozbor paliva.....	38

4.4	TGA analýza	39
4.5	Meranie výhrevnosti	40
4.6	Vplyv papierenského kalu na teplotu tavitel'nosti popola.....	41
5	Experimentálne spaľovanie v zdroji tepla	45
5.1	Zdroj tepla	45
5.2	Meracie prístroje	48
6	Výsledky experimentálnych meraní	51
6.1	Výsledky meraní výkonu spaľovacieho zariadenia	51
6.2	Výsledky meraní plynných emisií	52
6.3	Výsledky meraní tuhých znečisťujúcich látok.....	54
7	Analýza a vyhodnotenie vlastností peliet z drevných pilín a papierenského kalu	57
7.1	Postup merania a analýza získaných výsledkov	58
	ZÁVER	61
8	BIBLIOGRAFIA	64

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1 Všeobecné zloženie tuhého paliva	14
Obr. 2 Obsah popola ôsmich zdrojov fytohmoty pestovaných na ílovitej pôde	16
Obr. 3 Priebeh sušenia kalu	35
Obr. 4 Vertikálny šrotovník	36
Obr. 5 Zásobovací dopravník	36
Obr. 6 Peletovacie zariadenie KAHL 33-390/500	37
Obr. 7 Porovnanie výsledných peliet	38
Obr. 8 Obsah C, H, N vyrobených vzoriek paliva vrátane kalu	39
Obr. 9 Spalné teplo a výhrevnosť vyrobených peliet vrátane kalu a drevných peliet	41
Obr. 10 Porovnanie vzoriek pred (vľavo) a po meraní (vpravo)	42
Obr. 11 Priebeh merania vzorky popola z čistej slamy	42
Obr. 12 Priebeh merania vzorky popola slama/kal:80/20	43
Obr. 13 Schéma kotolne.....	45
Obr. 14 Experimentálne spaľovacie zariadenie.....	46
Obr. 15 Regulačná sústava teplovodného kotla.....	47
Obr. 16 Chladiaca veža.....	47
Obr. 17 Elektronická regulácia MAGA S. CONTROL.....	48
Obr. 18 Zariadenie na meranie TZL, emisií CO a NOx.....	49
Obr. 19 Sonda pre odber celkových emisií TZL.....	50
Obr. 20 Sušiaca váha a presná digitálna váha.....	50
Obr. 21 Grafické porovnanie tepelných výkonov.....	51
Obr. 22 Grafické zobrazenie emisií CO.....	53
Obr. 23 Grafické zobrazenie produkcií NOx.....	54
Obr. 24 Grafické zobrazenie produkcie TZL.....	55
Obr. 25 Ukážky zanesenia filtrov po meraní TZL.....	56
Obr. 26 Nameraná výhrevnosť peliet zmesi kalu a pilín a drevných peliet.....	58
Obr. 27 Výkon kotla pri spaľovaní peliet zmesi kalu s drevnými pilinami.....	59
Obr. 28 Namerané koncentrácie CO pri spaľovaní skúšobných vzoriek.....	59
Obr. 29 Namerané koncentrácie NOx pri spaľovaní skúšobných vzoriek.....	60

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 1 Energetické plodiny a ich ročná výnosnosť suchej biomasy.....	12
Tab. 2 Chemické zloženie fytomasy a uhlia.....	14
Tab. 3 Limitné hodnoty pre pelety z nedrevnej biomasy	19
Tab. 4 Prehľad používaných aditív	24
Tab. 5 Porovnanie prevádzok pracujúcich s technológiou spoluspalovania a bez nej	26
Tab. 6 Tavitelnosť popola zmesi slamy a kalu.....	30
Tab. 7 Percentuálne pomery skúmaných vzoriek.....	37
Tab. 8 Výsledky TGA analýzy vyprodukovaných peliet vrátane kalu a drevných peliet	40
Tab. 9 Teploty tavitelnosti popola vyprodukovaných vzoriek peliet	43
Tab. 10 Podiel popola v 10 g paliva vo vzorke slama/kal:90/10	44
Tab. 11 Výsledky TGA analýzy skúšobných vzoriek peliet.....	57
Tab. 12 Obsah C, H, N v skúšobných vzorkách peliet.....	57
Tab. 13 Exp. zistené vlastnosti skúšobných vzoriek peliet.....	57

ZOZNAM SKRATIEK A ZNAČIEK

%	per cento	(-)
μm	mikrometer	(-)
A	obsah popola	(mg · kg ⁻¹)
Al ₂ O ₃	oxid hlinika	(%)
As	arzén	(mg · kg ⁻¹)
°C	stupeň celzia	(-)
Ca ₂ MgSiO ₇	akermanit	(-)
Ca ₃ MgSi ₂ O ₈	merwinite	(-)
CaMgSi ₂ O ₆	diopsid	(-)
CaO	oxid vápenatý	(%)
CaSiO ₃	wollastonit	(-)
cca	približne	(-)
Cd	kadmium	(mg · kg ⁻¹)
Cl	chlór	(-)
Co	kobalt	(mg · kg ⁻¹)
CO	oxid uhoľnatý	(mg · m ⁻³)
CO ₂	oxid uhličitý	(mg · m ⁻³)
Cr	chróm	(mg · kg ⁻¹)
Cu	meď	(mg · kg ⁻¹)
C ₂ H _y	uhľovodíky	(-)
H ₂	obsah vodíka v palive	(kg · kg ⁻¹)
H ₂	vodík	(-)
HCl	kyselina chlorovodíková	(-)
Hg	ortuť	(mg · kg ⁻¹)
K	draslik	(mg · kg ⁻¹)
K ₂ SO ₄	síran draselný	(-)
KCl	chlorid draselný	(-)
kg	kilogram	(-)
KOH	hydroxid draselný	(-)
M _{sr}	relatívna vlhkosť	(%)
mg · kg ⁻¹	miligram na kilogram	(-)

Mg	horčík	(mg · kg ⁻¹)
Mg ₂ SiO ₄	forsterit	(-)
MJ · kg ⁻¹	megajoule na kilogram	(-)
mm	milimeter	(-)
Mo	molybdén	(mg · kg ⁻¹)
N	dusík	(-)
napr.	napríklad	(-)
NEL-IR	hmotnostná koncentrácia organických látok	(mg · kg ⁻¹)
Ni	nikel	(mg · kg ⁻¹)
NO _x	oxidy dusíka	(mg · m ⁻³)
Obr.	obrázok	(-)
Pb	olovo	(mg · kg ⁻¹)
ppm	parts per milion	(-)
Q _d	výhrevnosť	(MJ · kg ⁻¹)
Q _d	spalné teplo	(MJ · kg ⁻¹)
resp.	respektive	(-)
s.r.o.	spoločnosť s ručením obmedzeným	(-)
Si	kremík	(mg · kg ⁻¹)
SiO ₂	oxid kremičitý	(%)
SO ₂	oxid siričitý	(mg · m ⁻³)
STU	Slovenská technická univerzita	(-)
tab.	tabuľka	(-)
TZL	tuhé znečisťujúce látky	(mg · m ⁻³)
tzv.	takzvaný	(-)
Zn	zinok	(mg · kg ⁻¹)

ÚVOD

Celosvetová spotreba energie každým rokom stúpa a naberá na intenzite. Jej hlavným zdrojom sú napriek mnohým negatívnym vplyvom fosílne palivá, ktorých zásoby sa však postupne mínajú. Z pohľadu udržateľnosti je tak dôležité obzerať sa po obnoviteľných zdrojoch energie. Jedným z najviac perspektívnych, avšak málo využívaných, je práve fytomasa. Výhoda tohto paliva okrem nulovej uhlíkovej stopy spočíva v jej širokej dostupnosti takmer vo všetkých častiach sveta, s čím súvisí aj jej nízka cena. Spolu s rýchlou obnoviteľnosťou sú tieto faktory dôvodom vysokého potenciálu tejto suroviny. Nízka energetická hustota, objemová hmotnosť a nízka teplota tavitel'nosti popola niektorých zdrojov fytomasy predstavujú na druhej strane negatíva, ktoré sú príčinou nižšieho záujmu o toto palivo. Zatiaľ čo prvé dva nedostatky spôsobujú ťažkosti s prepravou, manipuláciou a skladovaním, nízka teplota tavitel'nosti popola je príčinou vážnych prevádzkových problémov počas procesov spaľovania. Vývoj však zasiahol aj do tejto oblasti, vďaka čomu sa s väčšinou spomínaných ťažkostí v dnešnej dobe vieme vysporiadať.

Úlohou tejto práce je teda popísať spôsoby zušľacht'ovania fytomasy, čo je jedno z riešení, ako sa vyrovnáť s nízkou objemovou hmotnosťou a energetickou hustotou tejto suroviny. Z jednotlivých spôsobov zušľacht'ovania sa práca zameriava hlavne na tuhé ušľachtilé biopalivá - pelety a brikety. Ďalšie kapitoly sú následne venované aditívam a materiálom na spoluspaľovanie s fytomasou, ktoré predstavujú jednu z možností, ako sa vysporiadať s už spomínanou nízkou teplotou tavitel'nosti popola.

Dôležitou súčasťou je praktická časť práce, ktorá sa ďalej venuje výrobe a následnej analýze niektorých vlastností peliet z fytomasy, s rôznym obsahom drevných pilín a papierenského kalu. Cieľom je posúdiť jeho vplyv na niektoré dôležité parametre peliet z fytomasy, vrátane vplyvu na teplotu tavitel'nosti popola a zhodnotiť, či v dostatočnej miere rieši problém palív na báze fytomasy.

V rámci výskumu boli vyrobené vzorky peliet z fytomasy, s rôznym obsahom drevných pilín a papierenského kalu, spaľované v malom zdroji tepla. Následne sa analyzoval vplyv obsahu kalu a dendromasy na výkonové a emisné parametre zdroja tepla. Na základe porovnania s referenčnou vzorkou peliet z čistej slamy bol vyhodnotený najvhodnejší pomer miešania týchto troch surovín.

1 FYTOMASA

Fytomasa, ako súčasť biomasy, predstavuje obnoviteľný zdroj energie, ktorý zahŕňa organické látky rastlinného pôvodu, vytvorené pôsobením fotosyntézy na určitom území, pričom sa jedná o rastliny, ktorých povrch nie je pokrytý kôrou. Fotosyntéza predstavuje proces, pri ktorom organizmy obsahujúce chlorofyl, akými sú zelené rastliny, riasy a niektoré baktérie, zachytávajú energiu vo forme svetla a premieňajú ju na chemickú energiu (McKendry, 2002).

Norma EN 17225-1 (Tuhé biopalivá • Špecifikácie a triedy palív časť 1 : Všeobecné požiadavky) rozlišuje štyri kategórie pevných biopalív (drevné, rastlinné, ovocné a zmesi) a fytomasy definuje táto norma nasledovne : „Rastlinná biomasa pochádza z rastlín, ktoré majú nedrevnú stonku a ktoré odumierajú na konci vegetačného obdobia. Zahŕňa tiež obilniny alebo semená z potravinárskeho priemyslu a ich vedľajších produktov, akým je napríklad obilná slama.”

Napriek skutočnosti, že drevo vo svojich rozličných formách je v súčasnosti najrozšírenejším zdrojom biomasy, je predpoklad, že fytomasa bude hrať v budúcnosti čoraz dôležitejšiu úlohu.

Pre tento predpoklad existuje niekoľko dôvodov (bisysplan.bioenarea.eu) :

- rastúci celosvetový dopyt po bioenergii v dôsledku rastúcich cien fosílnych palív
- zdroje dreva sú obmedzené, pričom jestvuje väčšia konkurencia pre jeho využitie – okrem použitia ako paliva, aj pre drevospracujúci priemysel, výrobu papiera a pod.
- fytomasa môže byť využitá na výrobu rozličných nosičov energie, od kvapalných a plyných biopalív, až po tuhé zušľachtené biopalivá – pelety a brikety

Kým vo svete dodávky biomasy z poľnohospodárskeho sektoru predstavovali v roku 2007 14,3 % z celkového množstva, predpokladá sa, že do roku 2020 sa zvýšia na 28,6 % a do roku 2050 až na 47 %. Na Slovensku bol celkový energetický potenciál biomasy z agrosektoru v roku 2010 29 449 GW_h, čím by sa dalo pokryť až 13 % celkovej ročnej spotreby energie (Pepich 2010).

1.1 Zdroje fytomasy

Fytomasa zahŕňa pomerne širokú škálu surovín, ktoré sú spojené najmä s poľnohospodárstvom, ale aj záhradníctvom, či spracovateľským priemyslom.

1.1.1 Energetické plodiny

Medzi energetické plodiny zaraďujeme rozličné rastliny a trávny, ktoré sú určené na použitie v energetickom sektore. Majú obrovský potenciál, najmä kvôli vysokej výnosnosti, čo je zrejmé aj z tab.1. V súčasnej dobe je najrozšírenejším pestovanie olejnatých plodín, ktorých semená sa využívajú pre produkciu kvapalných biopalív, akými sú bionafta a bioetanol. Etanol z kukurice, poprípade pšenice, ako aj bionafta z repky a slnečnice sú azda najznámejšími príkladmi spracovania fytomasy pre energetické účely. V praxi sa stretávame s označením produkcia biopalív 1. generácie. Myšlienkou pestovania týchto plodín je pomerne ľahká výroba kvapalného biopaliva zo semena bohatého na olej resp. škrob. Tieto suroviny však môžu byť tiež využité na výrobu potravín, a preto je otázna udržateľnosť takejto produkcie. Iné druhy bylinných energetických rastlín sú charakterizované ako celulóзовé, čo znamená, že obsah oleja a škrobu je minimálny, ale sú bohaté na obsah celulózy, hemicelulózy a lignínu a preto môžu byť použité priamo na výrobu tepla alebo elektriny, poprípade na výrobu biopalív 2. generácie. Jedná sa však o náročnejší proces v porovnaní s výrobou biopalív 1. generácie (bisyplan.bioenarea.eu).

Tab. 1 Energetické plodiny a ich ročná výnosnosť suchej biomasy (Porvaz 2010)

Druh rastliny	Úroda [t.ha ⁻¹]	Termín zberu
Jednoročné		
Obilniny – tritikale	10 – 12	VII, VIII
Konopa siata	8,5 – 16	IX, X
Ozimná raž	9 – 12	VII, VIII
Viacročné		
Šťaveľ krmny	15 – 25	VII
Ozdobnica čínska	15 – 25	III, IV
Pupalka dvojročná	4 – 5	IX

1.1.2 Reziduá, poľnohospodárske zvyšky

Jedná sa o vedľajšie produkty na poli, ktoré vznikajú pri výrobe potravín alebo krmív. Do tejto kategórie zahrňame slamu z obilnín a ryže, zvyšky z kukurice, stonky a listy z olejnatých plodín.

Poľnohospodárske zvyšky sa v niektorých prípadoch používajú ako tuhé biopalivá na výrobu tepla alebo elektrickej energie. Môžu byť však použité aj na výrobu už spomínaných biopalív 2. generácie (bisyplan.bioenarea.eu).

1.1.3 Zvyšky poľnohospodársko-priemyselné

Ide o vedľajšie produkty alebo reziduá zo spracovateľského priemyslu, väčšinou z potravinárskeho sektora. Presnejšie povedané, niektoré z týchto surovín nemusia byť zaradené do kategórie rastlinnej biomasy podľa EN 17225-1, ale skôr ako ovocná biomasa. Poľnohospodársko-priemyselné zvyšky zvyčajne vykazujú dobré spaľovacie vlastnosti a sú široko využívané ako palivá pre potreby priemyslu (bisyplan.bioenarea.eu).

1.2 Zloženie fytomasy

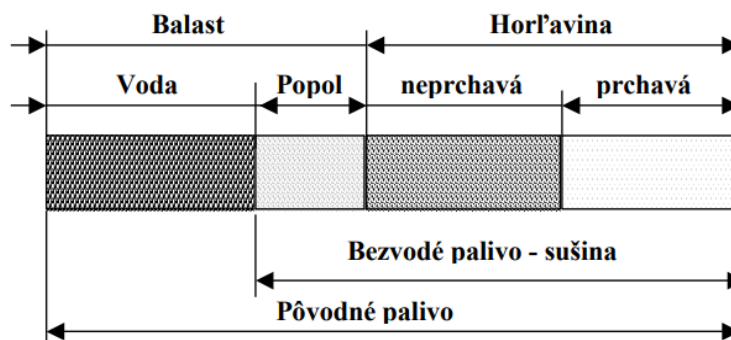
Pre lepšie porozumenie procesov, ktorými sa z fytomasy získava energia, je kľúčové poznať základné zloženie tohto zdroja energie. Toto zloženie predstavuje jedinečný základný kód, ktorý charakterizuje a určuje vlastnosti, kvalitu, potenciálne aplikácie, a tiež environmentálne problémy týkajúce sa tohto paliva.

1.2.1 Zloženie paliva a vplyv na jeho vlastnosti

Vzhľadom na fyzikálne a chemické kritéria hodnotíme fytomasu ako bežné tuhé palivo. Ako je zrejmé z obr. 1, všetky tuhé palivá, ktoré sú v tzv. surovom (prirodzenom) stave, sú zložené z troch hlavných zložiek: vody, popola a horľaviny (Jandačka 2016). Horľavina (prchavá a neprchavá) je časť paliva, ktorú potrebujeme, pretože je nositeľom energie. Fytomasa je charakteristická práve vyšším obsahom prchavej horľaviny, čo znamená, že sa ľahšie zapáľuje a horí väčším plameňom. Voda a popol na druhej strane tvoria balast, ktorý je síce v palive obsiahnutý, no neprináša žiaden energetický zisk. Platí teda, že palivo s nižším obsahom vody a popoloviny je kvalitnejšie, z čoho vyplýva, že obsahuje viac energie a účinnejšie sa spaľuje (Horák 2012).

Všetky rastlinné materiály sú okrem toho zložené najmä z troch hlavných zlúčenín, ktorými sú celulóza, hemicelulóza a lignín. Všetky obsahujú určité množstvo vody a prchavé

zložky. Koncentrácie každej skupiny týchto zlúčenín sa líšia v závislosti od druhu, typu rastlinného tkaniva, fázy rastu a podmienok pestovania. Fytomasa zvyčajne obsahuje 15 - 25 % lignínu, 20 - 40 % hemicelulózy a 30 - 50 % celulózy (Lee 2007).



Obr. 1 Všeobecné zloženie tuhého paliva (www.enef.eu)

Horľavina je teda tvorená piatimi elementárnymi prvkami, ktorými sú: C - uhlík, O - kyslík, H - vodík, N - dusík a S - síra. Prvé tri prvky výrazne ovplyvňujú samotný spaľovací proces, zatiaľ čo posledné dva vplyvajú najmä na produkciu znečisťujúcich látok. Aktívnymi prvkami horľaviny sú pritom vodík, uhlík a síra, zatiaľ čo kyslík a dusík predstavujú jej pasívnu zložku (Horák 2012). Tab. 2 znázorňuje prvkové zloženie jednotlivých druhov fytomasy, pre porovnanie aj vrátane zloženia hnedého a čierneho uhlia.

Tab. 2 Chemické zloženie fytomasy a uhlia (Jandačka 2016), (Vassilev 2010)

Palivo	Zložky paliva v suchej hmote [%]				
	C	H	O	N	S
Chrastnica trsteníková	49,4	6,3	42,7	1,5	0,15
Ozdobnica čínska	49,2	6,0	44,2	0,4	0,15
Proso	49,7	6,1	43,4	0,7	0,11
Jačmenná slama	49,4	6,2	43,6	0,7	0,13
Repková slama	47,1	5,9	40,0	0,84	0,27
Pšeničná slama	49,4	6,1	43,6	0,7	0,17
Zrno tritikale	43,5	6,4	46,4	1,68	0,110
Zrno pšenice	43,6	6,5	44,9	2,28	0,120
Čierne uhlie	72,5	5,6	11,1	1,30	0,940
Hnedé uhlie	65,9	4,9	23,0	0,70	0,390

Keďže fytomasa patrí medzi „mladé“ palivo, obsah uhlíka sa pohybuje do 50 %, zatiaľ čo uhlie obsahuje 60 % alebo viac. Vyšší obsah uhlíka vedie k vyššej výhrevnosti paliva. K vyššej výhrevnosti paliva prispieva aj vodík, ktorého podiel vo fytomase predstavuje zvyčajne 5 - 6 % (Jenkins 1998).

Dusík viazaný v palive je zodpovedný za väčšinu emisií NO_x , produkovaných pri spaľovaní fytomasy. Nižší obsah by mal teda viesť k nižším emisiám NO_x . Obsah dusíka vo fytomase sa pohybuje okolo 1%, občas je však táto hodnota pri niektorých druhoch vyššia (Jenkins 1998).

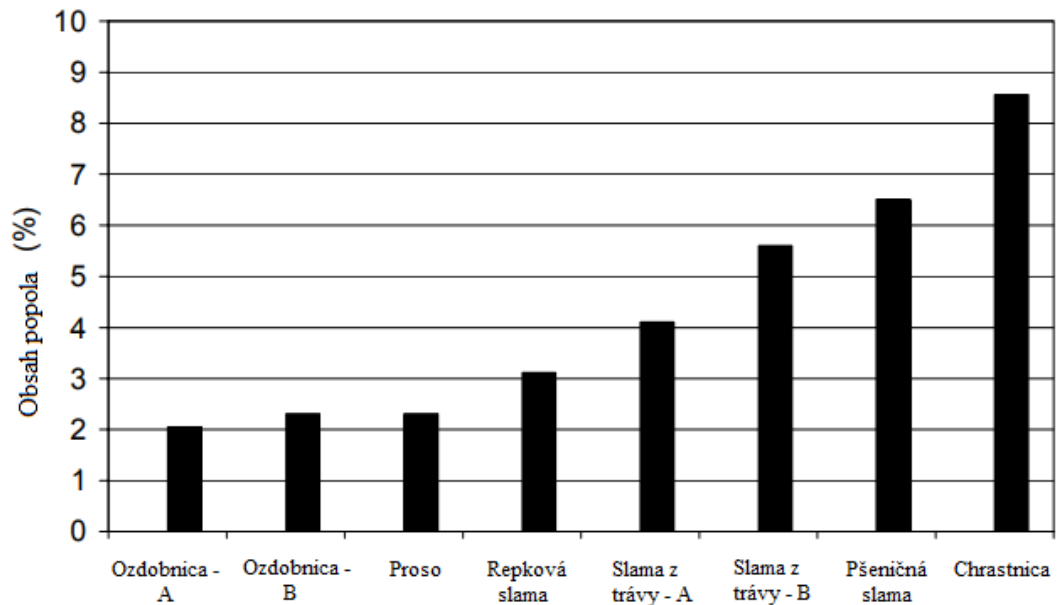
Z tab. 2 je tiež zrejmé, že väčšina palív z fytomasy obsahuje menej ako 0,2 % síry. Túto hodnotu prekračuje len repková slama, ktorá obsahuje približne 0,3 %. Napriek skutočnosti, že tento prvok zvyšuje výhrevnosť, v palive je nežiadúci. Dôvodom je okrem znečisťovania atmosféry aj nepriaznivý vplyv na životnosť spaľovacieho zariadenia (Malat'ák 2008). Keďže fytomasa obsahuje takéto, pomerne zanedbateľné množstvo síry, jej spaľovanie výrazne neprispieva k emisiám SO_x .

Výhrevnosť fytomasy, ktorá je popri spalnom teple najdôležitejším parametrom paliva, je z veľkej časti závislá od množstva vody a zvyčajne býva v rozmedzí od 8,1 do 18,6 MJ.kg^{-1} (Straka 2009). Je teda o niečo nižšia ako u drevnej biomasy, čo je spôsobené aj tým, že fytomasa obsahuje menej lignínu, ktorého výhrevnosť ($26,7 \text{ MJ.kg}^{-1}$) je vyššia v porovnaní s výhrevnosťou celulózy ($17,3 \text{ MJ.kg}^{-1}$), v dôsledku vyššieho stupňa oxidácie (Jenkins 1998).

Vlhkosť je teda pri spaľovaní fytomasy limitujúcim faktorom. Fytomasa s nižším obsahom vlhkosti má vyššiu výhrevnosť, pretože pri spaľovaní sa využíva menej energie na vyparenie vody. Spaľovanie je totiž exotermická reakcia, zatiaľ čo vyparovanie vody je reakcia silne endotermická (Jenkins 1998). Zvýšenie obsahu vlhkosti v slame o 10 % dokáže znížiť jej výhrevnosť až o 2 MJ.kg^{-1} (Pepich 2012). Vysoký obsah vody v palive okrem výhrevnosti vplýva nepriaznivo aj na koncentráciu plynných a tuhých emisií v spalinách.

Obsah vlhkosti fytomasy po zbere závisí od druhu rastliny, obdobia zberu a taktiež počasia. Vlhkosť slamy zberanej v lete nepresahuje zvyčajne 15 %. Zvyšky z kukurice, ktoré sa zberajú v jeseni sa vyznačujú vyššou vlhkosťou okolo 20 %, zatiaľ čo rastliny zberané v zime majú vlhkosť často prevyšujúcu 40 % (bisypplan.bioenarea.eu).

Popol predstavuje ďalšiu nespáliteľnú zložku paliva. Jeho obsah vo fytomase môže byť od 2 do 20 %, pričom hodnoty nad 10 % u zrelých tráv sú takmer určite výsledkom nadmernej kontaminácie povrchovej pôdy (Cherney 2012). Na obr. 2 je znázornené porovnanie obsahu popola u rôznych zdrojov fytomasy.



Obr. 2 Obsah popola ôsmich zdrojov fytomasy pestovaných na ílovitej pôde (Bakker 2005)

Minerálne zložky, ktoré tvoria popol, ovplyvňujú teplotu tavenia popola ako aj potenciál pre spôsobovanie korózie. Práve nízka teplota tavenia popola spôsobuje najväčšie problémy pri spaľovaní fytomasy (Cherney 2012).

V popole sa vyskytujú najmä nasledujúce prvky: K - draslík, Ca - vápnik, Na - sodík, Mg - horčík, Si - kremík a P - fosfor. Kremík predstavuje pri trávach najväčšiu zložku popola, pričom sa nachádza v oveľa vyšších koncentráciách v listoch a kvetoch, v porovnaní so stonkou. Tento prvok môže reagovať s alkalickými kovmi za vzniku silikátov, ktoré sa tavia pri nižších teplotách. Najproblematickejším prvkom je však draslík, ktorý sa vo veľkom množstve vyskytuje práve v trávach. Tento prvok znižuje teplotu tavitel'nosti, a tiež výrazne prispieva ku korózii. Prvky ako horčík a vápnik teplotu tavitel'nosti naopak zvyšujú (Cherney 2012).

2 SPÔSOBY ZUŠLACHŤOVANIA FYTOMASY PRE ENERGETICKÉ ÚČELY

Rastlinná biomasa je veľmi flexibilná surovina, a preto uvažujeme o mnohých konverzných technológiách a výrobe rôznorodých nosičov energie. Pri použití jednotlivých technológií je však potrebné zvážiť niekoľko vlastností, ktorými sa fytomasa vyznačuje.

Jedným z najviac limitujúcich faktorov využitia fytomasy pre výrobu elektrickej energie a tepla, je jej nízka energetická hustota, čo má za následok nízku efektivitu a zároveň vysoké náklady spojené s jej prepravou a manipuláciou. Vzdialenosti medzi miestami, kde sa fytomasa pestuje a priemyselnými, resp. obytnými oblasťami, kde je potrebná energia sú často dlhé, čo vyžaduje značnú logistiku pre transport a skladovanie (Tumuluru 2010).

V súčasnosti platí, že moderný energonosič by mal spĺňať radu podmienok, medzi ktoré patrí rovnomerná hustota, vlhkosť, veľkosť frakcie a v neposlednom rade by mal mať i prijateľný tvar (Šooš 2012). Vysoké pohodlie pri nakladaní s palivom a jeho skladovaní, spolu s bezpečnosťou pri jeho spaľovaní sú samozrejmosťou (Horváth 2013).

Medzi moderné spôsoby výroby tuhých ušlachtilých biopalív zaradíme technológie zhutňovania. Najznámejšími z týchto technológií sú práve briketovanie a peletovanie. Výhodou takýchto zhutnených palív je najmä väčšia výhrevnosť na jednotku objemu, v porovnaní s nezhutnenými palivami. Ďalším prínosom je uľahčená manipulácia, ako aj menšie priestory potrebné na skladovanie. Negatívom zhutňovania naopak ostáva podstatné zvýšenie ceny biopaliva. Dôvodom je pomerne vysoká energetická náročnosť lisovacieho procesu. Táto skutočnosť do istej miery robí využívanie zušľachtených biopalív menej atraktívnym (Mancír 2004).

Medzi ušľachtilé produkty z fytomasy zaradíme tiež kvapalné biopalivá ako bioetanol a bionafta. Tieto palivá nachádzajú uplatnenie najmä ako pohonné látky pre motorové vozidlá. Zatiaľ čo bionafta sa vyrába najmä zo semien repky olejnej, bioetanol sa získava alkoholovým kvasením a destiláciou vodného roztoku cukornatých trstín. Menšie množstvo škodlivých látok pri spaľovaní týchto biopalív je v porovnaní s ropnými palivami ich hlavnou devízou (Nigam 2010).

2.1 Tuhé biopalivá - spaľovanie fytomasy

Priame spaľovanie fytomasy, ako jeden z termochemických procesov spracovania, je v dnešnej dobe veľmi rozšírený spôsob jej premeny na energiu. Napriek tomu, že ide o najstarší spôsob využitia tejto suroviny na energetické účely, technológie na spaľovanie biomasy, a teda i fytomasy, boli dlhodobo pozadu v porovnaní s technológiami určenými na spaľovanie fosílnych palív. I keď aj v súčasnej dobe sú vstupné náklady na tieto zariadenia vyššie, vývoj zasiahol aj do tejto oblasti (Pepich 2010).

Miernou nevýhodou spaľovania fytomasy, v porovnaní so spaľovaním fosílnych palív, by sa mohla zdať nadmerná tvorba popola. Tento je však možné následne využiť ako hnojivo, keďže obsahuje množstvo prvkov, ktoré sú pre pôdu prospešné (Pepich 2010).

Palivá pre spaľovanie

Palivom pre priame spaľovanie môže byť fytomasa v neupravenej forme. V prípade najrozšírenejšieho zdroja fytomasy (slamy), môže teda ísť o spaľovanie celých balíkov, čo je populárne najmä v Dánsku, poprípade je možné spaľovať slamu v rozdrúženej forme. Čoraz častejšie je však spaľovanie fytomasy v upravenom, resp. zušľachtenom stave, vo forme už spomínaných peliet a brikiet. Zušľachtením sa v tomto prípade teda myslí najmä zmenšenie objemu fytomasy. Takéto tuhé ušľachtilé biopalivá spĺňajú okrem požiadavky na vysoký komfort aj radu environmentálnych, ekonomických a energetických kritérií (Šooš 2012).

2.1.1 Pelety

Narastajúci dopyt po biomase pre výrobu tepla a elektrickej energie na najväčších trhoch v Kanade, Spojených štátoch, Číne a Európe vyústil do silného globálneho obchodu s peletami. Odhaduje sa, že dopyt po tejto komodite sa od roku 2012 do roku 2020 strojnásobí, z pôvodnej hodnoty 16 miliónov ton, na 46 miliónov ton za rok. Keďže cena drevnej suroviny sa zvyšuje a pri výrobe peliet je jej nedostatok, pelety z fytomasy, tzv. agropelety, majú pre budúcnosť veľký potenciál. Peletizácia má v prípade fytomasy veľké opodstatnenie aj vzhľadom na jej už spomínanú nízku energetickú hustotu a nízky hmotnostný výnos na jednotku plochy (Varnero 2017).

Pelety predstavujú vo všeobecnosti elementy granulovitého typu, kruhového prierezu, s priemerom 6 - 8 mm a dĺžkou 10 - 30 mm (Horváth 2013).

Vyrábané sú lisovaním pri vysokých tlakoch (niekoľko desiatok Mpa) a teplotách, pri ktorých jedna zo zložiek biomasy, konkrétne lignín, plastizuje a vytvára tak pevné spojivo. Tento proces dodáva peletám stály tvar a hustotu, ktorá sa pohybuje v rozmedzí $1000 - 1200 \text{ kg.m}^{-3}$, zatiaľ čo sypná hmotnosť je $550 - 700 \text{ kg.m}^{-3}$, v závislosti od veľkosti peliet (Carroll 2012). Lignín okrem toho, že pôsobí ako spojivo, ešte zabraňuje peletám v dodatočnom prijímaní vlhkosti, čím sa zabezpečí ich bezproblémové skladovanie (Varnero 2017). Materiálom pre výrobu rastlinných peliet, resp. agropeliet môžu byť odpady z poľnohospodárstva, slama a rôzne druhy rastlín.

Prednosťou peliet je okrem iného i pomerne nízka relatívna vlhkosť (do 12 %), čo je dané aj tým, že v prípade vyššej vlhkosti pelety nie je možné vyrobiť. Spolu s vysokou hustotou, ktorá sa dosiahne pri lisovaní, predstavujú teda z hľadiska výdatnosti energie významného konkurenta fosílnym palivám. Rovnako vďaka svojmu charakteru sú vhodné na poloautomatickú alebo plne automatickú prevádzku spaľovacích zariadení. Nevýhodou na druhej strane zostávajú vyššie výrobné náklady z dôvodu energetickej náročnosti výroby (Šooš 2006).

Rastlinné pelety však majú svoje špecifiká. Tie súvisia najmä s obsahom popola, ktorý sa pohybuje okolo 6 - 14 % , čo oproti dreveným peletám je 5 až 10 násobok. Ďalším rozdielom je už spomínaná nižšia teplota topenia popola ($850 - 1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$) , a o niečo vyšší obsah prchavej zložky (Jandačka 2016).

Štandardom, z ktorého sa v prípade nedrevných peliet vychádza, je norma EN ISO 17225-6, ktorá určuje limitné hodnoty v prípade niektorých parametrov (tab. 3).

Tab. 3 Limitné hodnoty pre pelety z nedrevnej biomasy (Miranda 2015)

Vlastnosť	Rastlinná biomasa	Ovocná biomasa	
		A	B
Vlhkosť [%]	≤ 10	≤ 12	≤ 15
Oderuvzdornosť [%]	≥ 97.5	≥ 97.5	≥ 96.0
N [%]	≤ 0.7	≤ 1.5	≤ 2.0
S [%]	≤ 0.10	≤ 0.20	≤ 0.30
Popol [%]	≤ 6.0	≤ 6.0	≤ 10.0
Spodná hranica výhrevnosti [MJ.kg^{-1}]	Nie je určená	≥ 14.5	≥ 14.5

Oderuvzdornosť, sypná hmotnosť a vlhkosť, predstavujú tri hlavné vlastnosti pre vyhodnotenie zhutnených produktov. Aby nedochádzalo k degradácii, vlhkosť peliet v prípade rastlinnej biomasy by nemala prekročiť 10 %. Sypná hmotnosť, ako jeden z hlavných indikátorov kvality, by mala byť vyššia ako 600 kg.m^{-3} . Keďže pelety by mali pri preprave a manipulácii odolávať rôznym vplyvom, ich oderuvzdornosť má byť vyššia ako 97,5 %. Veľmi dôležitý je aj obsah popola, ktorý v prípade agropeliet nemá prekročiť 6 %.

Napriek tomu, že dusík sa dôsledkom použitia veľkého množstva dusíkatých hnojív vyskytuje v agropeletách v omnoho väčšom množstve v porovnaní s drevnými peletami, jeho obsah by nemal prekročiť 0,7 %, aby sa zamedzilo problémom s emisiami. Obsah síry, ako prvku tvoriaceho alkalické soli s koroziívnymi účinkami, nemá byť vyšší ako 0,1 %. Spodná hranica výhrevnosti peliet z rastlinnej biomasy nie je určená (Carroll 2012).

2.1.2 Brikety

Tým, ako sa brikety vyrábajú, druhom použitej suroviny na ich výrobu a svojimi energetickými vlastnosťami sa veľmi podobajú peletám. Hlavným rozdielom je ich tvar a rozmery. Vyrábajú sa zvyčajne v tvare hranolov, šesťhranov, alebo valcov o priemere 40 - 100 mm a dĺžke do 300 mm (Stupavský 2010). Väčšie rozmery predurčujú brikety k použitiu v kotloch s manuálnym prikladaním, pričom tieto rozmery zaručujú podstatne dlhšiu dobu horenia brikety, v porovnaní s dobou horenia pelety. Pre spaľovanie brikiet sú pritom najvhodnejšie splyňovacie kotly na kusové drevo a ďalej ostatné roštové kotly (Jandačka 2016). Dajú sa však použiť aj v kachľových peciach či krboch. Ide o ekologickú náhradu za uhlie a predstavujú alternatívu pre obce, ktoré sú sužované dymom zo spaľovania uhlia v domácich kúreniskách (Stupavský 2010). Odlišnosťou v porovnaní s peletami sú okrem iného aj výrobné a investičné náklady, ktoré hovoria v prospech brikiet.

Podľa materiálu, z ktorého je briketa vyrobená, sa môžeme na trhu stretnúť s briketami zo slamy, energetických plodín a iných druhov energetických rastlín. Brikety zo steblovín sa vyznačujú mernou objemovou hmotnosťou až 1200 kg.m^{-3} . Výhrevnosť sa pohybuje v rozmedzí 16,5 - 17,5 MJ.kg^{-1} , pričom v prípade slamy z olejnatých plodín môže dosahovať až 19 MJ.kg^{-1} (Malat'ák 2008).

3 ADITÍVA A MATERIÁLY NA SPOLUSPAĽOVANIE S FYTOMASOU

Spaľovanie bolo dlhodobo bežným termochemickým procesom spracovania fytomasy. V súčasnosti, kvôli narastajúcemu povedomiu o emisiách skleníkových plynov a úbytku fosílnych palív sa predpokladá, že fytomasa ako súčasť biomasy bude veľmi dôležitým prvkom pri dosahovaní európskych klimatických a energetických cieľov 20-20-20 (Horvat 2018).

Spaľovanie fytomasy má teda obrovský potenciál z hľadiska trvalo udržateľnej výroby elektrickej energie a tepla. Jej nevýhodou, v porovnaní s dendromasou, je pomerne vysoký obsah draslíka, dusíka, síry, kremíka a ďalších prvkov tvoriacich popol. Vyšší obsah týchto prvkov vedie vo všeobecnosti k zvýšeným emisiám plynov a tuhých častíc, a taktiež prevádzkovým problémom, ktoré súvisia so správaním popola počas spaľovania (Fournel 2015). Problematická je už spomínaná nízka teplota tavenia popola, ktorá spôsobuje vážne ťažkosti pri prevádzke horákov. To zahŕňa hromadenie a zanášanie troskou a v niektorých prípadoch aj koróziu povrchov tepelných výmenníkov. Tieto problémy okrem iného znižujú účinnosť systémov spaľovania, spôsobujú dodatočné náklady na čistenie a údržbu kotlov a v niektorých prípadoch dokonca bránia využitiu niektorých druhov fytomasy pre účely spaľovania (Wang 2012). Použitie aditív a miešanie fytomasy s iným druhom paliva sa ukázalo byť účinným riešením spomínaných ťažkostí.

3.1 Aditíva pridávané do fytomasy

Aditíva sa vzťahujú na skupinu chemikálií alebo minerálov, ktoré môžu zmeniť vlastnosti popola spaľovanej suroviny. V našom prípade to znamená znížiť koncentráciu problematických zlúčenín a zvýšiť teplotu tavenia popola v procesoch spaľovania fytomasy (Wang 2012).

Aditíva sa miešajú buď s hotovým palivom, alebo sa pridávajú do nespracovanej suroviny na výrobu peliet. V prípade peliet sa aditíva pridávajú tiež za účelom zlepšenia ich mechanických vlastností, teda za účelom zvýšenia ich pevnosti, hustoty, priepustnosti pri peletizácii, a tiež odolnosti voči vonkajšej vlhkosti (Boman 2012).

Jen nutné poznamenať, že normy ako nemecká DIN plus, či rakúska Ö-Norm M7135 obmedzujú množstvo aditív, ktoré sa pridávajú do drevnej biomasy pri procese výroby peliet

hranicou 2 % (Jandačka 2011a). V prípade peliet z fytohmoty norma zatiaľ nedefinuje maximálne množstvo pridávaných aditív (Boman 2012).

Na základe chemicky reaktívnych zlúčenín rozlišujeme štyri hlavné kategórie aditív (Boman 2012) :

- Aditíva na báze kremičitanov hliníka
- Aditíva na báze síry
- Aditíva na báze vápnika
- Aditíva na báze fosforu

3.1.1 Aditíva na báze kremičitanov hliníka

Aditíva na báze kremičitanov hliníka, akým je napríklad kaolín, ukázali schopnosť znížiť emisie škodlivých častíc a spekanie popola počas spaľovania poľnohospodárskych plodín a zvyškov. Toto aditívum má schopnosť viazať alkalické zlúčeniny v popole, čím dochádza k vytvoreniu zlúčenín ako K-Al alebo Na-Al, ktoré majú vyššiu teplotu taveniu ako čisté sodíkaté či draselné kremičitany (Fournel 2015).

Za miernu nevýhodu použitia kaolinitu (hlavná zložka kaolínu) ako aditíva, sa považuje jeho malý špecifický povrch ($5 - 10 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$). Náhradou môže byť halloyzit, ktorý sa tiež zaraďuje k skupine kaolinitických minerálov. Jeho vysoký špecifický povrch, ($75 - 80 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) ako aj vysoká tepelná odolnosť vychádza z nanotrubicovej štruktúry. Prínosom halloyzitu ako aditíva je okrem iného i schopnosť potlačiť tvorbu mykotoxínov v peletách, čo je dôležité z hľadiska ich skladovania a prepravy (Mroczek 2011).

Ďalšími aditívami na báze kremičitanov hliníka sú látky ako zeolit a bentonit. Účinnosť týchto aditív je však nižšia ako v prípade kaolínu. Veľmi zaujímavým sa javí aj splaškový kal, ktorý obsahuje rôzne kremičitany hliníka, oxid kremičitý a oxid hlinitý, ktoré majú schopnosť zvýšiť teplotu tavenia popola a redukovať množstvo znečisťujúcich usadenín. Vďaka týmto vlastnostiam sa splaškový kal klasifikuje ako aditívum na báze kremičitanov hliníka (Wang 2012).

3.1.2 Aditíva na báze síry

Aditíva na tejto báze sa často používajú vo väčších elektrárňach a teplárňach so zameraním na zníženie, resp. redukcii korozívnych usadenín (Boman 2012). Obvykle sa pridávajú v podobe roztoku, keďže vo vode rozpustné sírany sa rozkladajú v širokej škále teplôt (Wang 2012). Tieto aditíva znižujú tvorbu chloridov alkalických kovov cez rôzne

reakcie, rovnako tiež zvyšujú teplotu tavenia nánosov, čím zabraňujú znečisteniu teplovýmenných plôch (Fournel 2015).

Príkladom takéhoto aditíva môže byť síran amónny, tiež používaný ako hnojivo, ktorý pri použití výrazne redukuje plynný KCl, pričom dochádza k tvorbe sírnatých usadenín bez prítomnosti chlóru. Po jeho pridaní boli však zaznamenané vyššie koncentrácie oxidov síry a chlorovodíka v spaliniach, zatiaľ čo emisie oxidov dusíka rapídne klesli (Fournel 2015).

Ďalšími používanými aditívami na báze síry môžu byť síran hlinitý a síran železitý. Vo všeobecnosti platí, že tieto sírany sú z hľadiska ich účinkov omnoho efektívnejšie ako prídanie elementárnej síry (Hao 2013).

3.1.3 Aditíva na báze vápnika

Tieto aditíva, ktorými sú napríklad vápno alebo vápenec sa používajú pre ich schopnosť reagovať s chlorovodíkom a oxidmi síry. Sú efektívne pri redukcii vzniku trosky v spaľovacích systémoch tvorbou silikátov s vysokou teplotou tavenia vytvorených najmä z vápnika a horčíka. Spaľovanie fytomasy s použitím aditív na báze vápnika vytvára zriedňovací účinok na popol, čím sa znižuje fyzický kontakt medzi časticami, a tým pádom aj spekanie týchto častíc (Fournel 2015).

Aditíva na báze vápnika sú pritom omnoho účinnejšie pri redukcii spekania popola a tvorby zhlukov v spodnom popole (Wang 2012).

3.1.4 Aditíva na báze fosforu

V prípade slabo preskúmaných aditív na báze fosforu platí, že fosfor je riadiacim prvkom v reakciách transformácie popola počas spaľovania fytomasy vo fluidných kremenných vrstvách, vďaka vysokej stabilite fosfátových zlúčenín (Boman 2012). Pre palivá obsahujúce vysoký podiel kremíka a draslíka, akým je napríklad pšeničná slama, bola testovaná kyselina fosforečná, ako aditívum na redukcii spekania a usadzovania popola v reaktore s fluidným lôžkom. S pribúdajúcim množstvom fosforu v popole s ním môže draslík reagovať za vzniku fosfátov, ktoré ďalej reagujú s oxidom vápenatým (Wang 2012).

V posledných desaťročiach bolo vykonaných mnoho štúdií potenciálnych aditív, ktoré by vyriešili problémy súvisiace so spaľovaním fytomasy. Prehľad najpoužívanejších aditív aj s predpokladanými účinkami je znázornený v tab. 4.

Tab. 4 Prehľad používaných aditív (Wang 2012)

Predpokladané účinky	Aditíva
Zachytenie problematických častí popola prostredníctvom chemickej adsorpcie a interakcie	kaolín, halloyzit ílovité minerály, ílový kal, illit detergentné zeolity síran amónny, síran železnatý, síran hlinitý, fosforečnan amónny vápenec, vápno, mramorový kal odpadový kal, papierenský kal, rašelinový popol, uhoľný popol dolomit, oxid titánu, kremeň, bauxit kaolín, halloyzit, zeolit
Fyzikálna adsorpcia problematických častí popola	ílovité minerály splasťkový kal, ílovitý kal, papierenský kal dolomit, kalcinovaný dolomit, vápno, vápenec hydroxit hlinitý, bauxit
Zriedňujúci účinok a obohatenie inertnými prvkami	bauxit, vápenec, vápno
Potlačujúci a práškový účinok	oxid kremíka, mramorový kal vápenec, vápno

3.2 Materiály vhodné na spoluspaľovanie s fytomasou

Hoci pridávanie aditív do určitej miery rieši problémy s popolom vznikajúcim pri spaľovaní fytomasy, výber vhodných aditív z hľadiska dosiahnutia čo najlepšej účinnosti pri zachovaní nízkych nákladov je stále výzvou (Shao 2012). Alternatívnym riešením je preto spoluspaľovanie fytomasy s iným, „čistejším“ druhom paliva. Vhodným, „čistejším“ palivom môže byť rašelina alebo uhlie, ktoré obsahujú veľké množstvo inertných látok vo svojom popole, akými sú oxid hlinitý alebo oxid kremičitý (Theis 2006). Ďalšou možnosťou je spoluspaľovanie fytomasy s iným druhom biomasy.

Elektrárnami je spoluspaľovanie vo všeobecnosti považované za cenovo najefektívnejší spôsob využitia fytomasy pre energetické účely. Technológia spoluspaľovania našla preto široké uplatnenie v USA a mnohých európskych krajinách

práve kvôli možnosti redukcie problémov so správaním popola pri spaľovaní a zníženíu emisií skleníkových plynov (Agbor 2015).

3.2.1 Spoluspaľovanie fytomasy a rašeliny

Rašelina, ktorá sa v značnej miere využíva ako palivo najmä v škandinávskych krajinách ukázala, že má pozitívny vplyv na problémy súvisiace s popolom pri jej spoluspaľovaní s palivami bohatými na popol, teda aj s fytomasou. Tieto účinky zahŕňajú zníženú tvorbu zhlukov, korózie a zníženú tvorbu jemných častíc (Fagerström 2010).

Dôvodom pozitívnych účinkov spoluspaľovania fytomasy s rašelinou je pomerne vysoký obsah prvkov ako je kremík, vápnik, síra a hliník, zatiaľ čo množstvo chlóru a alkálií je v rašeline nízke (Fagerström 2010). Predpokladaným dôvodom zníženia tvorby trosky je pritom reakcia Al (v rašeline) s K za tvorby K-Al kremičitanov, ktorých teplota tavenia je vyššia ako u K kremičitanov (Näzelius 2016).

Fagerström a kol. (2010) vo svojej štúdii skúmali vplyv troch vzoriek rašeliny na potenciálne zníženie emisií tuhých častíc a tvorby zhlukov pri spaľovaní peliet zo slamy v 15 kW roštovom kotli. Podiel rašeliny v peletách predstavoval 40 %. Pri spaľovaní týchto peliet došlo k zníženiu emisií tuhých častíc o 45 %, v porovnaní so spaľovaním čistých peliet zo slamy. Výsledky tiež ukázali zníženú tvorbu trosky v prípade všetkých prímiesí, čo bol jednoducho dôsledok zriedeného obsahu K v slame. Štúdia avšak upozorňuje na rôznorodé chemické zloženie rašeliny v závislosti od rašeliniska. Činitele, ako stupeň rozkladu okolitej pôdy, organickej hmoty a podložia, spôsobujú veľké výkyvy v anorganických zložkách. Preto sa očakáva, že niektoré typy rašeliny sú vhodnejšie na spoluspaľovanie ako iné.

3.2.2 Spoluspaľovanie fytomasy a uhlia

Spoločné spaľovanie fytomasy a takmer všetkých typov uhlia (lignit, hnedé uhlie, čierne uhlie) bolo úspešne otestované skoro vo všetkých typoch kotlov na uhlie a predstavuje udržateľné, nízko rizikové a nízko nákladové riešenie, ktorým sa dosiahne zníženie emisií CO₂, NO_x a SO_x (Baxter 2005). Ďalším prínosom spoločného spaľovania uhlia a fytomasy je väčšia účinnosť a dostupnosť zariadení na spaľovanie uhlia, oproti tým na biomasu. Čistá účinnosť premeny v biomasových elektrárnach totiž dosahuje 16 - 20 %, čo je polovica v porovnaní s účinnosťou 35 - 40 % v prípade uhoľných elektrární (Robinson 1998).

Tím Larsa Pedersena (1996) vykonal štúdiu, v ktorej uskutočnil merania na 250 MW_e jednotke na práškové uhlie s použitím 10 - 20 % slamy. Cieľom bolo preskúmať vplyv na stabilitu plameňa, emisie a tvorbu trosky. Slama vo forme peliet bola spoluspaľovaná

s vysoko sírnatým kanadským čiernym uhlím s výhrevnosťou $29,2 \text{ MJ.kg}^{-1}$. Výsledky boli viac než uspokojivé. Počas prevádzky nedošlo k žiadnym problémom so stabilitou plameňa. Ako sa predpokladalo, s rastúcim množstvom slamy dochádzalo tiež k znižovaniu emisií SO_2 a NO_x . Emisie SO_2 klesli čiastočne v dôsledku nižšieho obsahu síry v palive na MJ, ale tiež kvôli väčšiemu zadržiavaniu síry v popole. Emisie NO_x na druhej strane klesli len v dôsledku nižšej konverzie dusíkatej zložky paliva. Počas prevádzky nebol pozorovaný žiadny významný nárast v spekaní popola a tvorbe trosky, aj keď zvýšený podiel slamy v palive sa prejavil zvýšeným obsahom draslíka.

Na svete existuje veľké množstvo prevádzok fungujúcich na technológii spoluspaľovania uhlia a slamy. V Tab. 5 je znázornený súhrn efektívností a emisií (so zameraním na CO_2) niektorých prevádzok, ktoré fungujú na technológii spoluspaľovania v porovnaní s prevádzkami, ktoré by spaľovali len čisté uhlie.

Tab. 5 Porovnanie prevádzok pracujúcich s technológiou spoluspaľovania a bez nej (McIlveen-Wright 2007)

Prevádzka	Technológia, palivo	Účinnosť [%]	Čistý CO_2 [g. kWh ⁻¹]
P1	600 MWe elektrárň na práškové uhlie, 100 % uhlie	44	759
P2	600 MWe elektrárň na práškové uhlie 80 % uhlie, 20 % slama	43,8	610
P3	250 MWe elektrárň s cirkulujúcim fluidným lôžkom 100 % uhlie	39	841
P4	250 MWe elektrárň s cirkulujúcim fluidným lôžkom 80 % uhlie, 20 % slama	38,7	678

3.2.3 Spoluspaľovanie fytomasy a zemného plynu

Spoločné spaľovanie fytomasy (najmä slamy) a uhlia bolo dlhú dobu predmetom štúdií, no vzhľadom na potrebu obmedziť emisie skleníkových plynov sa stále viac zariadení na spaľovanie uhlia konvertuje na zemný plyn. Postupne sa teda začalo uvažovať aj nad

spoluspaľovaním zemného plynu a slamy. Veľkou výhodou spoločného spaľovania týchto palív je skutočnosť, že vzniknutý popol je tvorený výlučne popolom zo slamy a je ho preto možné následne využiť ako hnojivo na poliach (Overgaard 2005).

V roku 2001 spoločnosť Elsam v Dánsku premenila jednotku elektrárne Fynsværket, ktorá spaľovala zemný plyn, s výkonom 266 MWe, na jednotku pre spoločné spaľovanie slamy a zemného plynu. Premena zahŕňala zariadenie na predspracovanie slamy s kapacitou 5 t.h^{-1} , čo zodpovedalo 3 % celkového množstva vyrobenej energie pri plnom zaťažení. Cieľom tohto výskumu bolo overiť, či spoluspaľovanie slamy a zemného plynu je životaschopné v porovnaní s inými konceptami využitia slamy na výrobu elektrickej energie. Zistilo sa, že spoločné spaľovanie slamy a zemného plynu nie je najúčinnším spôsobom využitia slamy pre výrobu elektriny. Veľká časť popola je totiž unášaná nahor, oproti spaľovaniu na rošte. Tomuto popolu sú následne vystavené najmä prehrievače. Výstupná teplota pece je obvykle vyššia v jednotkách spaľujúcich zemný plyn, a tým sa popol stáva viac lepivým. Pri spoločnom spaľovaní uhlia a slamy sú tieto problémy eliminované, keďže popol z uhlia obsahujúci Al a Si pôsobí ako prirodzené aditívum. Riešením by sa teda mohlo zdať pridanie popolčeka z uhlia ako aditíva, čo by na druhej strane znemožnilo využitie popola ako hnojiva, a preto to nie je z komerčného hľadiska výhodné. Alternatívou je preto pridávanie kremeňa ako aditíva, pričom vzniknutý popolček je možné stále využiť ako hnojivo (Overgaard 2005).

Ďalším spôsobom spoluspaľovania v prípade zemného plynu a slamy, je použitie technológie nepriameho spaľovania, kedy sa surovina (slama) najprv splyňuje a následne spaľuje spolu so zemným plynom v plynovej turbíne. Týmto spôsobom je možné nahradiť až 40 % základného paliva (zemného plynu). Táto technológia je však v súčasnosti málo používaná kvôli vysokým nákladom spojeným s procesom splyňovania. Na svete však existuje niekoľko prevádzok, najpozoruhodnejšou sa javí prevádzka Lahti vo Fínsku. Tu sa rôzne druhy biomasy, vrátane fytomasy splyňujú v splyňovačoch s fluidným lôžkom a následne sa spoločne spaľujú so zemným plynom v plynovej turbíne (Agbor 2015).

3.2.4 Spoluspaľovanie fytomasy a dendromasy

Spaľovanie fytomasy s dendromasou môže taktiež viesť k zlepšenému správaniu pri spaľovaní. Miešanie poľnohospodárskej biomasy a drevnej biomasy je vo všeobecnosti tiež považované za jednu z alternatívnych možností ako vyhovieť stále rastúcemu dopytu po drevných peletách (Harun 2015).

Harun a Afzal (2015) uskutočnili štúdiu, ktorej účelom bolo porovnať spaľovacie vlastnosti poľnohospodárskej (chraстnica, timotejka, proso) a drevnej (smrek, borovica) biomasy, ako aj ich zmesi. V prípade zmesi bol zvolený pomer 1:1. Hlavným prínosom spoluspaľovania drevnej a poľnohospodárskej biomasy bolo zníženie obsahu popola o 62 % oproti spaľovaniu samostatných poľnohospodárskych zvyškov. Zmiešanie taktiež viedlo k zníženiu obsahu síry a chlóru, ktoré boli v súlade s európskou normou pre pelety. K určitému zlepšeniu došlo aj v množstve uvoľneného tepla, pričom hodnoty sa pohybovali od 7 až do 10 kJ.kg⁻¹. K tomuto zlepšeniu mohli prispieť viaceré faktory, ako zvýšený obsah uhlíka, vodíka a lignínu z drevnej biomasy.

Treba však poznamenať, že nie všetky druhy dendromasy sú vhodné na spoluspaľovanie s fytomasou. Holubčík a Jandačka (2014) vykonali štúdiu, v ktorej spoluspaľovali menej kvalitné drevné pelety (z rozličných druhov dendromasy) s alternatívnymi peletami zo sena. U drevných peliet prevažovalo smrekové drevo s obsahom kôry. Spaľovací proces pritom prebiehal v pomere od 20 % / 80 % až po 80 % / 20 % (alternatívne / drevné pelety), kedy už spaľovanie neprebiehало súvisle kvôli nadmernej tvorbe spekancov. Zvyšujúce sa množstvo alternatívnych peliet v zmesi tiež nepriaznivo vplývalo na tepelný výkon kotla a plynné emisie. Záverom bolo konštatovanie, že spoluspaľovanie v danej podobe nerieši problémy spaľovania palív na báze fytomasy.

3.2.5 Využitie papierenského kalu ako aditíva

Papierenský priemysel vyprodukuje v Európe viac ako jedenásť miliónov ton odpadu ročne. Z tejto hodnoty až 70% pochádza zo spracovania recyklovaného papiera. Spracovanie novej (nepoužitej) dreveniny produkuje menej odpadu, no treba podotknúť, že odpad má rovnaké vlastnosti ako má odpad z recyklovaného papiera. Zloženie odpadov je rôznorodé a skladá sa z viacerých zložiek, napr. nepodarky, popol, kaly a nesmieme zabudnúť na odpadovú vodu.

Prevádzkovanie skládok s papierenským kalom je finančne náročné. Hromadenie napohľad nevyužiteľného odpadu je trvalo neudržateľné. Samotná aplikácia využitia na daný proces závisí od fyzikálno – chemických vlastností kalu.

Vzhľadom na veľké množstvo tvorenia kalov a jeho následné nízke využitie je potrebné sa nad týmto problémom zamyslieť a hľadať alternatívne efektívne riešenia.

Niektoré súčasné možnosti spracovania (použitia) kalov sú pyrolýza, splyňovanie, kompostovanie, ako prímies do stavebných materiálov, alebo priamo pri stavebných prácach (ako zásyp) a pod.

Medzi najlacnejšie a najjednoduchšie spôsoby spracovania papierenského kalu patrí kompostovanie a zapracovanie priamo do pôdy. Kompostovanie spočíva v ponechaní papierenského kalu na určitom vyhradenom mieste, až kým sa jednotlivé vlákna nerozpadnú a stabilizujú (chemicky aj pachovo) pôsobením mikroorganizmov. Niekedy sa pridávajú ďalšie hnojivá a prísady kvôli zvýšeniu efektu rozkladu. Táto kompostová zmes je používaná aj ako médium pre pestovanie v skleníkoch. Kompostovanie je však dlhodobý proces a vzhľadom na obrovské množstvá kalu vyprodukovaného v papierenskom priemysle, vyžaduje pomerne veľký záber voľnej plochy. (Likon, 2012a)

Papierenský kal sa využíva aj v energetike, a to pre tepelné procesy. Ide o spaľovanie s využitím energie na výrobu tepla.

V práci (Šooš a kol. 2016) sa zaoberali zhodnocovaním papierenských kalov na energetické využitie. Základné podmienky spaľovania papierenských kalov z recyklovaného papiera sú minimálna výhrevnosť paliva 7000 kJ.kg^{-1} , obsah popola má byť menší ako 60%, obsah vody v odpade má byť menší ako 50% a obsah horľavých látok má byť menší ako 25%. Pre zvýšenie výhrevnosti bola využitá technológia briketovania a peletovania. Relatívna vlhkosť mokrého kalu bola 36,15%, výlisky nadobúdali vyššiu pevnosť a súdržnosť. Hustota brikiet po vylisovaní bola 1391 kg.m^{-3} pri vlhkosti 36,15%. Po vysušení na vlhkosť 3,44% sa znížila hustota brikiet na 1142 kg.m^{-3} . Meraním vlastností zistili, že samotný kal nemá schopnosti pre samostatné horenie. Ako výhodné sa ukázalo vytvorenie zmesi kalu a slamy v určitých pomeroch. Z výsledkov vyplýva, že až do pomeru papierenský kal/slama = 30/70 sa teploty deformácie výrazne nelíšia. Bod topenia popola bol stanovený na cca 1500°C , kedy dochádzalo k zmršteniu testovaných ihlanov na $\frac{1}{2}$ pôvodného objemu. Zistilo sa, že úprava papierenského kalu na pelety alebo briкеты je ekonomicky aj energeticky neefektívna, pretože vylisované palivo ani po vysušení na potrebnú vlhkosť nie je schopné samostatne horieť. Skúšky ukázali, že pridávanie papierenského kalu ako aditíva do slamy má výhody z hľadiska spaľovacieho procesu. Výrazné zvýšenie hodnôt spaľovania nastalo pri pomere 30 % papierenského kalu a 70 % slamy, kde z pôvodných hodnôt čistej slamy (DT – 877, ST – 1170, HT – 1126, FT - 1200) na hodnoty zmiešaných palív (DT – 948, ST > 1500, HT > 1500, FT > 1500).

Tab. 6 Tavitelnosť popola zmesi slamy a kalu

Pomer kal/slama	Teplota deformácie	Teplota guľovitého tvaru - mäknutie	Teplota polgulovitého tvaru - tavenie	Teplota tečenia - tečenie
100 % kal	958	od 1200 °C zmrštenie cca na 1/2 výšky ihlana		
90/10	954	> 1500 °C		
80/20	958	> 1500 °C		
70/30	944	> 1500 °C		
60/40	946	od 1200 °C zmrštenie cca na 1/2 výšky ihlana		
50/50	950	od 1200 °C zmrštenie cca na 1/2 výšky ihlana		
40/60	948	> 1500 °C		
30/70	938	1488	1531	1536
20/80	929	1468	1472	1494
10/90	918	1256	1267	1358
100% slama	877	1170	1126	1200

V Číne bolo skúmané spaľovanie zmesi papierenského kalu a ryžovej slamy. Skúmané boli osobitne papierenský kal, ryžová slama, ale aj rôzne pomery zmesi kalu a slamy od 10 po 95% slamy. Mokrá, „surový“ papierenský kal bol získaný z odvodňovacej časti papierne, následne bol ponechaný sedem dní, aby prirodzene znížil vlhkosť (odvodnil sa). Po prirodzenom odvodnení boli kal a ryžová slama 7 hodín sušené pri teplote 105°C. Obe vzorky boli drvené a preosiate, aby bolo zabezpečené, že vzorky budú mať veľkosť maximálne 178µm. Zmes sa neupravovala, tzn. neboli robené pelety ani brikety a pod. (Zeqiong, 2013a)

Zistilo sa, že papierenský kal a ryžová slama sa pri vysokých teplotách spaľovania správajú veľmi podobne. S rozdielom, že slama má nižší obsah popola, dusíka a síry. Tiež bolo zistené, že kal obsahuje väčšie množstvo nehorľavých látok, a preto ostáva viac popola ako pri spaľovaní ryžovej slamy. Získané boli teploty zapálenia a teploty úplného spálenia jednotlivých vzoriek ale aj zmesí. Výsledky preukázali fakt, že teplota zapálenia papierenského kalu je vyššia oproti slame. (Zeqiong, 2013a)

Dodaním ryžovej slamy do zmesi sa znížili teploty zapálenia, no zároveň sa zvýšil index horľavosti S_i a parameter maximálnej straty hmoty DTG_{max} . Všeobecne možno povedať, že spaľovaním zmesi a nie samotných vzoriek sa zlepšil tepelný rozklad zmesi pri vysokých teplotách, čo bolo aj predpokladané. Najefektívnejšie výsledky dosiahli pri pomere 80% slamy a 20% kalu. (Zeqiong, 2013a)

Ďalší výskum bol venovaný správaniu sa antracitového uhlia, papierenského kalu a ich zmesiam. Papierenský kal bol získaný z papierne v Guangzhou v Číne, ktorá pri plnom výkone denne vyprodukuje 120t papierenského kalu. Tak ako v predošlom prípade,

vzhľadom na vysokú vlhkosť cca 70-80%, bola vzorka kalu sušená pri teplote 89,95°C po dobu 5 hodín. Následne bola vzorka kalu drvená a preosiata kvôli dosiahnutiu veľkosti častíc maximálne 250μm. Boli vytvorené 3 zmesi s obsahom 10%, 20% a 50% papierenského kalu. (Liao, 2010)

Takisto bolo skúmané použitie odpadov na báze papiera na biomasu. Bolo zistené, že najväčší energetický potenciál majú odpady obsahujúce papierový základ. Hodnoty sa tu pohybovali v rozmedzí 14,2 až 17,5 MJ.kg⁻¹. V tomto význame sú ale odpady myslené v ponímaní ako papierenský odpad (zber). Pri analyzovaní papierenských kalov boli dosiahnuté hodnoty v rozmedzí 5,7 až 7,5 MJ.kg⁻¹. Nízky energetický obsah je zapríčinený vysokým podielom nehorľavých zložiek. (Geffert, 2011a)

Vo všeobecnosti bolo zistené, že papierenské kaly mali aj po vysušení pomerne nízku energetickú hodnotu. Je však nutné podotknúť, že analyzovaný bol čistý kal z neuvedeného priemyselného zdroja.

Pre potreby nášho výskumu nám firma Metsä Tissue Slovakia s.r.o. poskytla vzorku svojho papierenského kalu. V súčasnosti je firma svetovým producentom výrobkov z dreva. Vyrábajú papierenské výrobky používané každodenne v domácnostiach a drevné komponenty používané v priemysle a stavebníctve. Na Slovensku je výroba zameraná predovšetkým na výrobu papierenských výrobkov. Firma vyrába výrobky buď z čistej celulózy alebo z recyklovaného papiera. Kal, ktorý bol poskytnutý bol z výroby recyklovaného papiera, a teda obsahoval recyklovaný papier ale aj celulózu.

3.3 Problémy pri spaľovaní fytomasy

Každý typ biomasy má svoje špecifické energetické vlastnosti, ktoré sa navzájom značne líšia. Fytomasové pelety nemožno považovať za palivo s presne definovanými a homogénnymi vlastnosťami, pretože chemické zloženie rôznych typov biomasy je veľmi odlišné. Chemické zloženie závisí hlavne od druhu biomasy a spôsobu rastu. Spaľovanie fytomasy v malom peletovom kotle spôsobuje veľa problémov. Nevýhody slamy, obilia a trávy sú vyššie množstvá popola a tvoria agresívne zlúčeniny počas spaľovania. Najväčšími nedostatkami sú však trosky, spekanie a tavenie popola pri výrazne nižších teplotách ako drevné pelety (Lábaj a kol. 2010).

Najdôležitejšou otázkou v tomto probléme je teplota deformácie popola, tj. kedy sa popol začne lepiť a prilepiť sa na časti a steny kotla. Po deformačnej teplote popola sa popol

premení na trosku, spekance a iné aglomeráty. Kumulovaný popol a aglomeráty, ktoré sú vytvorené v peci, obmedzujú proces spaľovania paliva. Znamená to, že spaľovanie je narušené, ba dokonca môže nastať jeho zastavenie. Nemôžeme tiež ignorovať oveľa vyššie emisie zo spaľovania fytomasy obsahujúce aj nežiaduce zlúčeniny v porovnaní s drevnými peletami (Van Loo 2008).

Čistá výhrevnosť fytomasy je len o málo menšia ako drevo, ale obsah popola asi desaťnásobne vyšší. Fytomasa obsahuje oveľa viac K, N, Cl v porovnaní s čistým drevom. Tieto prvky spôsobujú nielen viac nežiaducich emisií, ale tiež znižujú teplotu topenia popola a podieľajú sa na korózii na stenách kotlov (Van Loo 2008, Obernberger et al. 2006).

Teplota topenia popola je len informačný palivový atribút. Na druhej strane teplota topenia popola je zaradená medzi najdôležitejšie údaje o konštrukcii a prevádzke kotla na fytomasu. Nie je povolené spaľovať pelety s popolom s nízkou teplotou topenia v bežných peletových kotloch, pretože sa v spaľovacom priestore už po krátkom čase začínajú vytvárať aglomeráty, spekance alebo troska. Tieto aglomeráty zabraňujú privádzaniu spaľovacieho vzduchu do základnej horiacej vrstvy, takže spaľovací proces môže byť obmedzený. Nakoniec tieto aglomeráty môžu zamedziť podávanie paliva alebo až zastaviť spaľovanie. Časť častíc popola sa prenáša spalinami a vytvára usadeniny na stenách kotla (Chabadová 2014).

Z energetického hľadiska, hlavne chemické zloženie sena a slamy sa vo veľkej miere líši od dendromasy. Z tohto dôvodu je aj spaľovanie v malých zdrojoch tepla podmienené určitými konštrukčnými úpravami na spaľovacom zariadení. Vstupné náklady na spracovanie a zhutňovanie fytomasy (seno, slama) sú jednou z výhod oproti dendromase (Koloničný 2011).

Fytomasa (slama) je definovaná svojimi vlastnosťami: výhrevnosť cca (14-15 MJ/kg), teplota horenia (°C), teplota tavenia popola (°C), vlhkosť (%), objemová hmotnosť (m³/t) a energetický potenciál (GJ). Jednou s najdôležitejších vlastností slamy je, že popol, ktorý je tvorený ľahko tavitelnými minerálmi ako sú uhličitan draselný, uhličitan vápenatý a oxid kremičitý, začína mäknúť už pri teplotách cca 830 °C. V okolí teplôt 850 °C až 900 °C sa vytvára sklovitá hmota, ktorá znehodnocuje výmurovku horeníska a je ťažko odstrániteľná. Teplota tavenia popola je špecifikovaná, bodom mäknutia popola cca 930 °C, teplota topenia popola cca 970 °C a teplota tečenia popola cca 1070 °C (Jandačka 2016 b).

Výhrevnosť slamy nie je konštantná, závisí od viacerých vlastností ako sú: výsledná vlhkosť, ktorá je tiež ovplyvnená fázou zberu slamy, druhu a akosti slamy. Seno a obilná slama sú si z hľadiska energetických parametrov veľmi podobné, čo je výhodou pri

spracovaní a spaľovaní týchto materiálov. V dnešnej dobe sa na energetické účely využíva vo vyššej miere obilná slama oproti senu a to hlavne z dôvodu vyššej dostupnosti na Slovensku. Výhodou fytomasy spracováanej na energetické účely oproti dendromase je jednoduchšie zhutňovanie, napríklad v peletovacej linke, čo sa pozitívne odrazí aj na nákladoch (Jandačka 2016 a).

Vysoký obsah chlóru vo fytomasovom palive pri prechode spalinami s nízkou teplotou spôsobuje koróziu konštrukčných častí kotla a je potrebné na spaľovanie použiť upravené spaľovacie zariadenie. Najväčším technologickým problémom rastlinnej biomasy (slamy, sena) v porovnaní s drevnou biomasou je nízka teplota tavitelnosti popola a obsah popola, čo má pri nedokonalnej regulácii spaľovania za následok tvorbu zlepeného popola na ploche výmenníka, a následné zníženie výkonu kotla (Kraszkievicz 2015).

Spaľovanie fytomasy musí byť udržiavané pri predpísaných teplotách, niekedy býva plášť kotla chladený vodou. Popol obsahuje alkalické kovy, kovy alkalických zemín, kremík a vysoké percento síry. Spaľovanie fytomasy si vyžaduje častejšie a finančne náročnejšie opravy spaľovacích zariadení, ako sú dopravníky popola a výmurovka kotla. V súčasnej dobe je už technológia spaľovania fytomasy posunutá na takú úroveň, že zariadenia určené na spaľovanie tohto druhu paliva eliminujú nedostatky za súčasného dodržania predpísaných emisných limitov (Ondruška a kol. 2012).

Tomuto problému sa dá tiež predísť dvojstupňovým horením, pri ktorom sa v prvom stupni slama splyňuje a v druhom prehorievajú spalné plyny pri vyššej teplote, miešané so sekundárnym vzduchom bez vplyvu na popol. Názor väčšiny odborníkov je, že pri ročnej spotrebe 30% slamy použitej na energetické účely sa úrodnosť pôdy neznižuje (Jandačka 2016 b).

3.3.1 Opatrenia na redukcii problémov pri spaľovaní fytomasy

Hlavným rozdielom medzi fytomasou a dendromasou sú nepriaznivé vlastnosti pri spaľovaní fytomasy (obilná slama, seno). Tieto poľnohospodárske palivá majú nízky bod tavenia, tečenia, mäknutia popola a zvýšený obsah popolovín (cca 5%) a vysokú produkciu škodlivín ako sú emisie CO. Možnosť ako tieto nevýhody, resp. nežiadúce vlastnosti odstrániť prípadne redukovat' je viac. Jednou z možností je z energetických plodín alebo iných komponentov vytvoriť zmes v určitom pomere. Ďalšia možnosť spočíva v úprave spaľovacieho zariadenia, napr. použitie iného typu horáka, úprava spaľovacieho priestoru, jeho veľkosti a tvaru, prípadné rôznymi opatreniami na odstraňovanie nadmerného množstva popola, alebo zlepšenie riadiaceho a regulačného systému. Zlepšenie vlastností

fytomasových palív je možné dosiahnuť aj pridávaním rôznych prísad (aditív) do fytomasy (Pastorek 2004).

Problémom spaľovania palív s nízkou teplotou tavitelnosti popola (fytomasy), fytomasových palív je teda zvýšené množstvo tvorby popola a pre redukciu týchto problémov je možné použiť tieto tri možnosti:

- 1) spaľovanie fytomasy s iným palivom, resp. miešanie v určitom pomere s palivom, ktoré nedisponuje týmito nepriaznivými vlastnosťami,
- 2) pridávanie rôznych prísad (aditív) do problémovej fytomasy,
- 3) použitie spaľovacích zariadení určených špeciálne na spaľovanie problémovej fytomasy, resp. úprava už existujúcich spaľovacích zariadení.

4 ANALÝZA A VYHODNOTENIE VLASTNOSTÍ PELIET Z FYTOMASY

V nasledujúcich kapitolách sa práca zameriava na analýzu a vyhodnotenie niektorých vlastností nami vyprodukovaných peliet z fytomasy. Stručne sa venuje aj samotnému procesu ich výroby a príprave vstupných surovín.

4.1 Príprava vstupných surovín

Primárnou surovinou pre výrobu peliet bola obilná slama, do ktorej bol kvôli zlepšeniu niektorých vlastností v rôznych pomeroch pridávaný papierenský kal. Dve zo šiestich vzoriek okrem papierenského kalu a slamy obsahovali aj drevnú pilinu, konkrétne sa jednalo o smrekovú pilinu. Aby bol proces peletizácie možný, bolo nutné všetky tieto suroviny podrviť do podoby vhodnej pre peletovanie.

Papierenský kal nám bol poskytnutý spoločnosťou Metsä Tissue, ktorá v závode v Žiline ročne vyprodukuje priemerne 60 000 ton tejto suroviny. V prípade eventuálneho rozšírenia jeho využitia ako aditíva v peletách je ho teda dostatok. Po odobratí kalu zo skládky bola priemerná nameraná vlhkosť 25 %, čo bol dôsledok jeho skladovania na otvorenom priestranstve. Kal bolo preto potrebné vysušiť, pasívnym alebo aktívnym spôsobom. Okrem pasívneho sušenia, ktoré prebiehalo v tenkej vrstve na zemi (obr. 3,a,b), v priestoroch laboratória s nútenou cirkuláciou vzduchu, bol kal dosušovaný z dôvodu urýchlenia procesu aj aktívne, v laboratórnej peci na sušenie MEMMERT UFP 500 (obr. 3,c) (Nosek, 2017).



Obr. 3 Priebeh sušenia kalu

Výsledná priemerná nameraná vlhkosť papierenského kalu po sušení predstavovala okolo 5 %. Obilnú slamu a drevnú pilinu nám poskytla STU v Bratislave, pričom priemerná nameraná vlhkosť týchto surovín bola zhodne okolo 4 %, a tak sušenie v tomto prípade nebolo nutné. Podobné vlhkosti vstupných surovín boli výhodné aj z toho hľadiska, že pri ich miešaní v rôznych pomeroch nebol nutný prepočet na obsah sušiny. Dovlhčovanie následne prebiehalo v samotnom peletizačnom zariadení.

4.1.1 Drvenie vstupných surovín

Aby bolo možné fytomasu, resp. akúkoľvek odpadovú biomasu zhodnotiť, musí sa spracovať do prijateľnej formy. Veľkosť frakcie vstupného materiálu má na lisovací proces veľký vplyv. Väčšia frakcia vo všeobecnosti vedie k väčšiemu potrebnému výkonu pre zhutnenie, zatiaľ čo výsledný výlisok má nižšiu pevnosť a homogenitu (Križan 2009).

Z uvedených dôvodov bolo nutné všetky vstupné suroviny podrviť. Drvenie prebiehalo na vertikálnom šrotovníku ŠV od spoločnosti STOZA (obr. 4). Toto zariadenie materiál šrotuje úderom kladív, ktoré sa pohybujú veľkou obvodovou rýchlosťou vo vnútri sita. Výsledná zrornosť je teda daná dierovaním samotného sita. Napriek tomu, že k zariadeniu je možné pripojiť pásový dopravník (obr. 5), čím je umožnená plne automatická prevádzka, v prípade slamy bolo nutné materiál dávkovať ručne. Dôvodom sú dlhé vlákna slamy, ktoré spôsobujú problém s častým upchávaním šrotovníka. Tieto ťažkosti sa vyskytli aj pri ručnom dávkovaní a spôsobovali nám pri drvení veľké problémy. K šrotovníku je pripojený aj závitkový dopravník, ktorý zabezpečuje automatické odoberanie zošrotovaného materiálu, ktorým sa následne plnili vrecia (Nosek, 2020a).



Obr. 4 Vertikálny šrotovník



Obr. 5 Zásobovací dopravník

4.2 Peletovanie slamy

Ako drvenie, tak aj samotný proces peletovania prebiehal na STU v Bratislave, ktorá disponuje malou peletovacou linkou. Linka je vybavená peletovacím lisom KAHL 33-390/500. Z obr. 6 je zrejmé, že sa jedná o peletovací lis s vertikálnou matricou.



Obr. 6 Peletovacie zariadenie KAHL 33-390/500 (www.directindustry.com)

Surovina je do lisu dodávaná systémom závitových dopravníkov poháňaných elektromotormi. V prípade lisovania zmesných peliet dochádzalo k zmiešaniu kalu a slamy, resp. kalu, slamy a pilín v horizontálnej miešačke, ktorá zároveň slúžila ako zásobník.

V tab. 7 môžeme vidieť navrhnuté pomery vzoriek peliet, ktoré boli ďalej experimentálne skúšané.

Tab. 1 Percentuálne pomery skúmaných vzoriek

Vzorka	Č. 1	Č. 2	Č. 3	Č. 4	Č. 5	Č. 6	Č. 7
Slama	100 %	70 %	80 %	90 %	40 %	45 %	-
Drevné piliny	-	-	-	-	40 %	45 %	100 %
Papierenský kal	-	30 %	20 %	10 %	20 %	10 %	-

V prípade peletovania zmesných peliet nedochádzalo k žiadnym výrazným problémom. Na obr. 7 môžeme vidieť porovnanie všetkých šiestich vzoriek vyrobených

peliet aj s popisom. Okrem referenčnej vzorky z čistej slamy boli vyrobené tri vzorky s prímiesou kalu, s pomerom slamy a kalu postupne 90:10, 80:20 a 70:30. Posledné dve vzorky okrem slamy a kalu obsahovali drevné piliny, v pomere 45:10:45 a 40:20:40 (slama/kal/drevné piliny).



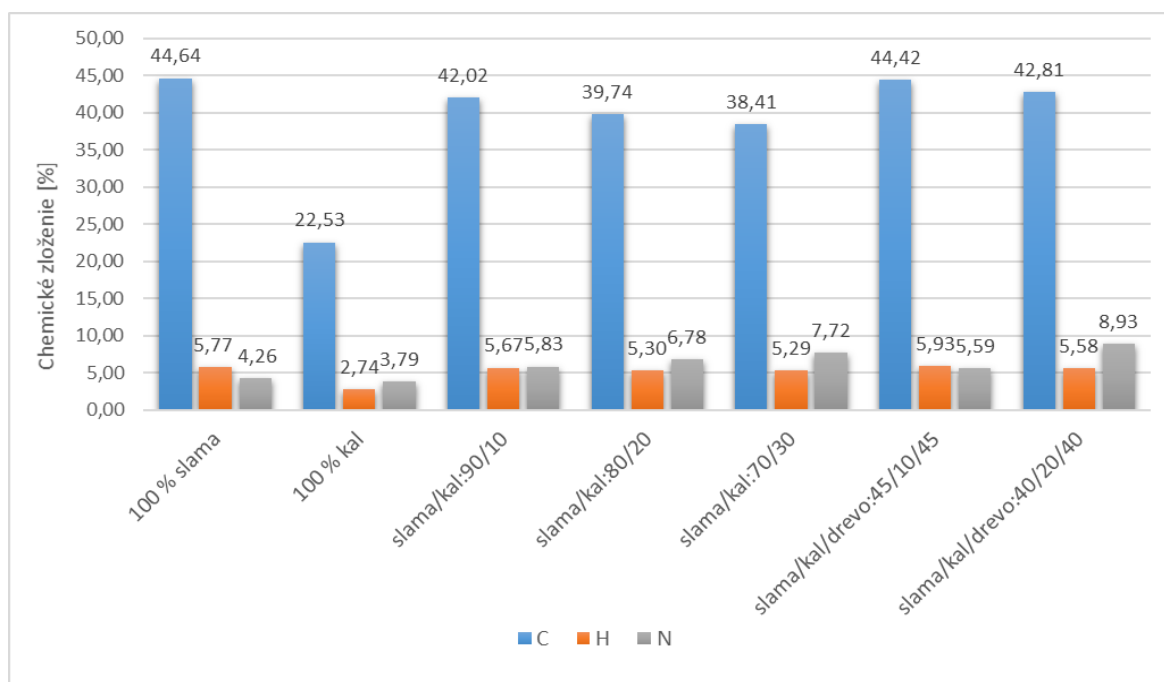
Obr. 7 Porovnanie výsledných peliet

4.3 Prvkový rozbor paliva

K stanoveniu obsahu uhlíka, dusíka a vodíka sme použili analyzátor rady CHN628. Toto zariadenie prináša vyhodnotenia do 270 sekúnd pre všetky určované prvky, s využitím spaľovacej techniky.

Z obr. 8 je zrejmý postupný pokles obsahu uhlíka vo vzorkách s prídavkom papierenského kalu, u ktorého je obsah uhlíka v porovnaní so slamou veľmi nízky. V prípade zmesi slamy, kalu a drevných pilín sa obsah uhlíka približuje obsahu uhlíka v peletách z čistej slamy, napriek pomerne vysokému podielu kalu. Obsah vodíka je vo všetkých vzorkách s výnimkou vzorky slama/kal/drevo:45/10/45 nižší ako u referenčnej vzorky (100 % slama). V prípade všetkých vzoriek platí, že s narastajúcim množstvom kalu dochádza

k zvýšenému podielu dusíka v palive. Jeho podiel je pritom pomerne vysoký už pri peletách z čistej slamy, čo je pravdepodobne dôsledok nadmerného hnojenia.



Obr. 8 Obsah C, H, N vyrobených vzoriek paliva vrátane kalu

4.4 TGA analýza

K stanoveniu zloženia vyrobených šiestich vzoriek peliet vrátane papierenského kalu bol použitý termogravimetrický analyzátor TGA-701.

Výsledky tohto merania sú zhrnuté v tab. 8. Prvou meranou veličinou je vlhkosť. Keďže vlhkosť vstupných surovín pred peletizáciou bola pomerne nízka, dovlhčovanie prebiehalo podľa potreby v peletizačnej linke. Najvyššiu vlhkosť, takmer 7 %, vykazujú pelety z čistej slamy. Najnižšia vlhkosť, blížiac sa vlhkosti drevných peliet, bola naopak nameraná u peliet slama/kal/drevo:40/20/40.

Papierenský kal neobsahuje takmer žiadny pevný uhlík, napriek pomerne vysokému podielu prchavej horľaviny. Jej podiel je v tomto prípade najvyšší u peliet zo slamy, pričom hodnota sa približuje podielu prchavej horľaviny v drevných peletách. S rastúcim množstvom kalu v peletách je následne možné pozorovať postupný pokles obsahu prchavej horľaviny.

Veľký podiel nehorľavých zložiek v papierenskom kale spôsobuje vysokú koncentráciu popola. Zatiaľ čo koncentrácia popola u peliet z čistej slamy je desaťnásobná v porovnaní s drevnými peletami, u peliet slama/kal:70/30 je takmer tridsaťnásobná. Takto vysoké hodnoty môžu viesť k upchávaniu horáka a ďalším prevádzkovým problémom.

Tab. 8 Výsledky TGA analýzy vyprodukovaných peliet vrátane kalu a drevných peliet

Testovaná vzorka	Vlhkosť [%]	Prchavá horľavina [%]	Obsah popola [%]	Pevný uhlík [%]
100 % Slama	6,87	71,3	5,02	16,81
100 % Kal	5,61	55,71	42	0,93
100 % Drevo	3,86	74,99	0,49	16,31
Slama/kal:90/10	5,81	69,05	10,32	14,81
Slama/kal:80/20	5,1	68,39	12,92	13,58
Slama/kal:70/30	6,64	66,93	13,91	12,51
Slama/kal/drevo: 45/10/45	5,83	70,9	6,8	16,47
Slama/kal/drevo: 40/20/40	4,13	70,27	10,53	15,07

4.5 Meranie výhrevnosti

Spalné teplo Q_s jednotlivých vzoriek, ako jeden z najdôležitejších ukazovateľov paliva z energetického hľadiska, bolo merané na kalorimetri LECO AC 500. Každá vzorka bola meraná minimálne dvakrát, pre čo najpresnejšie výsledky. Namerané hodnoty spálneho tepla sa následne podľa rovnice (1) prepočítali na výhrevnosť Q_v .

$$Q_v = Q_s - 24,42 \cdot (W + 8,94 H_h) \quad (1)$$

Kde: W – obsah vody v analytickej vzorke [%]

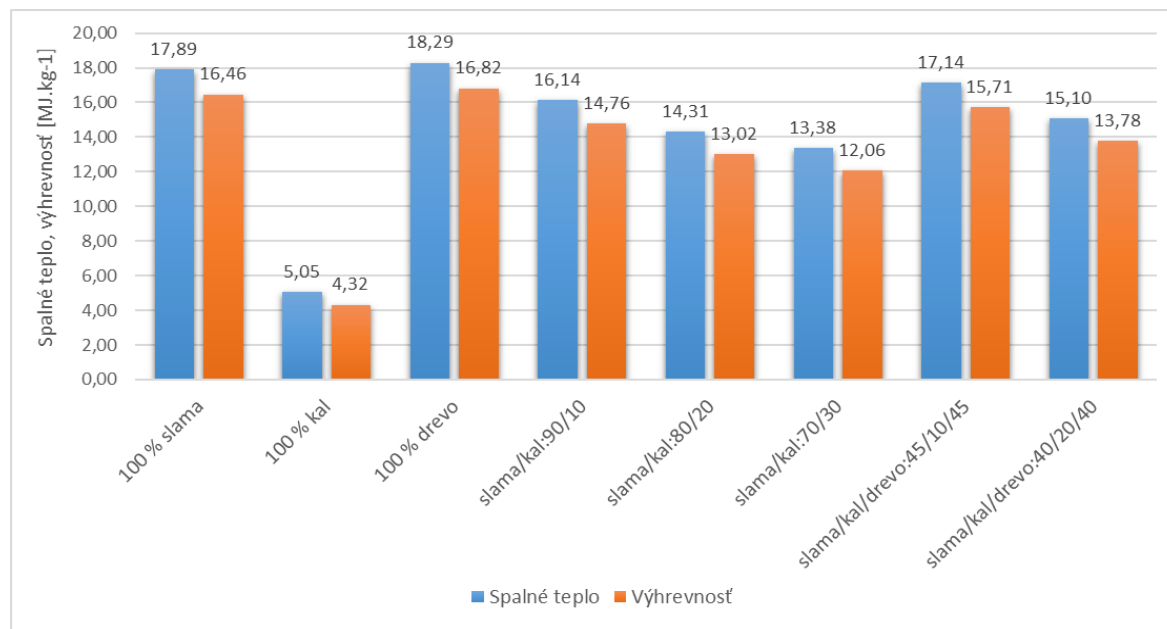
H_h – obsah vodíka v analytickej vzorke [%]

8,94 – koeficient pre prepočet vodíka na vodu

24,42 – koeficient zodpovedajúci 1 % vody vo vzorke pri teplote 25°C [J.g⁻¹]

Z obr. 9 sú zrejmé viaceré skutočnosti. Najväčšiu výhrevnosť, približujúcu sa drevným peletám, majú pelety z čistej slamy. Ako sa predpokladalo, hodnota spálneho tepla a výhrevnosti klesá s narastajúcim podielom kalu v peletách. Samotná výhrevnosť kalu pri vlhkosti 5,6 % pritom neprekročila 5 MJ.kg⁻¹. V prípade peliet s pomerom slamy, kalu

a dreva 45:10:45 sa výhrevnosť veľmi približovala výhrevnosti peliet z čistej slamy. Pri rovnakom podiele kalu mali tieto pelety vyššiu výhrevnosť ako pelety zo slamy a kalu s pomerom 90:10, čo je dané vyššou výhrevnosťou drevnej piliny v porovnaní so slamou.



Obr. 9 Spalné teplo a výhrevnosť vyrobených peliet vrátane kalu a drevných peliet

4.6 Vplyv papierenského kalu na teplotu tavitelnosti popola

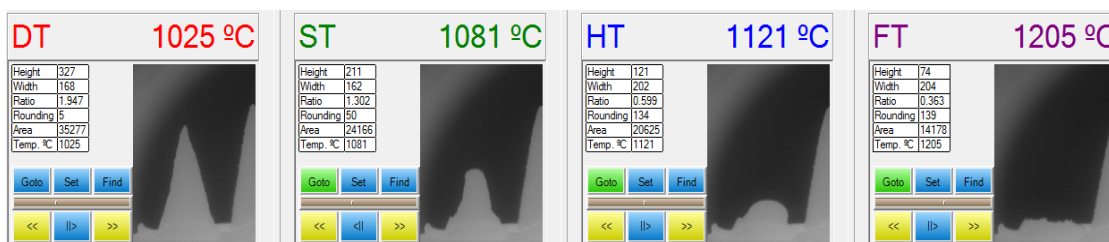
Hlavným účelom pridávania papierenského kalu do peliet zo slamy bolo zvýšenie teploty tavitelnosti popola. Tá bola analyzovaná na prístroji LECO AF 700. Toto zariadenie monitoruje teplotu, pri ktorej nastáva deformácia popolových ihlančekov. Jednotlivé charakteristické teploty popola zahŕňajú teploty: DT – deformácie, ST – mäknutia, HT – topenia, FT – tečenia.

Pred samotným meraním, ktoré vychádzalo z normy ISO – 540, bolo nutné si pripraviť niekoľko ihlančekov z každej vzorky popola. Ten sa pomlel na čo najmenšie častice a následne sa v určitom pomere zmiešal s dextrínom. Táto zmes sa potom vtláčala do formy s lôžkami. Po vytlačení ihlanu z formy prebiehalo jeho sušenie. Suché a kompaktné vzorky sa po vyschnutí lepili na keramickú doštičku a následne sa vložili do vysokoteplotnej pece. Prebehli tri merania a každé trvalo zhruba 2 hodiny. Teplota v peci narastala rýchlosťou približne 8 °C za minútu, z počiatočne definovaných 750 °C až na požadovaných 1500 °C. Obr. 10 znázorňuje vzorky pred a po meraní. Už z neho je zrejmé, že k úplnému roztaveniu popola došlo len pri dvoch vzorkách, konkrétne pri vzorke z čistej slamy a vzorke slama/kal:90/10 (prvé dve vzorky v ľavej hornej časti doštičky).



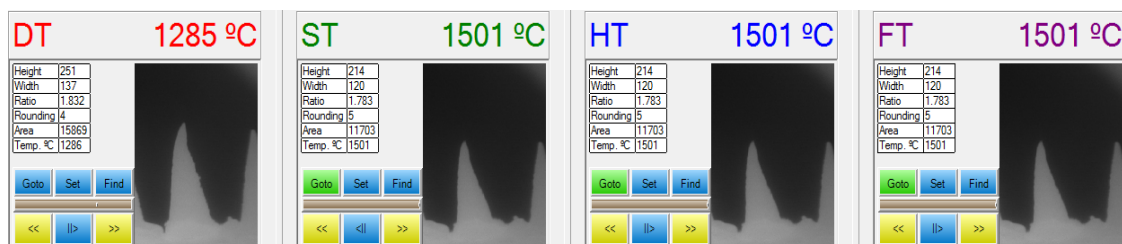
Obr. 10 Porovnanie vzoriek pred (vľavo) a po meraní (vpravo)

Podrobný priebeh merania vzorky popola z čistej slamy je viditeľný z obr. 11. Pri 1025 °C bol určený bod deformácie DT. Teplota je tak o niečo vyššia ako uvádza literatúra. Dôvodom však môže byť typ pôdy na ktorej sa obilnina pestovala, resp. obdobie jej zberu. Tieto faktory vplývajú na obsah draslíka v slame, ktorý výrazne ovplyvňuje teplotu tavenia popola. K mäknutiu vzorky došlo približne pri teplote 1081 °C. Pri 1121 °C bolo zrejme postupné topenie vzorky. Nasledovalo tečenie pri teplote zhruba 1205 °C.



Obr. 11 Priebeh merania vzorky popola z čistej slamy

Obr. 12 pre porovnanie znázorňuje priebeh merania vzorky popola zo zmesi slama/kal:80/20. Deformácia tejto vzorky bola stanovená pri teplote 1285 °C, čo je výrazný nárast oproti vzorke z čistej slamy. K mäknutiu vzorky už pri 20 % podiele kalu nedošlo. Bola by teda nutná vyššia teplota, ako prístrojom dosiahnutých 1500 °C.



Obr. 12 Pribeh merania vzorky popola slama/kal:80/20

V tab. 9 sú následne spísané charakteristické teploty popola všetkých vyrobených vzoriek peliet. Ide o priemerné hodnoty z troch meraní.

Tab. 9 Teploty tavitel'nosti popola vyprodukovaných vzoriek peliet

Testovaná vzorka	DT [°C]	ST [°C]	HT [°C]	FT [°C]
Slama 100	1020	1076	1129	1202
Slama/kal:90/10	1261	1348	1395	1418
Slama/kal:80/20	1285	>1500	>1500	>1500
Slama/kal:70/30	1294	>1500	>1500	>1500
Slama/kal/drevo: 45/10/45	1328	>1500	>1500	>1500
Slama/kal/drevo: 40/20/40	1301	>1500	>1500	>1500

Z tabuľky je zrejmé, že s narastajúcim podielom papierenského kalu v peletách dochádza k zvyšovaniu teploty tavitel'nosti popola. Výsledky sú uspokojivé už pri 10 % podiele tejto suroviny. Z hľadiska zvyšovania teploty tavitel'nosti tak nemá význam tento obsah ďalej zvyšovať. Najvyššia teplota deformácie popola bola zaznamenaná pri vzorke slama/kal/drevo:45/10/45. Takáto hodnota by sa očakávala skôr pri vzorke s 20 % koncentráciou kalu. Vzniknutá anomália je tak pravdepodobne spôsobená tým, že popol nie je homogénny a mohol tým pádom obsahovať menej kalu v dôsledku nerovnomerného zmiešania.

Vysvetlením rapídneho nárastu teplôt tavitel'nosti u všetkých vzoriek je samotné zloženie popola, ktorý je napriek pomerne nízkemu podielu kalu tvorený práve popolom z tejto suroviny. Toto tvrdenie demonštruje aj tab. 10.

Tab. 10 Podiel popola v 10 g paliva vo vzorke slama/kal:90/10

	Slama	Kal
Obsah popola [%]	5,02	42,00
Hmotnosť suroviny v 10 g paliva pri pomere 90/10 [g]	9,00	1,00
Podiel popola v 10 g paliva [g]	0,45	0,42
Podiel popola v 10 g paliva [%]	51,82	48,18

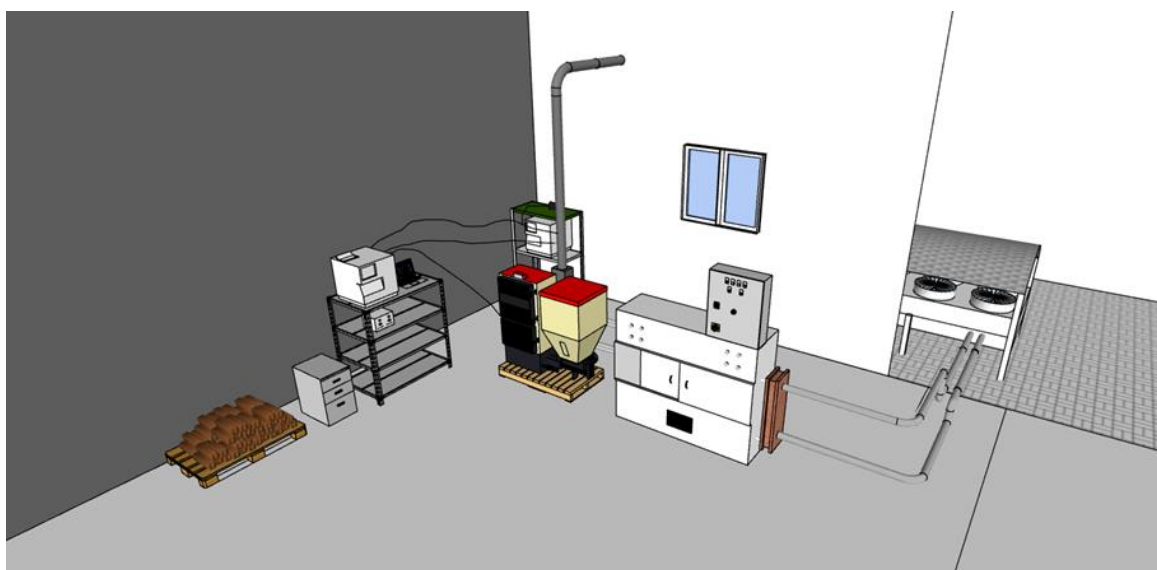
Pri pomere slama/kal:90/10 je popol až z 48 % tvorený popolom z kalu, napriek tomu, že v palive je kal hmotnostne zastúpený len z 10 %. Analogicky, v prípade vzorky slama/kal:70/30 je potom popol zo 77,5 % tvorený popolom z papierenského kalu.

Z nameraných hodnôt je tak celkovo zrejmé, že papierenský kal pozitívne vplýva na teplotu tavitelnosti popola a môže byť využitý ako aditívum v procesoch spaľovania fytomasy.

5 EXPERIMENTÁLNE SPAĽOVANIE V ZDROJI TEPLA

Spaľovanie navrhnutých peliet zo slamy a kalu alebo slamy, kalu a dreva sme realizovali na experimentálnom zdroji tepla (obr. 13), ktorý pozostával zo samotného kotla, regulácie tepla, analyzátora tuhých znečisťujúcich látok (TZL), meracieho zariadenia plyných emisií a meracích zariadení, ktoré zaznamenávali veličiny potrebné k experimentu a prenášali ich do osobného počítača.

Spaľovanie všetkých vzoriek peliet prebiehalo pri rovnakých prevádzkových podmienkach, kde z každej vzorky sme uskutočnili tri merania, pri ktorých sa spálilo počas jedného merania cca 6,5 kg pripravených peliet a jedno meranie trvalo 60 minút. Spaľovalo sa celkovo sedem vzoriek peliet, z čoho jedna bola vzorka čistej slamy, jedna z čistého dreva a ďalšie vzorky peliet boli zo zmesi slamy, dreva a kalu v pomeroch 45/10/45, 40/20/40, 90/10, 80/20, 70/30, kde prvá hodnota udáva podiel slamy v pelete, druhá podiel kalu a tretia podiel dreva. Doba zaznamenávania hodnôt do počítača bola nastavená na každých dvadsať sekúnd (Nosek, 2021).

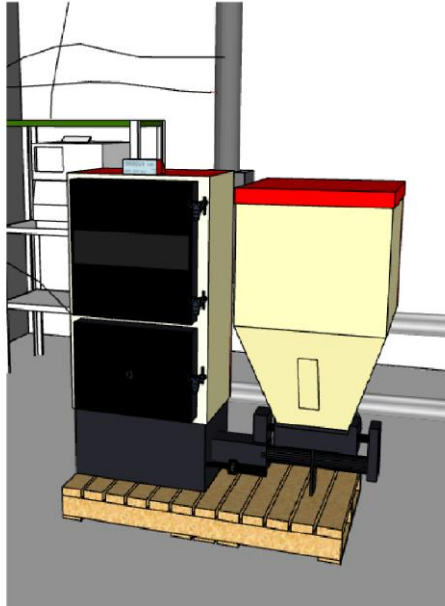


Obr. 13 Schéma kotolne

5.1 Zdroj tepla

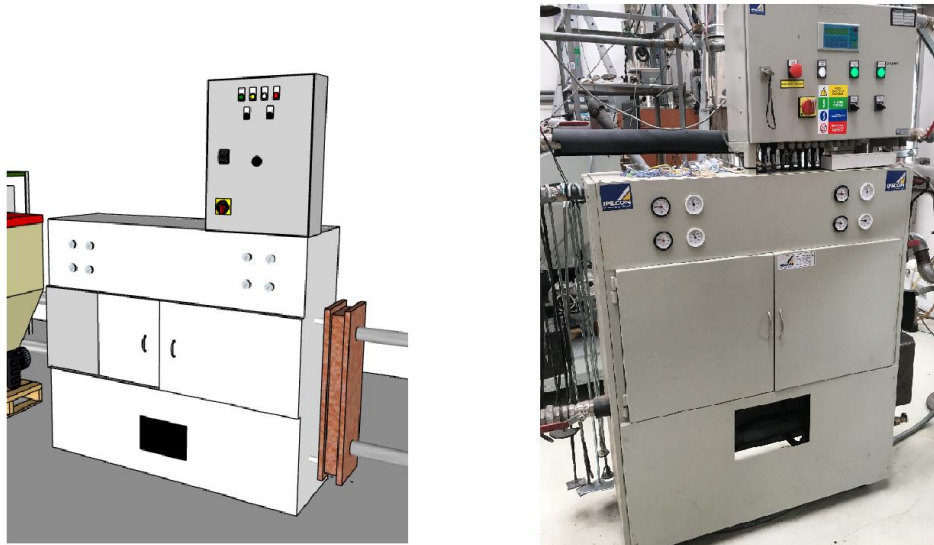
Na navrhnuté experimenty sme použili zdroj tepla – teplovodný kotol ÚSPOR – AUTOMAT (obr.14) s menovitým tepelným výkonom 18 kW primárne určený na spaľovanie drevných peliet. Náš kotol bol vybavený dodatočne domontovaným rotačným

horákom, ktorého menovitý výkon bol 25 kW. Kotel obsahuje vodný výmenník o objeme 55 l a 200 l zásobník paliva, v ktorom je umiestnený šnekový dopravník pomocou, ktorého sú pelety zhora dopravované do rotačného horáka, kde sú zmiešavané so spaľovacím vzduchom a postupným odhorievaním a posúvaním vytláča zhorené palivo do popolníka.



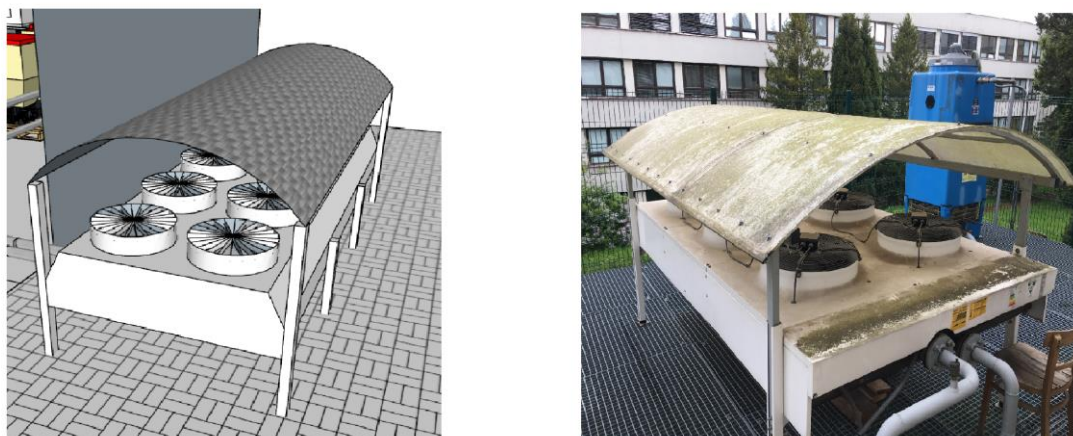
Obr. 14 Experimentálne spaľovacie zariadenie

Regulačná sústava vykurovacieho okruhu mala za úlohu udržiavať prednastavenú maximálnu teplotu kotla 70 °C a podľa toho prispôbiť dávkovanie paliva do rotačného horáku. Regulácia má ďalej za úlohu udržiavať teplotu v teplovodnom okruhu pod bodom varu, kedy by hrozila havária a poškodenie kotla a jeho súčastí. Regulačná sústava zahŕňa dve obehové čerpadlá prostredníctvom ktorých sa ohriata voda z kotla dostáva do výmenníka tepla. Expanzná nádoba slúži na vyrovnávanie tepelnej rozťažnosti obehovej vody.



Obr. 151 Regulačná sústava teplovodného kotla

Vyrobené teplo z vykurovacej sústavy bolo odvádzané pomocou výmenníka tepla do suchého chladiča (chladiacej veže), ktorej súčasťou je šesť ventilátorov, ktoré majú premenlivé otáčky a dokážu regulovať potrebný chladiaci výkon v závislosti od výkonu kotla.



Obr. 162 Chladiaca veža

Spaľovací proces pri automatických kotloch na pelety si nevyžaduje zvláštnu obsluhu tohto zariadenia a tak to bolo aj v tomto prípade. O reguláciu sa staralo zariadenie MAGA S. CONTROL, ktoré pomocou riadiacej elektroniky a nami prednastavených hodnôt

automaticky riadilo prívod spaľovacieho vzduchu, dávkovanie paliva a udržiavalo maximálnu teplotu kotla.



Obr. 173 Elektronická regulácia MAGA S. CONTROL

5.2 Meracie prístroje

Meracie prístroje vo všeobecnosti slúžia na zaznamenanie výsledkov meraní na rozličných zariadeniach. My sme mali k dispozícii zariadenie na meranie plyných emisií CO a oxidov dusíka (NO_x) a okrem týchto parametrov sme uskutočňovali aj meranie tuhých znečisťujúcich látok - TZL. Zariadenie na meranie emisií ABB AO 2020 (obr. 18) pracovalo tým spôsobom, že odoberalo zo spalínovodu spaliny pri konštantnom ťahu komína a vyhodnocovalo počet častíc CO a NO_x v spalinách, ktorých hodnoty následne zapisovalo do excelového súboru v počítači. Tieto namerané hodnoty v ppm bolo nutné prepočítať na jednotky $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ podľa tohto vzťahu:

$$Y = X \cdot \frac{M}{22,41} \cdot \frac{p}{101325} \quad (2)$$

v ktorom Y predstavuje hodnotu emisií v $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$, X predstavuje nameranú emisiu hodnotu prístrojom v jednotkách ppm, M predstavuje molárnu hmotnosť daných prvkov v $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$, hodnota v menovateli 22,41 označuje mólový objem v $\text{dm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ a p značí tlak v Pa. Následne sme túto hodnotu prepočítali na 10 % koncentráciu kyslíka v spalinách podľa vzťahu:

$$Y_{(10\% \text{ O}_2)} = Y \cdot \frac{21 - \text{O}_2 \text{ normalizovaná}}{21 - \text{O}_2 \text{ priemerná}} \quad (3)$$

v ktorom $Y_{(10\% \text{ O}_2)}$ predstavuje normalizovanú hodnotu koncentrácie emisií v $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$, Y predstavuje vypočítanú hodnotu emisií z predošlého vzťahu v $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$, $\text{O}_2 \text{ normalizovaná}$ označuje normalizovanú koncentráciu kyslíka v spalinách v percentuálnom podiele a $\text{O}_2 \text{ priemerná}$ označuje priemernú hodnotu koncentrácie v spalinách v percentuálnom

podiele. V priebehu meraní sme zabezpečovali konštantný normovaný komínový ťah v rozsahu 12 ± 2 Pa prostredníctvom ventilátora umiestneného v komíne a reguláciou jeho otáčok.



Obr. 184 Zariadenie na meranie TZL (vľavo) a emisií CO a NO_x ABB AO 2020 (vpravo)

Koncentráciu tuhých znečisťujúcich látok bola meraná gravimetrickou metódou, ktorej princíp spočíva v odbere vzorky pomocou sondy z prúdiaceho prúdu spalín. Je založená na stanovení množstva znečisťujúcich látok z rozdielu hmotnosti membránového filtra pred odberom vzorky a po odbere. Využitie môžu byť filtre zo sklenených prípadne kremíkových vlákien. Reprezentatívny odber vzorky sa uskutočňuje odberovou sondou vhodného tvaru a správnu rýchlosťou podľa izokinetickej podmienky, ktorá stanovuje požiadavku, aby pri odbere bola rýchlosť v ústí sondy rovnaká ako rýchlosť prúdiacich spalín. V prípade dodržania tejto podmienky je potom koncentrácia v ústí sondy totožná s koncentráciou v prúde. Pre zabezpečenie izokinetickej podmienky odberu pri reálnych meraniach emisií tuhých znečisťujúcich látok je potrebné merať rýchlosti spalín pomocou Pitotovej trubice. Na základe nameranej rýchlosti sa doreguluje množstvo odsávaných spalín cez odberovú sondu so zachytným filtrom tak, aby sa dosiahla zhoda medzi nameranou rýchlosťou spalín a odberovou rýchlosťou (Nussbaumer 2008).

Meranie produkcie tuhých znečisťujúcich látok sa vykonávali na zariadení TECORA ISOSTACK BASIC, pomocou odberovej sondy pre meranie celkových emisií tuhých znečisťujúcich látok (obr.19), pomocou ktorej sme uskutočňovali automatické izokinetické meranie koncentrácie tuhých znečisťujúcich látok. Regulácia zabezpečovala izokinetickú

podmienku odsávania spalín. Hmotnosť každého filtra bola zvážená pred meraním a po meraní.



Obr. 19 Sonda pre odber celkových emisií TZL

Po vybratí z odberovej sondy sa dal každý filter vysušiť v sušiackej váhe (obr. 20), následne putoval do uzatvorenej nádoby so silikagélom, ktorý pohltí zostatkovú vlhkosť a zmerala sa hmotnosť zaneseného filtra. Vo výpočtovom programe sme namerané údaje vyhodnotili a spracovali do grafu.



Obr. 20 Sušiacia váha (vľavo) a presná digitálna váha (vpravo)

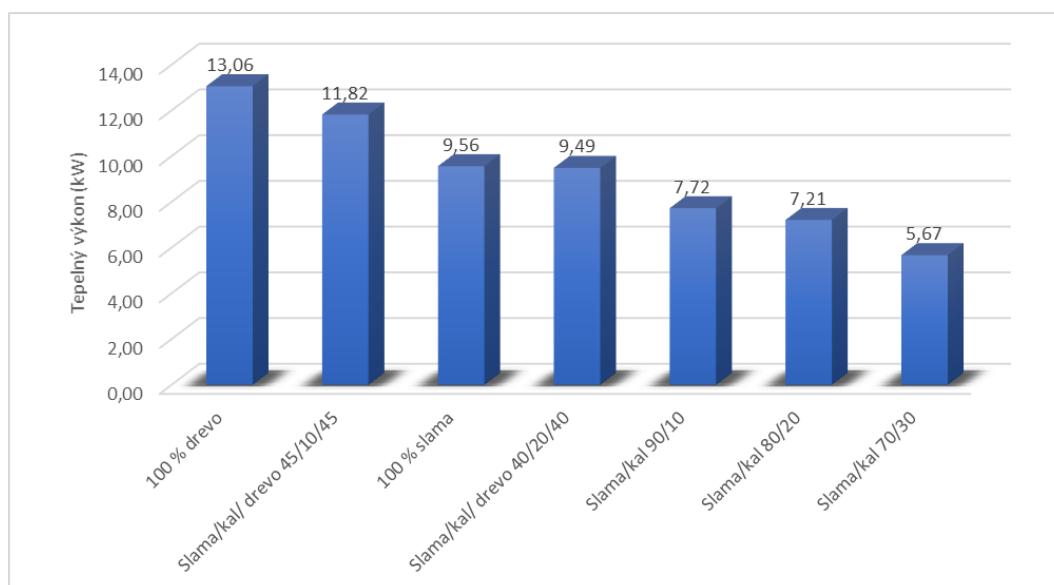
6 VÝSLEDKY EXPERIMENTÁLNYCH MERANÍ

Spaľovanie vyrobených vzoriek peliet prebiehalo plynulo pri stabilných hodnotách výkonu. Spaľovacie zariadenie fungovalo počas meraní bezproblémovo a tak bolo možné namerať a získané údaje vyhodnotiť čo najpresnejšie. Experimentálne merania pozostávali z dvoch častí, v prvej sa analýza zamerala na porovnanie výkonových parametrov zdroja tepla pri spaľovaní našich vzoriek peliet a plynných emisií a v druhej sa porovnávali koncentrácie tuhých znečisťujúcich látok v palive (Nosek, 2020b).

6.1 Výsledky meraní výkonu spaľovacieho zariadenia

Získané výsledky meraní sa porovnávali s prvým meraním, ktorým boli pelety vyrobené z čistej slamy z dôvodu lepšieho porovnania. Do porovnania z dôvodu lepšej viditeľnosti rozdielov boli pridané aj vzorky čistých drevných peliet, ktoré boli z čisto smrekového dreva bez obsahu kôry teda vyššia kvalita peliet.

V prvom rade sa porovnali hodnoty výkonu siedmich skúšaných vzoriek. Časové priebehy výkonu kotla sa počas všetkých troch meraní výrazne nelíšili, kotol pracoval za ustálených podmienok. Dole uvedený (obr. 21) ukazuje priemerné hodnoty výkonu, a najväčší výkon sa namerál pri spaľovaní vzorky čistých drevných peliet, kde priemerný tepelný výkon zdroja tepla počas troch meraní dosiahol hodnotu 13,06 kW.



Obr. 21 Grafické porovnanie tepelných výkonov

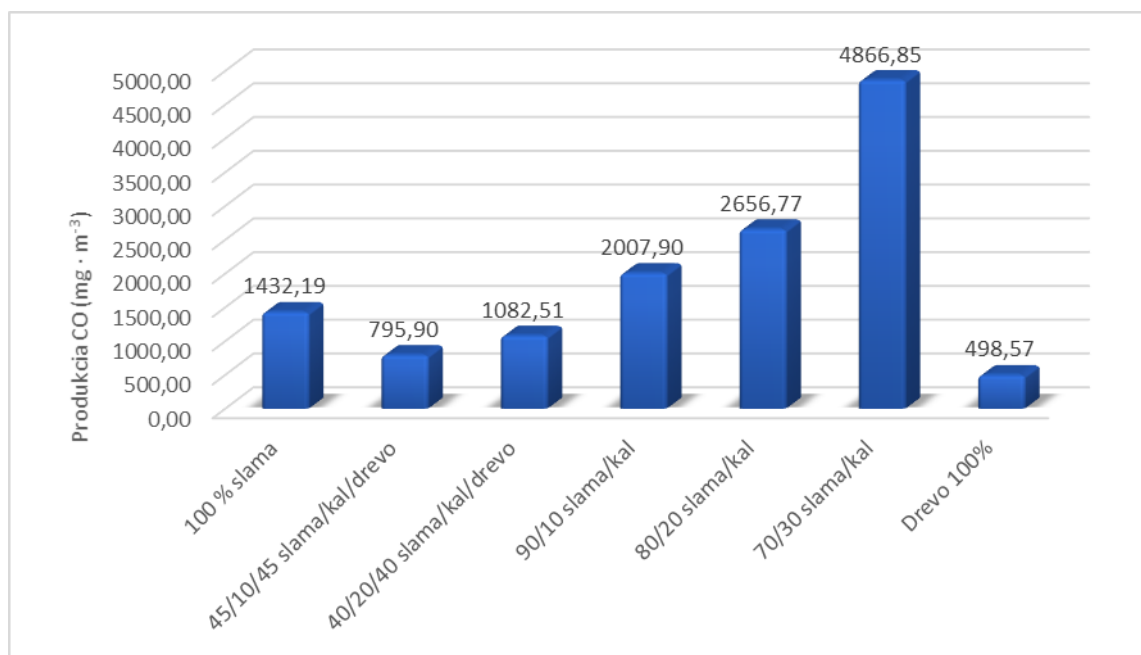
Referenčná vzorka peliet vyrobených z čistej slamy dosiahla priemerný tepelný výkon zdroja tepla na úrovni 9,56 kW. Pri peletách zo slamy a kalu v pomere 90/10 nastalo zníženie tepelného výkonu na 7,72 kW za čo mohla hlavne nižšia výhrevnosť papierenského kalu. Zvýšenie podielu kalu vo vzorkách peliet malo za následok pokles tepelného výkonu zdroja tepla, kde pri podiele 80/20 slama/kal bol 7,21 kW a najnižší výkon spomedzi všetkých vzoriek peliet bol dosiahnutý pri podiele slamy a kalu 70/30, kde bola nameraná hodnota iba 5,67 kW.

Ďalšou vzorkou boli pelety vyrobené z troch surovín a to zo slamy, papierenského kalu a drevných pilín. Pri vzorke 45/10/45 výsledky preukázali len o čosi nižší výkon 11,82 kW ako čisté drevné pelety, a tak prevýšili hodnotu výkonu spaľovacieho zariadenia oproti čistej slame o vyše 2 kW. Druhá vzorka vyrobená z troch surovín v pomere 40/20/40 slama/kal/drevo vykázala o niečo nižší tepelný výkon zdroja tepla, ktorý bol 9,49 kW čo spôsobil 20 % podiel papierenského kalu.

6.2 Výsledky meraní plynných emisií

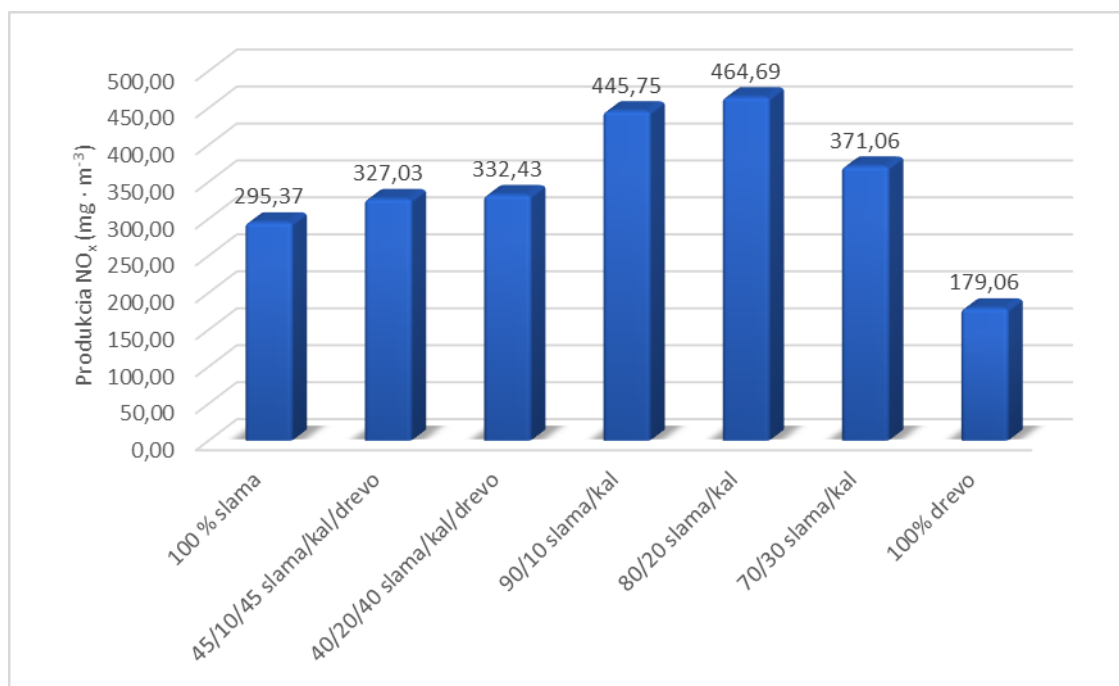
Na obr. 22 môžeme vidieť graficky znázornené priemerné hodnoty produkcie emisií CO (oxidu uhoľnatého), namerané počas spaľovania siedmich vzoriek peliet. Oxid uhoľnatý vzniká pri nedokonalom spaľovaní ako vedľajší produkt horenia, jeho množstvo sa odvíja aj od privádzaného množstva kyslíka do procesu horenia. Obsah kyslíka sa počas spaľovania pohyboval v rozmedzí od 13 % do 15 %. Spomedzi siedmich skúšaných vzoriek mala najnižšiu produkciu vzorka peliet z čistého smrekového dreva.

Automatický kotol s menovitým výkonom do 18 kW, ktorý bol použitý na experiment sa podľa normy (STN EN 303-5 2012) upravenej v roku 2012 zaraďuje do triedy č. 3. Táto norma udáva maximálnu koncentráciu CO pri 10 % kyslíka na $3000 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. Z vyrobených vzoriek túto normu spĺňajú všetky, okrem vzorky peliet slama/kal 70/30, ktorá prekročila maximálnu povolenú hodnotu koncentrácie CO o $1866,85 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, za čo mohol podľa predpokladov papierenský kal. Toto viacnásobné zvýšenie koncentrácie CO mohlo byť spôsobené zvýšenou tvorbou popola v spaľovacom priestore, ktorý bránil prístupu kyslíku. Naopak prekvapivo vzorka slama/kal/drevo 45/10/45 vykazovala prijateľné hodnoty koncentrácie CO, v porovnaní s peletami z čistého smrekového dreva bolo navýšenie len o $261,33 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$.



Obr. 225 Grafické zobrazenie emisií CO

Ďalším sledovaným emisným parametrom boli oxidy dusíka NO_x , ktoré vznikajú v závislosti od vysokých teplôt oxidáciou dusíka. Teplota má vplyv aj na množstvo vznikajúcich oxidov dusíka. Hodnota emisného limitu pre spaľovanie fytohmoty na Slovensku pre oxidy dusíka je na úrovni $650 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. Túto hodnotu spĺňajú všetky skúšané vzorky peliet. Na obr. 23 môžeme vidieť, že najnižšia produkcia emisií NO_x sa ukázala pri vzorke čistých drevných peliet s hodnotou $179,06 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, za ním nasledovala vzorka čistej slamy s hodnotou $295,37 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. Vzorky slama/kal/drevo 40/20/40 a 45/10/45 dosiahli hodnoty produkcie NO_x na približne rovnakých hodnotách $330 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. Naopak najvyšší podiel produkcie NO_x predstavovali vzorky peliet slamy a kalu v pomeroch 90/10, 80/20 a 70/30 pričom sa vyšplhal až na úroveň $464,69 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. Z toho vyplýva, že za zvýšenú produkciu NO_x v týchto vzorkách môže nízka teplota v spaľovacom priestore. Nameraná teplota komína bola na úrovni $180 - 200^\circ\text{C}$ pri vzorkách 90/10, 80/20 a 70/30 oproti tomu vzorka čistej slamy vykazovala teplotu komína 230°C , a u vzoriek 40/20/40 a 45/10/45 sa teplota pohybovala od 230°C do 240°C . Z toho dôvodu vyplýva, že mohlo dochádzať k nízкотеплотnej oxidácii časti viazaného dusíka v palive.

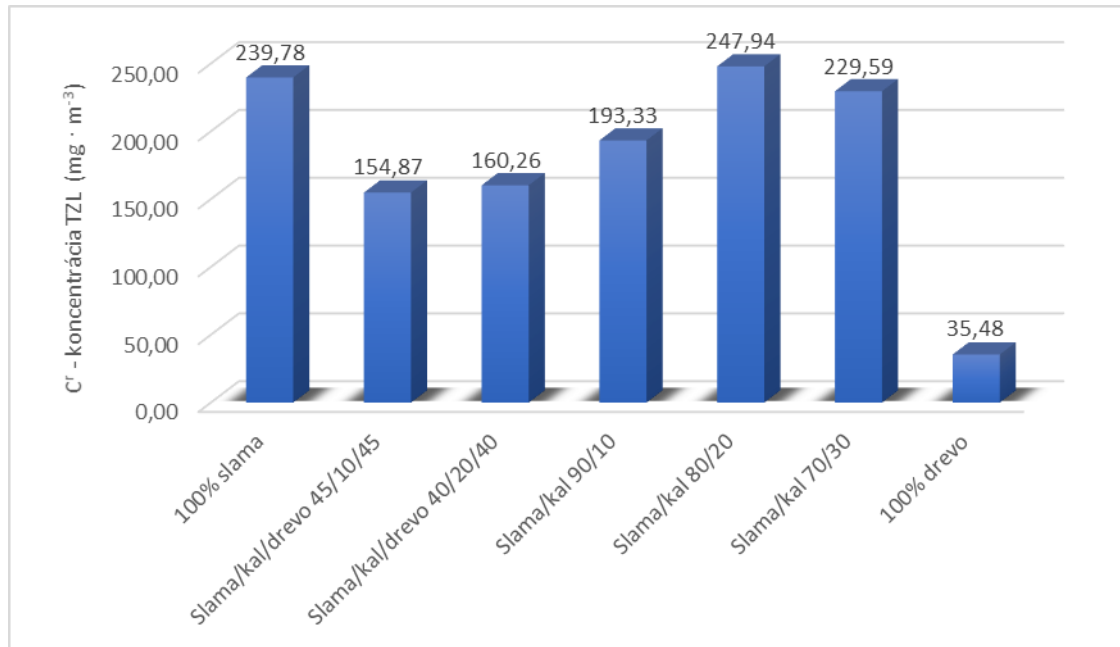


Obr. 23 Grafické zobrazenie produkcií NO_x

6.3 Výsledky meraní tuhých znečisťujúcich látok

Pri spaľovaní tuhých palív je dôležité kontrolovať aj produkciu tuhých znečisťujúcich látok hlavne z dôvodu vdychovania týchto častíc a škodlivého účinku na ľudský organizmus, môžu spôsobovať napríklad rakovinu. Merali sme produkované množstvo celkových emisií tuhých znečisťujúcich látok. Produkciu týchto škodlivých častíc meraných na našich siedmich vzorkách je možné vidieť na obr. 24. Tu je z porovnania zrejmé, že vzorka čistých drevných peliet produkuje najmenšie množstvo tuhých znečisťujúcich látok, ktoré sme namerali na úrovni $35,48 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. Ako sme predpokladali najväčšie množstvá tuhých znečisťujúcich látok produkujú pelety z čistej slamy a zmiešané pelety zo slamy a kalu v pomeroch 80/20 a 70/30, ktoré oproti drevným peletám produkujú až šesť násobne vyššie množstvo tuhých znečisťujúcich látok. Prekvapivo relatívne dobré hodnoty vykázala vzorka slama/kal 90/10, kde množstvo produkovaných tuhých znečisťujúcich látok bolo na úrovni $193,33 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. Vzorky zo surovín slamy, kalu a dreva sa pohybovali množstvom produkcie tuhých znečisťujúcich látok na zhruba rovnakej úrovni $154,87 - 160,26 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. Namerané a prepočítané hodnoty produkcie TZL sa môžu od reálnych podmienok líšiť vzhľadom na fakt, že po meraniach rozobratý kotol obsahoval množstvo popola, ktorý mohol byť spalinami unášaný do komína a preto boli naše namerané hodnoty pravdepodobne mierne vyššie.

Podľa normy (STN EN 303-5 2012) pre automatické kotly s menovitým výkonom do 50 kW, na ktorom sme realizovali naše merania, musí spĺňať stanovenú hodnotu produkcie tuhých znečisťujúcich látok do $150 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$.



Obr. 24 Grafické zobrazenie produkcie TZL

Na obr. 25 môžeme vidieť ukážky filtrov po meraniach produkcie TZL a vizuálne porovnať veľkosť ich zanesenia po vybratí z odberovej sondy celkových emisií TZL a následnom vysušení a zvážení po každom z meraní. Na prvý pohľad je vidieť, podľa čierneho sfarbenia filtrov, že vzorka slama/kal 70/30 je najviac zanesená. Na druhej strane podľa nameraných a vypočítaných hodnôt vyšla najhoršie vzorka slama/kal 80/20 ale podľa znečistenia filtra tomu nezodpovedá. Tieto nepresnosti v meraniach mohli nastať v dôsledku zvýšenej tvorby popola v spaľovacom zariadení, čo bolo spôsobené poruchou pri odvode popola z horáka a následnom upchatí spaľovacej komory. Z tohto dôvodu sa mohli dostať častice popola spolu so spalínami do komína a tým pozmeniť výsledky meraní.



Obr. 25 Ukážky zanesenia filtrov po meraní TZL

7 ANALÝZA A VYHODNOTENIE VLASTNOSTÍ PELIET Z DREVNÝCH PILÍN A PAPIERENSKÉHO KALU

V rámci ďalšieho výskumu bol skúmaný vplyv papierenského kalu na spalovanie s drevnými pilinami vo forme peliet. Boli vyrobené tri skúšobné vzorky peliet zložených zo zmesi papierenského kalu a drevených pilín s rôznym pomerom. V tab. 11, 12 a 13 sú uvedené experimentálne vyrobené vzorky peliet s rôznym pomerom drevných pilín a papierenského kalu, a taktiež zistené hodnoty vlastností peliet. Pričom je možné zistiť, ako sa s meniacim spalným teplom Q_s mení výhrevnosť pilín. Samozrejme, s ohľadom na vlhkosť, ktorá nemala konštantnú hodnotu.

Tab. 11 Výsledky TGA analýzy skúšobných vzoriek peliet

Pomer kalu a pilín	Prchavá horľavina [%]	Obsah popola [%]	Pevný uhlík [%]
50:50	47,190	22,23	5,165
60:40	65,120	26,83	2,815
70:30	63,690	30,89	0,730

Tab. 12 Obsah C, H, N v skúšobných vzorkách peliet

Pomer kalu a pilín	C [%]	H [%]	N [%]
50:50	36,021	4,702	2,590
60:40	34,996	4,533	2,783
70:30	32,899	4,188	2,618
Drevné pelety	49,84	6,03	0,13

Tab. 13 Experimentálne zistené spalné teplo, vlhkosť a výhrevnosť skúšobných vzoriek peliet

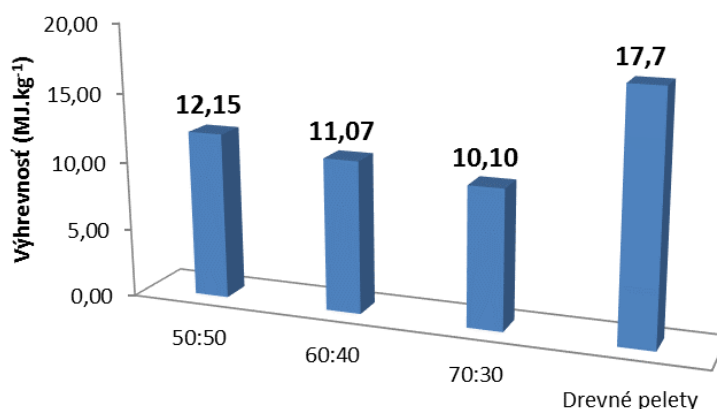
Pomer kalu a pilín	Spalné teplo Q_s (MJ.kg ⁻¹)	Vlhkosť W (%)	Výhrevnosť Q_v (MJ.kg ⁻¹)
50:50	13,26	4,600	12,15
60:40	12,18	5,220	11,10
70:30	11,12	4,690	10,10

7.1 Postup merania a analýza získaných výsledkov

Po týchto meraniach sa pristúpilo k spaľovaniu peliet už v spomínanom zdroji tepla ÚSPOR 18 AUTOMAT. Celý priebeh merania sa urobil rovnakým spôsobom ako je opísané v kapitole „5 EXPERIMENTÁLNE SPAĽOVANIE V ZDROJI TEPLA“.

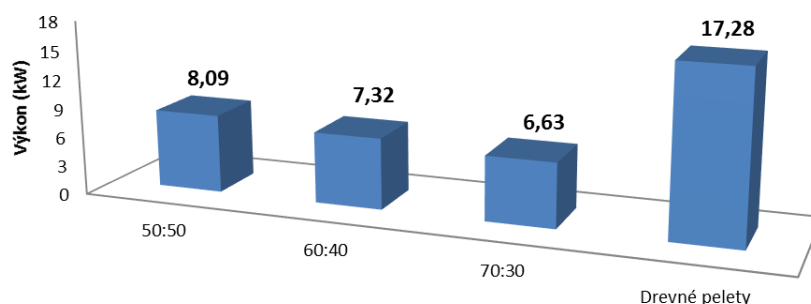
Pre lepšie zhodnotenie a porovnanie sa získané výsledky porovnali s drevnými peletami z výskumnej práce Holubčík a kol. Drevné pelety boli vyrobené z rôznych druhov dendromasy s prevahou smrekového dreva s obsahom kôry, tzn. ide o menej kvalitné pelety (Holubčík, 2014c).

V nasledujúcom obr. 26 je možné porovnať priemernú výhrevnosť drevných peliet a peliet zmesi kalu a pilín. Je zrejmé, že drevné pelety majú najvyššiu výhrevnosť. Vyrobené pelety dosahujú výhrevnosť nižšiu ako drevné pelety, čo sa aj predpokladalo.



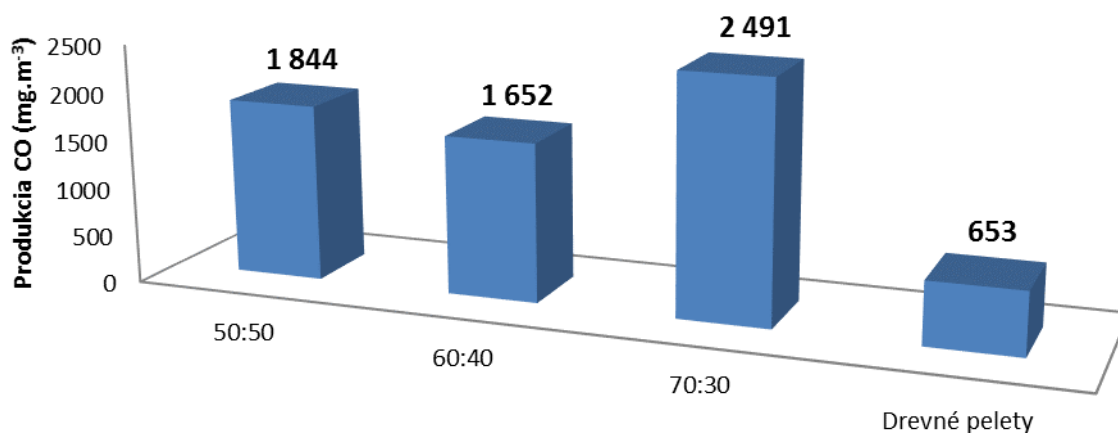
Obr. 26 Nameraná výhrevnosť peliet zmesi kalu a pilín a drevných peliet

Na obr. 27 je možné vidieť priemerné tepelné výkony experimentálneho zdroja tepla dosiahnutého počas spaľovania peliet zmesi kalu a drevných pilín. Pri spaľovaní drevných peliet bol nameraný najvyšší výkon kotla a to 17,28kW. Vyrobené vzorky peliet vo väčšine prípadov nedosiahli ani polovičný výkon, čo bolo spôsobené nižšou výhrevnosťou vzoriek zmesi kalu a pilín. Mohlo to byť zapríčinené aj tým, že výrobca urobil zmeny v nastaveniach kotla, ktoré pravdepodobne ovplyvnili jeho prevádzku. Pri zahrievaní kotla drevnými peletami sa výkon kotla ustálil približne na výkone 12 až 13kW. Ako sa predpokladalo, najnižší výkon bol pri spaľovaní peliet v pomere kalu a drevných pilín 70:30.



Obr. 27 Výkon kotla pri spaľovaní peliet zmesi kalu s drevnými pilinami

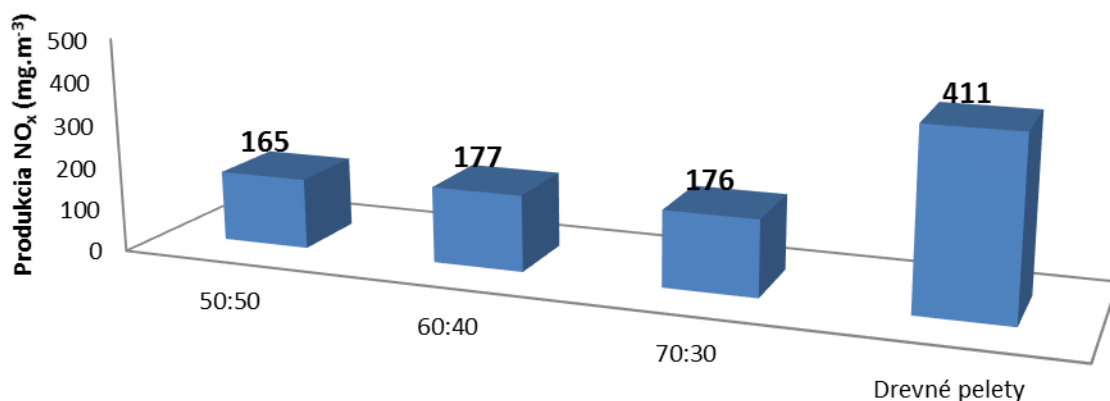
Priemerné hodnoty produkcie oxidu uhoľnatého (CO) namerané počas spaľovania je možné vidieť na obr. 28. CO vzniká ako vedľajší produkt nedokonalého spaľovania a jeho množstvo závisí aj od množstva privádzaného kyslíka do horenia. Počas meraní bol obsah kyslíka v rozmedzí od 17% do 18%. Je prekvapivé, že spomedzi vyrobených vzoriek mali najnižšiu produkciu CO práve vzorky v pomere kalu s pilinami 60:40. Nižšia produkcia CO v peletách v pomere 60:40 mohla byť spôsobená zhoršeným prístupom kyslíka, nakoľko v okolí horáka dochádzalo k usádzaniu popola. Emisný limit pri spaľovaní CO je prísnejší v porovnaní s ostatnými limitmi, nakoľko emisie z uhlíkovodíkov sú z veľkej časti karcinogénne.



Obr. 28 Namerané koncentrácie CO pri spaľovaní skúšobných vzoriek

Podľa normy STN EN 303-5 kotol s automatickým podávaním paliva s výkonom do 50kW, ktorý bol použitý pri experimente, patrí podľa účinnosti do triedy 5. Norma určuje maximálnu hodnotu CO pre daný kotol na 500mg.m⁻³. Z obrázka je zrejmé, že vyrobené vzorky peliet danú normu nespĺňajú.

Množstvo vznikajúcich oxidov dusíka (NO_x) je závislé na teplote plameňa, pri ktorej dochádza k oxidácii, na vlastnostiach paliva a rýchlosti spaľovania. Oxidy dusíka patria medzi významné znečisťovatele ovzdušia. Namerané množstvo produkcie NO_x je znázornené na obr. 29. Obsah NO_x v peletách v pomere zmesi kalu a pilín je približne trikrát nižší ako v drevných peletách. Najvyšší obsah je vo vzorkách v pomere kalu s drevnými pilinami 60:40, a to v koncentrácií 177 mg.m⁻³. Pri koncentrácií od 47 do 140 mg.m⁻³ spôsobuje zápal pľúc a v koncentracii od 560 až 940 mg.m⁻³ je smrteľnou dávkou v dôsledku opuchu pľúc.



Obr. 29 Namerané koncentrácie NO_x pri spaľovaní skúšobných vzoriek

ZÁVER

Fytomasa, ako obnoviteľný zdroj energie, má pre budúcnosť skutočne obrovský potenciál. Ten okrem jej širokej dostupnosti a nízkej ceny spočíva najmä v jej flexibilita a možnosti využitia v rôznych aplikáciách. Napriek niektorým nedostatkom si tak zasluhuje omnoho väčšiu pozornosť, najmä na území Slovenskej republiky.

V práci boli popísané jednotlivé spôsoby zušľacht'ovania fytomasy, ktoré dokážu vyriešiť niektoré nedostatky tejto suroviny. Tuhé ušľachtilé biopalivá ako pelety a brikety, doposiaľ využívané hlavne u drevnej suroviny, majú v prípade fytomasy prídavný význam, práve kvôli riedkosti energie. Technológie pre výrobu týchto energonosičov sú široko rozšírené, a v práci boli tiež rozobrané.

Práca tiež preukázala, že jedným z riešení, ako sa vysporiadať s najväčším nedostatkom fytomasy, a teda nízkou teplotou tavenia popola, je použitie vhodných aditív a materiálov, ktoré túto teplotu vďaka rôznym mechanizmom dokážu zvýšiť.

Praktická časť tejto práce sa zaoberala výrobou peliet z fytomasy, aj s prídavkom papierenského kalu. Ten sa do peliet pridával v pomeroch od 90:10, 80:20 a 70:30 (slama/kal). Okrem toho boli vyrobené aj dve vzorky s obsahom drevnej piliny, v pomere 45:10:45 a 40:20:40 (slama/kal/drevné piliny). Cieľom bolo preskúmať vplyv kalu na niektoré vlastnosti peliet a jeho potenciál pre spoluspaľovanie s fytomasou. Analýza výsledkov ukázala, že kal nepriaznivo vplyva na výhrevnosť peliet zo slamy, čo je spôsobené jeho nízkym obsahom uhlíka. Už pri pomere slama/kal:90/10 výhrevnosť poklesla približne o 10 %, v porovnaní s výhrevnosťou referenčnej vzorky – čistej slamy. Podobne je to s obsahom popola, ktorého podiel sa po pridaní 10 % kalu zvýšil až dvojnásobne. Pozitívne účinky kalu však spočívajú práve v jeho schopnosti zvýšiť teplotu tavitelnosti popola peliet z fytomasy. Teplota deformácie popola sa už po pridaní 10 % kalu zvýšila takmer o 250 °C, čo je nárast o 18,97 % oproti pôvodnej hodnote. Z hľadiska tavitelnosti bolo teda preukázané, že takéto množstvo kalu je postačujúce pre elimináciu problémov, ktoré vznikajú pri spaľovaní fytomasy. Väčšie množstvo kalu v peletách by síce túto teplotu ešte navýšilo, udialo by sa tak ale na úkor omnoho nižšej výhrevnosti a väčšieho množstva popola.

Experimentálne boli zisťované vlastnosti vzoriek vyrobených z drevných peliet a papierenského kalu. Predmetom tohto experimentu boli tri vzorky peliet v pomere 50:50, 60:40 a 70:30.

Vo všeobecnosti možno povedať, že čo sa týka tepelných vlastností ako výkon, výhrevnosť, ako najlepší pomer možno považovať 50:50. Pelety s daným pomerom predstavujú priblíženie sa k „referenčným“ drevným peletám takmer na 70% výhrevnosti. Pre namerané hodnoty skúšobných vzoriek je možné povedať, že výkony týchto vzoriek dosiahli maximálne 47% z výkonu pri spaľovaní referenčnej vzorky.

Pri analyzovaní peliet sa zisťoval obsah uhlíka (C), vodíka (H) a dusíka (N). Skúmané pelety dosiahli lepšie hodnoty obsahu C a H ako „referenčné“. Analýzou výsledkov experimentálnych vzoriek sa zistilo, že obsah CO je vyšší oproti hodnotám drevných peliet. Paradoxne najlepší výsledok dosiahli vzorky kalu s pilinami s pomerom 60:40. Je však nutné podotknúť, že podľa vyššie spomenutej normy pelety nespĺňajú limity. Porovnaním NO_x sme zistili viac ako trikrát nižší obsah oproti drevným peletám.

Všeobecne možno povedať, že pelety s pomerom 70:30 sú prakticky nepoužiteľné pre spaľovanie a neodporúčajú sa ani v praktickom využití. Čo sa týka tepelných vlastností, najlepšie obstáli pelety s pomerom 50:50, no pri zohľadnení získaných emisných hodnôt CO sa lepšie ukázali pelety s pomerom 60:40.

Prínos pre vedecko výskumnú činnosť

Na základe vykonaných experimentálnych meraní je možné analyzovať proces spaľovania fytomasy. Navrhla sa metodika pre zvýšenie teploty tavitel'nosti popola a to použitím vhodných aditív a vybraných materiálov, ktoré túto teplotu vďaka rôznym mechanizmom dokážu zvýšiť. Boli vyrobené experimentálne vzorky z odpadového papierenského kalu a realizované merania, ktoré preukázali pozitívny vplav tohto materiálu na zvýšenie teploty tavitel'nosti popola.

Prínos pre technickú prax

Z hľadiska praktického prínosu boli skúmané rôzne druhy a množstvá aditív, a ich vplyv na teplotu tavitel'nosti popola, vlastnosti vyrobených vzoriek peliet, výkonových parametrov zdroja tepla a koncentrácie emisií. Pre jednotlivé vzorky peliet sa určili optimálne množstvá prídavných látok a ich pomery na spoluspaľovanie s vybranými materiálmi. Získané poznatky je možné využiť pri výrobe peliet z fytomasy, určených pre spaľovanie v obdobných zdrojov tepla.

Prínos pre pedagogickú činnosť

Prínosy pre pedagogickú činnosť riešenej problematiky v rámci práce je zvládnutie teórie spaľovania a aplikovanie pri experimentálnych meraniach. V danej problematike boli zadané záverečné práce. V predmete Technika prostredia môžu študenti v rámci cvičení skúmať vplyv rôznych faktorov na proces spaľovania fytomasy. Aplikácia poznatkov v predmetoch Alternatívne zdroje energie, Vykurovanie a vetranie a v predmete Zdroje tepla a výmenníky tepla. Experimentálne výsledky získané pri vypracovaní práce boli prezentované na medzinárodných konferenciách, publikované v zborníkoch, domácich a zahraničných časopisoch.

8 BIBLIOGRAFIA

AGBOR, E. U. 2015. Biomass Co-firing with Coal and Natural Gas [online]. 2015. [cit. 2019-04-13]. Dostupné na internete:

<https://era.library.ualberta.ca/items/8a0929a3-1cdd-4caf-b0c2195f5a4c1e/view/e7e7eeea-f921-4a36-9816-1f1742ff8972/Agbor_Ezinwa_U_201509_MSc.pdf>

BAKKER, R. R. 2005. Managing ash content and quality in herbaceous biomass: An analysis from plant to product [online]. 2005. [cit. 2019-04-25]. Dostupné na internete:

https://www.researchgate.net/publication/40118738_Managing_ash_content_and_quality_in_herbaceous_biomass_An_analysis_from_plant_to_product

BALÁŠ, M. Kotle a výměníky tepla. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013, 119 s. ISBN 978-80-214-4770-7.

BASU P., KEFA C., JESTIN L. 2000. Boilers and Burners Design and Theory, Springer - Verlag, New York. 570 str., 2000, ISBN 0-387-98703-7.

BAXTER, L. L. 2005. Biomass-coal Co-combustion: Opportunity for Affordable Renewable Energy [online]. 2005. [cit. 2019-04-12]. Dostupné na internete:

<<https://scholarsarchive.byu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2754&context=facpub>>

BIATH, P. 2013 Porovnanie energetickej efektívnosti peletovacích lisov s výkonom do 500 kg/h [online]. 2013. [cit. 2019-02-21]. Dostupné na internete:

<www.eu.fme.vutbr.cz/file/75_1_1/>

BISYPLAN.BIOENAREA.EU. 2012. [online]. 2012. [cit. 2018-11-25]. Dostupné na internete:

<<http://bisyplan.bioenarea.eu/html-files-en/02-00.html>>

BOMAN, CH. 2012. Fuel additives and blending as primary measures for reduction of fine ash particle emissions – state of the art [online]. 2012. [cit. 2019-04-10]. Dostupné na internete:

<<https://futurebiotec.bioenergy2020.eu/files/FutureBioTecAdditives%20and%20fuel%20blending-state%20of%20the%20art%20report.pdf>>

CARROLL, J. P. – FINNAN, J. 2012. Physical and chemical properties of pellets from energy crops and cereal straws [online]. 2012. [cit. 2019-01-15]. Dostupné na internete:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511012000608>>

ENVIRAL.SK. 2010. [online]. 2010. [cit. 2019-04-25]. Dostupné na internete:

<<https://www.enviral.sk/sk/>>

FAGERSTRÖM, J. et al. 2010. Reduction of fine particle-and deposit forming alkali by co-combustion of peat with wheat straw and forest residues [online]. 2012. [cit. 2019-04-28].

Dostupné na internete:

<https://www.researchgate.net/publication/268341412_Reduction_of_fine_particle-and_deposit_forming_alkali_by_cocombustion_of_peat_with_wheat_straw_and_forest_residues>

FOURNEL, S. et al. 2015. Effect of Additives and Fuel Blending on Emissions and Ash-Related Problems from Small-scale Combustion of Reed Canary Grass. ISSN 2077-0472, Agriculture 2015, 5, p. 561-576

GEFFERT, A – GEFFERTO VÁ, J. 2011a. Energetický potenciál vybraných odpadov s obsahom biomasy. [online]. 2011, [cit. 2016-04-20]. Dostupné na internete:

<http://www.tuzvo.sk/files/DF/fakulta_df/AFX/archive/2011/2011-1/12-1-11-geffertova-geffert.pdf>

GROVER, P. D. – MISHRA, S. K. 1996. Biomass briquetting: technology and practices [online]. 1996. [cit. 2018-19-01]. Dostupné na internete:

<<http://leehite.org/biomass/documents/Biomass%20Briquetting%20Technology%20and%20Practices%20FAO.pdf>>

HAO, W. et al. 2013. Utilization of sulfate additives in biomass combustion: fundamental and modeling aspects, Proceedings of the European Combustion Meeting

HARTMANN, H. et. al. 2007. Handbuch bioenergie – kleinanlagen. 2. vyd. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. V. (FNR), 2007. 224 p. ISBN 3-00-011041-0.

Matúška, T.: (2005) Experimentálne metódy v technice prostredí. ČVUT Praha, ISBN 80-01-03291-4.

HARUN, N. Y. – AFZAL, M. T. 2015. Combustion Behavior and Thermal Analysis of Agricultural And Woody Biomass Blends. In Advances in Environmental Biology. ISSN-1995-0756, 2015, 9 (15), p. 34-40.

HOLUBČÍK, M. – JANDAČKA, J. 2014. Redukcia problémov spaľovania fytomasy pomocou spoluspaľovania s dendromasou [online]. 2014. [cit. 2018-19-01]. Dostupné na internete:

<<https://lm.uniza.sk/~aler/pages/zbornik/2014/prispevky/14.pdf>>

HORÁK, J. – KUBESA, P. 2012. O spalování tuhých paliv v lokálních topeništích (1) [online]. 2012. [cit. 2019-15-01]. Dostupné na internete:

<<https://energetika.tzb-info.cz/8618-o-spalovani-tuhych-paliv-v-lokalnich-topenistich-1>>

- HORVAT, O. – DOVIČ, D. 2018. Combustion of agricultural biomass – issues and solutions. In Transactions of FAMENA. ISSN 1333-1124, 2018, vol. 42, p. 75-86
- HORVÁTH, J. – BALOG, K. – HIRLE, S. 2013. Vlastnosti peliet ako alternatívneho biopaliva využívaného v domácnostiach. In Proceedings of the International Scientific Conference. Žilina : Strix, 2013. ISBN 978-80-89281-89-3, s. 85-90
- HUANG, D. – ZHOU, H. – LIN, L. 2012. Biodiesel: an Alternative to Conventional Fuel product [online]. 2012. [cit. 2019-27-04]. Dostupné na internete:
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610212002974>>
- HUANG, J. 2014. Flat die and ring die pellet mills comparison [online]. 2014. [cit. 2019-02-19]. Dostupné na internete:
<http://www.biofuelmachines.com/flat-die-and-ring-die-pellet-mills-comparison.html>
- HUTŇAN, M. 2012. Využitie fytohmoty ako obnoviteľného zdroja na energetické účely. In Využitie biomasy z obnoviteľných zdrojov na energetické účely. Nitra : Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, 2012. ISBN 978-80-552-0743-8, s. 163-170.
- CHEN, L. – XING, L. – HAN, L. 2009. Renewable energy from agro-residues in China: Solid biofuels and biomass briquetting technology [online]. 2009. [cit. 2019-02-20]. Dostupné na internete:
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403210900121X>>
- CHERNEY, H. J. 2012. Herbaceous Biomass for Heat feedstocks [online]. 2012. [cit. 2018-01-13]. Dostupné na internete:
<<http://extension.missouri.edu/sare/documents/HerbaceousBiomassHeatHandout2012.pdf>>
- I' CÖZ, E. a kol. 2009 Research on ethanol production and use from sugar beet in Turkey biomass [online]. 2009. [cit. 2019-04-25]. Dostupné na internete:
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953408001219>>
- JANDAČKA, J. a kol. 2011. Environmentálne a energetické aspekty spaľovania biomasy, Žilina : Juraj Štefuň – GEORG, 2011. 304 s. ISBN 978-80-89401-40-6.
- JANDAČKA, J. a kol. 2016 a. Inovácie na zefektívnenie procesu spaľovania biomasy. Žilina: Vydavateľské centrum ŽU, 2016. 265 s. ISBN 978-80-554-1236-8.
- JANDAČKA, J. a kol. 2016 b. Moderné zdroje tepla na vykurovanie. Žilina: Vydavateľské centrum ŽU, 2016. 264 s. ISBN 978-80-554-1230-6.
- JANDAČKA, J.- MALCHO, M.- MIKULÍK, M. 2007b. Technológie pre prípravu a energetické využitie biomasy. 222 strán. Vydavateľstvo a tlač: Jozef Bulejčík. ISBN 978-80-969595-3-2.

JANDAČKA, J., MALCHO, M., MIKULÍK, M. 2007a. Biomasa ako zdroj energie: Potenciál, druhy, bilancia a vlastnosti palív. Žilina : Juraj Štefun - Georg, 2007. ISBN 978-80-969161-3-9.

JENKINS, B. M. et al. 1998. Combustion properties of biomass [online]. 1998. [cit. 2018-12-15]. Dostupné na internete:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382097000593>

JEVIČ, P., HUTLA, P., ŠEDIVÁ, Z. 2008. Udržitelná výroba a řízení jakosti tuhých paliv na bázi agrárních bioproduktů. metodická příručka. Praha : Výzkumný ústav zemědělské techniky, 2008. ISBN 978-80-86884-42-4.

JIROUŠ, F. Efektivní spalování paliv. Vyd. 1. Praha: Český svaz zaměstnavatelů v energetice, 2013, 133 s. ISBN 978-80-260-5393-4.

KOLONIČNÝ, J., HASE, V. 2011. Využití rostlinné biomasy v energetice: metodická příručka. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011, 150 s. ISBN 978-80-248-2541-0.

KOŠKO, M. 2010. Emisie vznikajúce pri spaľovaní dreva. In Plynár – vodár – kurenár. ISSN 1335-9614, 2010, roč. 8, č. 5, s. 20-22.

LÁBAJ J., KAPJOR A., PAPUČÍK. 2010. Alternatívne palivá pre energetiku a dopravu, Juraj Štefun _GEORG 2010,ISBN 978-80-89401-15-4

LEE, O. 2007. Composition of Herbaceous biomass feedstocks [online]. 2007. [cit. 2018-12-17]. Dostupné na internete:

<https://www.scribd.com/document/320168406/2007-Lee-Owens-Composition-of-Herbaceous-biomass-feedstocks-pdf>

LIAO, Y. – MA, X. 2010. Thermogravimetric analysis of the co-combustion of coal and paper mill sludge. [online]. 2010, [cit. 2016-05-06]. Dostupné na internete: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261910001625>>

LIKON, M. – TREBŠE, P. 2012a. Recent Advances in Paper Mill Sludge Management. [online]. 2012, [cit. 2016-04-05]. Dostupné na internete: <<http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/30858.pdf>>

LIU, CH. G. et al. 2019. Bioethanol: New opportunities for an ancient product [online]. 2019. [cit. 2019-04-25]. Dostupné na internete: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2468012518300191>>

- MALAŤÁK, J. – VACULÍK, P. 2008. Biomasa pro výrobu energie: vedecká monografia. Praha : Česká poľnohospodárska univerzita v Prahe, 2008. 206 s. ISBN 978-80-213-1810-6.
- MALIK, B. et al. 2015. Biomass Pellet Technology: A Green Approach for Sustainable Development [online]. 2015. [cit. 2018-19-01]. Dostupné na internete:
<https://www.researchgate.net/publication/283780144_Biomass_Pellet_Technology_A_Green_Approach_for_Sustainable_Development>
- MANCÍR, M. – VITÁZEK, I. 2004. Biomasa ako zdroj tepelnej energie v poľnohospodárstve [online]. 2004. [cit. 2019-27-04]. Dostupné na internete:
<http://www.slpk.sk/elido/medzinarodna_stud_ved_konf_mf04/Pdf/25.pdf>
- MCILVEEN-WRIGHT, D. R. et al. 2007. A technical and environmental analysis of co-combustion of coal and biomass in fluidised bed technologies [online]. 2007. [cit. 2018-19-01]. Dostupné na internete:
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236107000877>>
- MCKENDRY, P. 2002. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass [online]. 2002. [cit. 2018-11-28]. Dostupné na internete:
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852401001183>>
- MEROCO.SK. 2011. [online]. 2011. [cit. 2019-04-25]. Dostupné na internete:
<<https://www.meroco.sk/sk/>>
- MIRANDA, T. et al. 2015. A Review of Pellets from Different Sources. In Materials. ISSN 1996-1944, 2015, vol. 8, p. 1413-1427
- MROCZEK, K. et al. 2011. The effect of halloysite additive on operation of boilers firing agricultural biomass. In Fuel Processing Technology. ISSN 0378-3820, vol. 92, p. 845-855
- MURTINGER, K., Beranovský J. 2008. Energie z biomasy. 2. Brno : ERA, 2008. ISBN 978-80-7366-115-1.
- NÄZELIUS, I. L. 2016. Slag formation in fixed bed combustion of phosphorus-poor biomass. Luleå University of Technology : Graphic Production, 2016. 232s. ISBN 978-91-7583-764-2.
- NIGAM, P. S. – SINGH, A. 2010. Production of liquid biofuels from renewable resources [online]. 2010. [cit. 2019-27-04]. Dostupné na internete:
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128510000353>>
- NOSKIEVIČ, P. 1996. Biomasa a její energetické využití. Praha : Ministerstvo životního prostředí, 1996. ISBN 80-707-8367-2.

- NOSKIEVIČ, P. 2002. Spalování uhlí. 2. vyd. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2002. 62 s. ISBN: 80-248-0204-X.
- NOSEK, R. et al. 2021. Effect of paper sludge and dendromass on properties of phytomass pellets: APPLIED SCIENCES-BASEL, ISSN 2076-3417.
- NOSEK, R. et al. 2020a. Investigation of Pellet Properties Produced from a Mix of Straw and Paper Sludge, APPLIED SCIENCES-BASEL, ISSN 2076-3417.
- NOSEK, R. et al. 2020b. Energy Utilization of Spent Coffee Grounds in the Form of Pellets, ENERGIES, ISSN 1996-1073.
- NOSEK, R. et al. 2017. Analysis of Paper Sludge Pellets for Energy Utilization, Bioresources, 2017, Volume: 12, Issue: 4, Pages: 7032-7040.
- OBERNBERGER, I. et. al. 2006. Chemical properties of solid biofuels – significance and impact. In Biomass and Bioenergy. ISSN 0961-9534, 2006
- OVERGAARD, P. et al. 2005. Full-scale tests on co-firing of straw in a natural gas-fired boiler [online]. 2005. [cit. 2018-30-03]. Dostupné na internete:
<citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.561.1803&rep=rep1&type=pdf>
- PEDERSEN, L. S. et al. 1996. Full-scale co-firing of straw and coal [online]. 1996. [cit. 2019-02-27]. Dostupné na internete:
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236196826421>>
- PEPICH, Š. 2010. Využitie poľnohospodárskej biomasy na energetické účely a jej vplyv na trvalo udržateľný rozvoj [online]. Rovinka : Technický a skúšobný ústav pôdohospodársky, 2010. [cit. 2019-04-27]. Dostupné na internete:
<http://www.tsup.sk/files/vyuzitie_poln.biomasy_na_energet.ucely.pdf>
- PEPICH, Š. 2012. Teploty tavitelnosti popola slamy [online]. Rovinka : Technický a skúšobný ústav pôdohospodársky, 2012. [cit. 2019-01-16]. Dostupné na internete:
<http://www.abe.sk/casopis/clanky/Teploty_tavitelnosti.pdf>
- PORVAZ, P. a kol. 2010. Poľné plodiny ako zdroj biomasy na energetické využitie v podmienkach Slovenska [online]. 2010. [cit. 2018-11-28]. Dostupné na internete:
<http://enersupply.euke.sk/wp-content/uploads/66-75_porvaz-nascakova-kotorova-kovac.pdf>
- ROBINSON, A. L. et al. 1998. Interactions between coal and biomass when cofiring [online]. 1998. [cit. 2019-03-12]. Dostupné na internete:
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0082078498805407>>
- SHAO, Y. et al. 2012. Ash Deposition in Biomass Combustion or Co-Firing for Power/Heat Generation, ISSN 1996-1073, Energies 2012, 5, 5171-5189

STELTE, W. et al. 2012. Recent developments in biomass pelletization – a review. In BioResources. ISSN 1930-2126, vol. 7, no. 3, p. 4451-4490

STN EN ISO 17225-1:2015 Tuhé biopalivá. Špecifikácie a triedy palív. Časť 1: Všeobecné požiadavky

STN EN ISO 17225-6:2014 Tuhé biopalivá. Špecifikácie a triedy palív. Časť 6: Triedené nedrevné pelety

STRAKA, Ľ. 2009. Energetické využitie fytomasy pestovanej na Slovensku. [online]. 2009. [cit. 2019-01-19]. Dostupné na internete:

<<https://biom.cz/cz/odborne-clanky/energeticke-vyuzitie-fytomasy-pestovanej-na-slovensku>>. ISSN 1801-2655.

STUPAVSKÝ, V. – HOLÝ, T. 2010. Brikety z biomasy - drevěné, rostlinné, směsné brikety [online]. 2010. [cit. 2019-01-15]. Dostupné na internete:

<<https://biom.cz/cz/odborne-clanky/brikety-z-biomasy-drevene-rostlinne-smesne-brikety>>. ISSN 1801-2655.

SUGATHAPALA, A. 2013. Technologies for Converting Waste Agricultural Biomass to Energy [online]. 2013. [cit. 2019-04-17]. Dostupné na internete:

<<http://www.mag.go.cr/proyectos/proy-residuos-agricolas-org/materiales/Tecnologies%20for%20convertin%20wab%20to%20energy.pdf>>

ŠOOŠ, Ľ. 2012. Výskum progresívnych konštrukcií zhutňovacích strojov [online]. 2012. [cit. 2019-03-21]. Dostupné na internete:

<<https://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyskum-progresivnych-konstrukcii-zhutnovacich-strojov>>. ISBN 978-80-214-4027-2

ŠOOŠ, Ľ. – MATÚŠ, M. – KRIŽAN, P. 2010. Progresívne technológie pre produkciu tuhých biopalív [online]. 2010. [cit. 2019-02-28]. Dostupné na internete:

<http://www.enef.eu/pdf/2010_154.pdf>

ŠOOŠ, Ľ. 2006. Profity a úskalia výroby ušľachtilých biopalív [online]. 2006. [cit. 2019-02-29]. Dostupné na internete:

<<https://biom.cz/cz/odborne-clanky/profity-a-uskalia-vyroby-uslachtilych-biopaliv>>. ISSN 1801-2655.

ŠOOŠ, Ľ., a kol. 2016. Možnosti zhodnocovania papierenských kalov. Bratislava : SSTP Bratislava, 2016. ISBN 978 - 80 - 89216 - 87 - 1.

ŠOOŠ, Ľ., KOLEJÁK, M., URBAN, F. 2012. Biomasa - obnoviteľný zdroj energie. Bratislava : Vydavateľstvo VERT, 2012. ISBN 978-80-970957-3-4.

- ZEQIONG, X. – MA, X. 2013a. The thermal behaviour of the co-combustion between paper sludge and rice straw. [online]. 2013, [cit. 2016-05-05]. Dostupné na internete: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852413011954>>
- ŽIDEK, L. a kol. Vykurovanie drevnými peletami, BIOMASA, združenie právnických osôb, Považská Bystrica : UNIPRINT, 2006, ISBN 80-969465-8-7.
- THEEARTHPROJECT.COM. 2018. [online]. 2018. [cit. 2019-01-27]. Dostupné na internete: <<https://theearthproject.com/biofuels/>>
- THEIS, M. et al. 2006. Fouling tendency of ash resulting from burning mixtures of biofuels. Part 1: Deposition rates [online]. 2006. [cit. 2019-03-04]. Dostupné na internete: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236105003960>>
- TUMULURU, J. S. et al. 2010. A Review on Biomass Densification Technologies for Energy Application [online]. 2010. [cit. 2019-02-12]. Dostupné na internete: <<https://pdfs.semanticscholar.org/305d/4fb8d8c782e40caa96847d555e02159b9c74.pdf>>
- VARNERO, C. S. – URRUTIA, M. V. 2017. Power form agripellets [online]. 2017. [cit. 2019-01-14]. Dostupné na internete: <<https://www.intechopen.com/books/frontiers-in-bioenergy-and-biofuels/power-form-agripellets>>
- VASSILEV, S. et al. 2010. An overview of the chemical composition of biomass [online]. 2010. [cit. 2018-12-04]. Dostupné na internete: https://www.researchgate.net/publication/223835531_An_overview_of_the_chemical_composition_of_biomass
- VAN LOO, S., KOPPEJAN, J. 2008. The handbook of biomass combustion and CO-firing.: Routledge; 1 edition (July 2, 2008), 2008. ISBN 978-1849711043.
- WANG, L. et al. 2012. A Critical Review on Additives to Reduce Ash Related Operation Problems in Biomass Combustion Applications [online]. 2012. [cit. 2019-03-19]. Dostupné na internete: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610212007345>>

Názov	VPLYV PRÍDAVNÝCH LÁTOK NA TEPLITU TAVITEENOSTI POPOLA A EMISIÍ TUHÝCH ČASTÍC PRI SPAĽOVANÍ FYTOMASYV
Autor	doc. Ing. Radovan Nosek, PhD.
Druh publikácie	tézy inauguračnej prednášky
Vydal	EDIS-vydavateľské centrum Žilinskej univerzity
Vydanie	prvé
ISBN	978-80-554-1807-0

doc. Ing. Radovan Nosek, PhD.

Je absolventom Strojníckej fakulty Žilinskej univerzity v Žiline (SjF UNIZA) a po ukončení inžinierskeho štúdia nastúpil na doktorandské štúdium. V rámci doktorandského štúdia absolvoval vedeckú stáž Marie Curie Research Training Network v Poľsku (2007-2009). Z toho dôvodu bol pod vedením dvoch školiteľov a navyše splnil kritériá „európskeho doktorátu - European Doctorate“. Na Katedre energetickej techniky od akademického roku 2009 a odvtedy bol vedúcim 1 dizertačnej práce, 12 diplomových a 7 bakalárskych prác. Bol oponentom 7 bakalárskych prác, 4 diplomových prác a 4 dizertačných prác. Od roku 2012 sa ako člen zúčastňuje štátnych skúšok študijného programu Energetická a environmentálna technika bakalárskeho štúdia a od roku 2012 ako člen zúčastňuje štátnych skúšok študijného programu Technika prostredia inžinierskeho štúdia.

V rámci svojej činnosti sa zaoberá problematikou tuhých znečisťujúcich látok, vplyvom podmienok spaľovania na ich tvorbu, meraním zdrojov tepla na spaľovanie biomasy, zlepšovanie vlastností drevných peliet, alternatívnymi energetickými zdrojmi na báze MHD efektu, výskum v oblasti spätné získavanie tepla a tepelných trubíc. Na Žilinskej univerzite vedie prednášky, cvičenia z rôznych technických disciplín: mechanika tekutín, metódy ochrany ovzdušia a termodynamika. Podieľa sa na tvorbe študijných materiálov a učebných materiálov. Má viac ako 8 rokov skúseností s prípravou a riadením národných ako aj medzinárodných projektov (Interreg, VEGA, KEGA, APVV, EkoFOND). Podieľal sa na viac ako 20 projektoch a spolupráci s priemyslom (GoodTech Recovery - Nórsko, Triple D Bending - Kanada, HT design - Slovensko). Riešil úlohy pre potreby praxe, napr. „Výskum využitia odpadového tepla pre výrobu elektrickej energie“; „Výskum návrhu tepelnej trubice a pripojenia Stirlingovho motora alebo iného procesu - základný koncept“; Test - Tepelná trubica v tekutom hliníku“; Goodtech, Nórsko.

Zúčastnil sa a prezentoval vedecké výsledky na medzinárodných podujatiach (napr. European Combustion Meeting 2009 - Viedeň, Rakúsko; Optimization using Exergy-based Methods and Computational Fluid Dynamics 2009 - Berlín, Nemecko; Global Conference on Power Control and Optimization 2010 - Kuching, Malajzia. ; American Advanced Materials Congress 2016 - Miami, USA; vyžiadaná plenárna prednáška na PIM 2017, Rumunsko; ICAMEM 2018 - Bangkok, Thajsko).

Bol recenzentom pre nasledujúce medzinárodné časopisy: Energy & Fuels, Energies, Applied Sciences Applied Thermal Engineering, Renewable Energy Sources, Structure and environment, Agronomy Research, Journal of the Energy Institute, The Holistic Approach to Environment, Infrastructure and Ecology of Rural Areas.

doc. Ing. Radovan Nosek, PhD. sa aktívne zúčastňuje na obnove stávajúcich a budovaní nových laboratórií na Katedre energetickej techniky a vo Výskumnom centre Žilinskej univerzity. Na prístrojovom vybavení sa podieľa formou podávania projektov a participáciou na riešení projektov.

Výsledky svojej vedecko-výskumnej činnosti publikoval v 13 CC zahraničných časopisoch, má 32 vedeckých prác evidovaných v databáze WoS, 35 publikácií evidovaných v databáze SCOPUS a 1 vedeckú monografiu v zahraničnom vydavateľstve (AAA). Citačný ohlas na uverejnené články je h-index = 9 vo WoS a h-index = 9 v Scopus.

Je spoluautorom 2 vysokoškolských skript, 1 vysokoškolskej učebnice, 3 vedeckých monografií vydaných v domácom vydavateľstve a 1 odbornej knižnej publikácie.