



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

PELETY S PŘÍDAVKEM PAPÍRU A JEJICH SPALOVÁNÍ

COMBUSTION OF PAPER PELLETS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

František Veselý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Lisý, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **František Veselý**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Martin Lisý, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Pelety s přídavkem papíru a jejich spalování

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce bude provést rešerši palivových vlastností a peletování směsných pelet s přídavkem papírenského kalu a podmínek jejich spalování, provést základní palivové rozbory a také palivové zkoušky. Výsledky porovnat s palivy využívajících přídavku papírenského kalu.

Cíle bakalářské práce:

Zpracovat rešerši energetických vlastností vybraných směsných pelet s přídavkem papírenského kalu nebo papíru.

Stanovit základní palivové vlastnosti dodaných vzorků.

Provést základní spalovací zkoušky.

Seznam doporučené literatury:

BUDAJ, Florian: Tepelný výpočet kotle, VUT Brno 1983

BALÁŠ, Marek: Kotle a výměníky tepla, Brno 2009, ISBN 978-80-214-3955-9

DLOUHÝ, Tomáš: Výpočty kotlů a spalinových výměníků, ČVUT v Praze, 2007, ISBN 978-80--1-03757-7

JANDAČKA, Jozef a kol.: Biomasa ako zdroj energie. Žilina 2008, ISBN 978-80-969161-3-9

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá spalováním pelet z pšeničné slámy s příměsí papírenského kalu. Práce je rozdělena na dvě části. První část se zabývá teorií spalování a vlastnostmi pelet s příměsí papírenského kalu. Druhá část popisuje provedené spalovací zkoušky a naměřené vlastnosti pelet s příměsí papírenského kalu.

Klíčová slova

Pelety, biopalivo, sláma, papír, papírenský kal, spalování, emise,

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with combustion of pellets of wheat straw with papermaking sludge additive. The work is divided into two main parts. The first part deals with theory of combustion and pellets. The second part is experimental and describes combustion test and measurements.

Key words

Pellets, biofuel, wheat straw, paper, papermaking sludge, combustion, emissions

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VESELÝ, František. *Pelety s přidavkem papíru a jejich spalování* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116895>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Martin Lisý. s. 40

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Pelety s přídavkem papíru a jejich spalování**, vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

22. května 2019

.....
Datum

František Veselý

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. M. Lisému, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce, dále Ing. H. Lisé, Ph.D. a Ing. O. Štelcovi za odborný dohled při provádění palivového rozboru a spalovacích zkoušek.

OBSAH

1	ÚVOD.....	11
2	Spalování	12
	2.1 Statika spalování	12
	2.1.1 Dokonalé spalování	12
	2.1.2 Nedokonalé spalování	12
	2.1.3 Spalování za přebytku vzduchu.....	13
	2.2 Dynamika spalování	13
	2.2.1 Difuzní spalování	13
	2.2.2 Kinetické spalování	14
3	Palivo.....	15
	3.1 Základní dělení paliv	15
	3.1.1 Biopaliva	15
	3.1.2 Odpadní paliva	15
4	Palivový rozbor tuhých paliv.....	16
	4.1 Prvkový rozbor	16
	4.2 Hrubý rozbor.....	16
	4.2.1 Voda v palivu	17
	4.2.2 Popelovina v palivu.....	17
	4.2.3 Hořlavina v palivu.....	17
	4.3 Spalné teplo a výhřevnost	17
5	Pelety	19
	5.1 Dělení.....	19
	5.1.1 Dřevní pelety.....	19
	5.1.2 Alternativní pelety.....	20
	5.2 Výroba	20
6	Pelety z pšeničné slámy s přídavkem papírenského kalu	22
	6.1 Pšeničná sláma	22
	6.2 Papír a papírenský kal.....	22
	6.3 Vlastnosti	22
	6.3.1 Prvkové složení	23
	6.3.2 Obsah vody.....	23
	6.3.3 Obsah popela.....	23
	6.3.4 Spalné teplo a výhřevnost	24
	6.3.5 Teplota tavení popela	24
7	Palivový rozbor dodaných vzorků.....	25
	7.1 Obsah vody	25
	7.2 Popelovina v palivu	26

7.3	Spalné teplo a výhřevnost.....	27
8	Spalovací zkoušky dodaných vzorků.....	30
8.1	Emise CO, NO.....	30
8.2	Tuhé znečišťující látky (TZL).....	34
9	ZÁVĚR.....	35
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	36
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	38
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	39
	SEZNAM TABULEK.....	40

1 ÚVOD

V dnešní době je kladen velký důraz udržování čistoty životního prostředí. Jedním z možných způsobů alespoň částečného plnění tohoto cíle je snižování spotřeby fosilních paliv. Hledání alternativy je žádoucí také z důvodu omezeného množství těchto zdrojů. Pelety mohou sloužit jako kvalitní, ekologická a cenově dostupná náhrada těchto paliv.

V zahraničí i u nás se pelety postupně dostávají do povědomí veřejnosti, a tím o ně roste zájem. Nejvíce rozšířené jsou pelety dřevní (pro malé kotle např. v domácnostech nemá prakticky o jiném druhu smysl uvažovat), avšak v průmyslu mohou najít uplatnění pelety mnoha různých typů. Jedním takovým typem je směs pšeničné slámy a papírenského kalu. Příměs papírenského kalu má pozitivní vliv na teplotu tavení popela, která hraje významnou roli při spalování (pokud tuto teplotu překročíme, dochází k snižování účinnosti a životnosti kotle). I přes to, že má odpad z výroby papíru mnoho různých využití, stále jeho produkce převyšuje jeho spotřebu. Nespotebovaný odpadní papír a papírenský kal často končí na skládkách a po rozkladu uvolňují škodlivé skleníkové plyny. Proto vznikla i tato práce, jejímž cílem je ověřit využití papírenského kalu jako příměsí pelet.

První část práce se zabývá teorií spalování a vlastnostmi surovin vzorků dodaných ke spalovacím zkouškám. V části druhé je potom popsán průběh rozboru paliva a spalovacích zkoušek dodaných pelet.



Obrázek 1 – Pelety ze pšeničné slámy a papírenského kalu (poměr složek 90:10)

2 Spalování

„Hoření je fyzikálně-chemický děj slučování hořlaviny s okysličovadlem, při němž probíhající chemická reakce je doprovázena za světelného efektu vývinem tepla, chemicky vázaného v palivu.“ [1] Chemické procesy během spalování jsou oxidační a redukční pochody. Mezi fyzikální procesy patří například mísení proudů vzduchu nebo výměna tepla.

Palivem rozumíme látky, ze kterých se uvolňuje teplo rozbíjením vnitřních chemických vazeb a reakcí s okysličovadlem. Palivu je v této práci dále věnována samostatná kapitola.

Okysličovadlo je směs, která obsahuje kyslík. Při výběru okysličovadla nehledíme pouze na podíl kyslíku, ale také na dostupnost (cenu). Nejčastěji se jedná o obyčejný vzduch (obsahuje přibližně 21 % obj. kyslíku), ovšem existují případy, kdy je třeba vyšší koncentrace kyslíku (např. raketové motory) [2].

V závislosti, zda musíme teplo do procesu dodávat, reakce rozdělujeme na endotermické (teplo musíme v průběhu celého děje přivádět) a exotermické (teplo se při hoření uvolňuje). Spalování můžeme rozdělovat také podle toho, zda probíhá za konstantního tlaku (izobarický děj – je nejčastější) nebo za konstantního objemu (izochorický děj) [1], [2].

Aby děj hoření započal, je nejprve nutné dodat tzv. slučovací teplo (teplo potřebné k rozbití vazeb mezi atomy paliva i okysličovadla). Hoření probíhá na atomární úrovni a část uvolněné energie je využita, aby docházelo k řetězové reakci. V průběhu hoření dochází k snižování celkové energie soustavy palivo – okysličovadlo (k růstu entropie soustavy) [3].

Teorii spalování můžeme rozdělit na statiku a dynamiku spalování.

2.1 Statika spalování

Statika spalování se obecně zabývá hořením bez závislosti na čase a prostoru. Zabývá se kvantitativním popsáním procesu – určení množství produktů reakce v závislosti na látkách vstupujících do reakce. Tyto údaje se využívají pro základní návrh spalovacích zařízení. Konkrétně můžeme určovat např. objem potřebného spalovacího vzduchu, objem a složení spalin, či entalpii produktů spalování a uvolněné teplo [2].

Vycházíme z ideálního slučovací poměru, kdy se palivo a okysličovadlo při hoření přemění beze zbytku – tzv. stechiometrický poměr.

2.1.1 Dokonalé spalování

Při dokonalém spalování dochází k oxidaci uhlíku na oxid uhličitý, vodíku na vodu a síry na oxid siřičitý. Při všech třech procesech se uvolňuje teplo (Q_C , Q_{H_2} , Q_{S^*}). Při dokonalém spalování platí stechiometrické vzorce [2].



2.1.2 Nedokonalé spalování

Při nedokonalém spalování se nepřemění všechny uhlík na oxid uhličitý (palivo na konečné produkty), vzniká oxid uhelnatý. Oxid uhelnatý (popř. nepřeměněné řetězce C_xH_y) odchází jako složka spalin z prostoru hoření. Při nedokonalém spalování se v poměru k dokonalému spalování spotřebuje pouze polovina množství kyslíku [2].



Tvorba CO závisí také na teplotě ve spalovací komoře a množství CO je omezeno emisními limity. Hlavní nevýhodou je neúplné uvolnění energie v palivu (toto spalování je méně efektivní nežli dokonalé spalování), a proto se snažíme nedokonalému spalování vyhýbat [3].

2.1.3 Spalování za přebytku vzduchu

Protože nedochází u pevných a kapalných látek k dokonalému promíchání paliva a okysličovadla, aby nedocházelo ke spalování nedokonalému, musíme dodávat větší množství vzduchu, než je teoretické. Součinitel přebytku vzduchu se v rámci spalovací soustavy mění, a proto záleží, ke kterému místu tento součinitel vztahujeme.

Množství přebytku vzduchu označujeme koeficientem α , který vyjadřuje množství vzduchu skutečně přivedeného v poměru k množství teoretickému [2].

$$\alpha = \frac{V_{vz sk}}{V_{vz min}} \quad (5)$$

Optimální hodnoty přebytku vzduchu na konci ohniště (α_0) bývají [2, s. 32]:

- u roštových ohnišť 1,25-1,50
- u práškových ohnišť 1,15-1,20
- u fluidních ohnišť 1,25-1,40 (ve fluidní vrstvě však $\alpha_0 < 1$)
- u ohnišť na kapalná paliva 1,05-1,15
- u ohnišť na plynná paliva 1,05-1,10

2.2 Dynamika spalování

Dynamika spalování sleduje rychlost a průběh reakce spalování v prostoru a čase. Protože je spalování složeno z fyzikálních a chemických procesů, podle převládajícího vlivu těchto procesů dělíme spalování na difuzní a kinetické [2],

$$\tau_c = \tau_f + y \cdot \tau_{ch} \quad [s] \quad (6)$$

kde τ_c [s] je celková doba hoření

τ_f [s] je doba fyzikálních dějů – doba potřebná k promísení paliva a okysličovadla,

τ_{ch} [s] je doba chemických reakcí – doba hoření,

y [-] součinitel vyjadřující překryv obou dějů.

2.2.1 Difuzní spalování

Pokud je doba fyzikálních procesů (míšení) podstatně delší než doba chemických reakcí, mluvíme o difuzním spalování. Celková doba hoření přibližně odpovídá době fyzikálních procesů.

$$\tau_f \gg \tau_{ch} \rightarrow \tau_f \cong \tau_c \quad (7)$$

Typickým příkladem difuzního spalování je spalování v roštových kotlích. Difuzní spalování můžeme dále dělit na homogenní nebo heterogenní, podle toho, zda se palivo a okysličovadlo nacházejí ve stejné fázi. Příkladem heterogenního spalování je povrchová reakce povrchu zrn tuhého paliva s kyslíkem obsaženým ve vzduchu [2].

Při difuzním spalování hrají významnou roli tyto fyzikální děje [2]:

- charakter proudění paliva a vzduchu,
- turbulence,
- koncentrace paliva, kyslíku a inertních plynů,
- tvar a rozměry ohniště,
- výměna tepla mezi stěnami ohniště a proudem hořlavé směsi.

2.2.2 Kinetické spalování

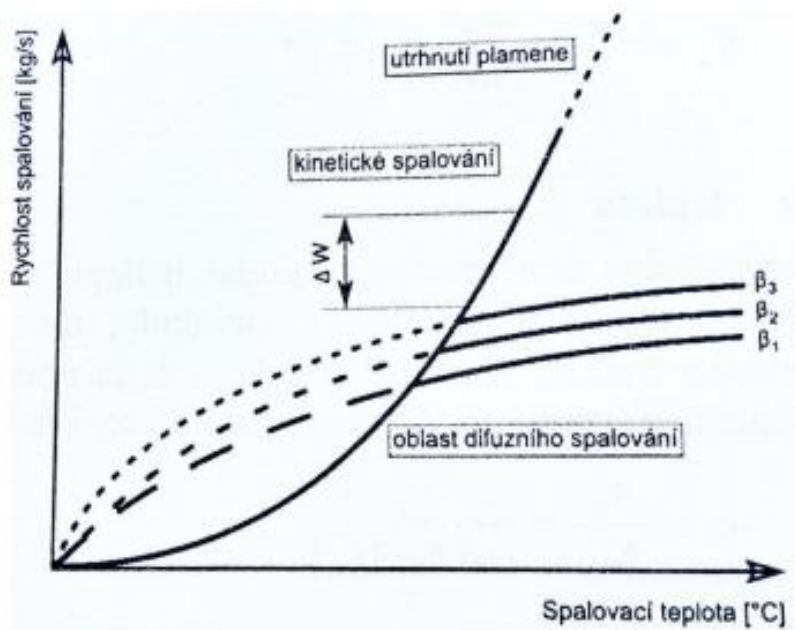
Při kinetickém spalování je doba fyzikálních procesů podstatně kratší než doba procesů chemických. Celková doba hoření přibližně odpovídá době chemických reakcí [2].

$$\tau_f \ll \tau_{ch} \rightarrow \tau_{ch} \cong \tau_c \quad (8)$$

Typickým příkladem je spalování plynného paliva, které se smísí se vzduchem ještě před vstupem do spalovací komory (motory letadel, automobilů).

Faktory ovlivňující rychlost kinetického spalování jsou [2]:

- Koncentrace reagujících látek
- Teplota
- Tlak
- Přítomnost katalyzátoru



Obrázek 2 – Graf dynamického spalování [2]

3 Palivo

„Palivem lze nazývat libovolnou látku, která buď obsahuje nebo může uvolňovat elementární hořlavou látku v atomárním stavu.“ [3, s. 15] Palivo lze také charakterizovat těmito znaky – dostatečně vysokým měrným vývinem tepla, dostatečnou schopností začít hořet na vzduchu a dobrou dostupností k hromadnému využití.

Nejdůležitější elementární hořlavinou je uhlík, protože všechna průmyslová přírodní paliva jsou tvořena organickými sloučeninami, které obsahují uhlík ve velkých koncentracích. Mnoho jiných prvků vyvíjí při oxidaci více měrného tepla nežli uhlík, ovšem nejsou dostupné v dostatečné míře a z ekonomického hlediska jsou tak nevyhovující jako organická paliva. Dalším velmi důležitým prvkem je vodík, neboť je také obsažen v každém organickém palivu, i když v menším množství než uhlík. Častou příměsí základních druhů paliva je síra, která také oxiduje (uvolňuje teplo), ale jen v malém množství, ta je ovšem považována za nežádoucí, protože zvyšuje rosný bod a snižuje charakteristické teploty popela. Pokud je teplota popela pod teplotou rosného bodu, dochází k tzv. nízkoteplotní korozi (H_2O reaguje s S_2 za vzniku H_2SO_4).

3.1 Základní dělení paliv

Paliva můžeme dělit podle několika základních kritérií (např. skupenství, původu).

Dělení podle skupenství [2]:

- Tuhá
- Kapalná
- Plynná

Dělení podle původu [2]:

- Fosilní (neobnovitelné) – uhlí, ropa, zemní plyn
- Obnovitelné – biopaliva
- Odpadní

Pelety, o kterých pojednává tato práce, spadají do skupiny tuhých paliv (podle skupenství) a obnovitelných a odpadních paliv (podle původu). Proto jsou dále rozvedeny pouze tyto skupiny.

3.1.1 Biopaliva

Biopalivo je palivo vyrobené z biomasy. Za biomasu je považována jakákoli hmota organického původu (živočišného nebo rostlinného). Biomasu lze získat záměrným pěstováním (např. dřevo, řepka) nebo zpracováním odpadních produktů (sláma, odpad z lesní těžby, odpady ze živočišné výroby).

Jako biopalivo z dřevní biomasy se používá kusové dříví, brikety, štěpka, pelety, hobliny a piliny [2], [4].

3.1.2 Odpadní paliva

Jedná se o paliva vzniklá jako vedlejší produkt lidské činnosti. Dělí se na komunální a průmyslové odpady. Jako příklad můžeme uvést domovní a živnostenské odpady, čistírenské kaly, odpady z textilního nebo papírenského průmyslu [2].

4 Palivový rozbor tuhých paliv

Mezi tuhá paliva patří uhlí (nejrozšířenější), biomasa a odpady (komunální, zemědělské a průmyslové).

Hlavním faktorem ovlivňujícím vlastnosti paliv je jejich složení. Složení tuhých paliv můžeme určovat dvěma základními metodami [2], [5], [6]:

- Hrubým rozbořem
- Prvkovým rozbořem

Kromě určení složení můžeme sledovat také další fyzikální a chemické vlastnosti paliv, jako např. [6], [7]:

- Sypná hustota
- Mechanická odolnost
- Tvrdost
- Teplota tavení
- Rosný bod spalin a koroze

4.1 Prvkový rozbor

Stanovení prvků obsažených v palivu se řídí normami – pro komplexní rozbor je třeba použití více metod (nelze určit celkové prvkové složení pomocí pouze jedné metody). Jako příklad můžeme uvést ČSN P CEN/TS 15104 (pro stanovení N, C, H), ČSN P CEN/TS 15289 (pro stanovení S a Cl) a ČSN P CEN/TS 15297 (pro stanovení těžkých kovů). Prvky můžeme rozdělit také podle toho, v jakém množství se nachází v palivu na: hlavní (> 1 %), vedlejší (0,1 – 1 %) a stopové (< 0,1 %) [6], [8].

4.2 Hrubý rozbor

Hrubým rozbořem se určuje poměrný obsah hořlaviny (h), vody (W^r) a popeloviny (A^r) obsažených v palivu (index r značí palivo v surovém stavu) [2], [9].

$$h + A^r + W^r = 100\% \quad (9)$$

	← Surové palivo →		
přimísená voda	voda W^r	popeloviny A^r	hořlavina h
	přítěž (balast)		prchavý podíl tuhý podíl
	bezvodé palivo (sušina)		
spálením vznikne:			
vodní pára	tuhé zbytky – škvára (struska), popílek	spaliny	

Tabulka 1 – Hrubý rozbor paliv [9]

4.2.1 Voda v palivu

Ve většině tuhých paliv se nachází voda. Má negativní dopad při dopravě paliva i během spalování. Snižuje výhřevnost paliva, snižuje spalovací teplotu (pohlčením části uvolněného tepla), odchází spolu se spalinami (jako vodní pára) a zvětšuje jejich objem a zvyšuje komínovou ztrátu [2].

V palivu je voda vázána různými způsoby [10], [2]:

- Voda přimísená
- Povrchová voda
- Chemicky vázaná
- Kapilárně vázaná (zbytková)
- Hrubá voda
- Volná voda
- Veškerá voda

4.2.2 Popelovina v palivu

Jako popelovinu označujeme minerální látky (křemičitany, uhličitany atd.) v tuhém palivu před jeho spálením. Při spalování se stává z popeloviny popel. Dalším zdrojem popela mohou být nečistoty přimísené např. v průběhu těžby nebo dopravy (hlína, písek, kamení) [2]. Popel se dále rozděluje na strusku, škváru a popílek. Struska vzniká při teplotách vyšších, než je teplota tečení paliva. Škvára vzniká při teplotách, při kterých nastalo spékání a tavení minerálních částic ve větší kusy. Popílek jsou drobné minerální částice unášené spalinami [5].

4.2.3 Hořlavina v palivu

Hořlavina je část paliva, která v sobě váže teplo, které se uvolňuje během procesu hoření. V tuhých palivech se skládá především z pěti prvků – uhlíku, vodíku, síry, dusíku a kyslíku. Dělí se na prchavou a neprchavou [2].

Velmi důležitou součástí hořlaviny je prchavá hořlavina. Uvolňuje se při teplotách nad 250 °C a hraje důležitou roli při vzněcování paliva a stabilizaci procesu hoření. V biopalivech tvoří přibližně 80 % celkové obsažené hořlaviny.

Prchavá hořlavina se stanovuje z úbytku hmotnosti po sedmi minutách žihání v uzavřeném kelímku při teplotě 850 °C (ČSN EN 15402 apod.) [11]

4.3 Spalné teplo a výhřevnost

„Spalné teplo Q_s [$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$] je teplo uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na 20 °C, přičemž voda ve spalinách zkondenzuje, tj. je v kapalně fázi.“ [2, s. 17]

Spalné teplo se určuje laboratorně. Jednou z metod je tzv. kalorimetrická metoda, která je popsána v normě ČSN ISO 1928. Kalorimetr (nejčastěji s kyslíkovou atmosférou) je ponořen do vodní lázně. Po spálení paliva se přenesení spalné teplo z kalorimetru do vodní lázně a z jejího oteplení vypočítáme spalné teplo podle vzorce [12], [2]:

$$Q_s = \frac{V \cdot \Delta T}{G} [\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}] \quad (10)$$

Kde V [kJ.K⁻¹] vodní hodnota kalorimetru
G [kg] hmotnost paliva

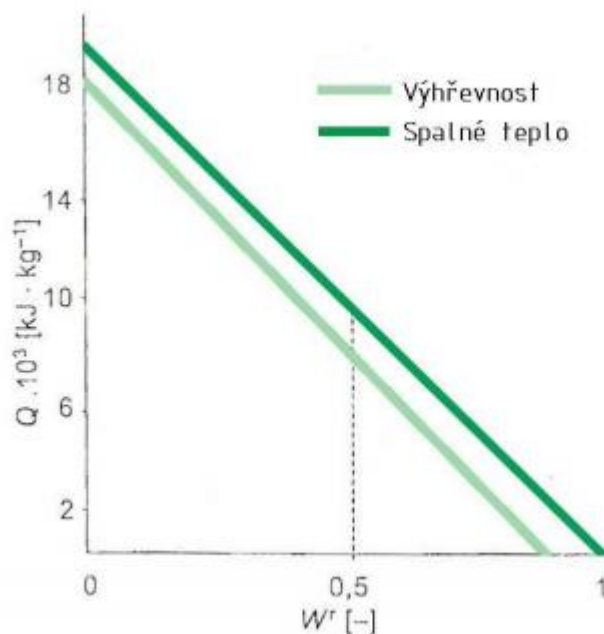
„Výhřevnost Q^r [$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$] je teplo uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na 20°C , přičemž voda ve spalinách zůstane v plynné fázi.“ [2, s. 17]
Je to tedy spalné teplo zmenšené o výparné teplo množství vody obsažené ve spalinách.

$$Q^r = Q_s - r \cdot (W^r + 8,94 \cdot H_2) \quad (11)$$

kde W^r [-] obsah vody v palivu
 r [$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$] výparné/kondenzační teplo vody, $r = 2454 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
 H_2 [-] obsah vodíku v surovém palivu (z 1 kg vodíku vznikne 8,94 kg vody)

Výhřevnost paliva lze také počítat z empirických vzorců (z hrubého nebo prvkového rozboru). Nejpoužívanější vzorce jsou Dulongův (vhodný především pro geologicky starší paliva), Vondráčkův a Mendělejevův.

Hodnoty výhřevnosti se mohou významně lišit v závislosti na vlhkosti materiálu.



Obrázek 3 – Závislost spalného tepla a výhřevnosti na obsahu vody [13]

5 Pelety

Pod názvem peleta rozumíme těleso, nejčastěji kuličkového nebo válečkovitého tvaru, relativně malých rozměrů (průměru a délky přibližně do 5 cm) a libovolného materiálu. Za účelem spalování se vyrábí pelety především z tuhých biopaliv. Podle konkrétního složení se mohou lišit výhody a nevýhody různých pelet (např. cena, ekologičnost, množství popela, výhřevnost atd.). Všechny pelety z tuhých biopaliv ovšem mají dvě velké výhody společné. Jedná se o obnovitelný zdroj a proces spalování je možné z velké části (někdy až plně) automatizovat.

Pro tuhá biopaliva existuje v České republice sedm norem ČSN EN ISO 17225. Norma ČSN EN ISO 17225-1 pojednává o základním dělení tuhých biopaliv (dřevní, bylinná, ovocná a vodní). S peletami dále souvisí norma ČSN EN ISO 17225-2, která stanovuje vlastnosti pro dřevní pelety, a norma ČSN EN ISO 17225-6, která stanovuje vlastnosti pelet alternativních.

Pro využití v praxi je důležité rozlišovat pelety pro menší spalovací zařízení (do výkonu 500 kW) např. v domácnostech a pro průmyslová zařízení. Podle tohoto dělení (v normě značené jako třídy A a B) se rozlišuje přísnost emisních limitů a dalších vlastností pelet. Obecně platí, že pelety používané v domácnostech vyžadují přísnější normy (obsluha není vyškolená, spalovací zařízení často neodpovídají nejnovějším regulacím) [14], [15], [16].

5.1 Dělení

Jak již bylo napsáno výše, norma rozděluje pelety do dvou základních skupin [4]:

- Dřevní
- Alternativní

5.1.1 Dřevní pelety

Můžeme je dále dělit na [4], [17]:

- Bílé (vyrobené z čisté dřevní hmoty)
- Tmavé (obsahují dřevní hmotu a **kůru**)

Čistá dřevní hmota má při spalování podstatně lepší vlastnosti než alternativní zdroje, avšak existují ekonomicky výhodnější způsoby zpracování dřeva (např. výroba papíru, stavební průmysl). Proto se pro výrobu pelet využívá hlavně dřevní odpad ve formě pilin, štěpky, popř. kůry [17]. V tab. 2 jsou vybrány hodnoty některých vlastností dle ČSN EN ISO 17225-1.

Vlastnosti	Značka	Jednotka	A1	B
Délka	L	[mm]	$3,15 \leq L \leq 40$	$3,15 \leq L \leq 40$
Průměr	D	[mm]	D06, D08	D06, D08
Voda	M	[% hm.]	$M10 \leq 10$	$M10 \leq 10$
Popel	A	[% hm.]	$A0.7 \leq 0,7$	$A2.0 \leq 2,0$
Mech. Odolnost	DU	[% hm.]	$DU97.5 \geq 97,5$	$DU96.5 \geq 96,5$
Jemné částice	F	[% hm.]	$F1.0 \leq 1,0$	$F1.0 \leq 1,0$
Příspěvy	–	[% hm.]	≤ 2	≤ 2
Výhřevnost	Q ^f	[MJ/kg]	$Q16.5 \geq 16,5$	$Q16.5 \geq 16,5$
Sypná hmotnost	BD	[kg/m ³]	$BD600 \geq 600$	$BD600 \geq 600$
Dusík	N	[% hm.]	$N0.3 \leq 0,3$	$N1.0 \leq 1,0$
Síra	S	[% hm.]	$S0.04 \leq 0,04$	$S0.05 \leq 0,05$

Tabulka 2 –vlastnosti dřevních pelet [15]

5.1.2 Alternativní pelety

Můžeme je opět rozdělit do více skupin [4]:

- Zemědělské pelety z tuhých biopaliv

Jsou vyrobené ze zemědělských surovin (řepkové a obilné slámy, odpadů po čištění obilnin, energetických rostlin např. ozdobnice, šťovík). V tab. 3 jsou vybrané limity některých vlastností popsané v normě ČSN EN ISO 17225-6.

Vlastnosti	Značka	Jednotka	A	B
Délka	L	[mm]	$3,15 \leq L \leq 40$	$3,15 \leq L \leq 40$
Průměr	D	[mm]	D06, D08	D06, D08
Voda	M	[% hm.]	$M12 \leq 12$	$M15 \leq 15$
Popel	A	[% hm.]	$A6.0 \leq 6$	$A10 \leq 10$
Mech. Odolnost	DU	[% hm.]	$DU97.5 \geq 97,5$	$DU96.0 \geq 96,0$
Jemné částice	F	[% hm.]	$F2.0 \leq 2,0$	$F3.0 \leq 3,0$
Přísady	–	[% hm.]	≤ 5	≤ 5
Výhřevnost	Q ^r	[MJ/kg]	$Q14.5 \geq 14,5$	$Q14.5 \geq 14,5$
Sypná hmotnost	BD	[kg/m ³]	$BD600 \geq 600$	$BD600 \geq 600$
Dusík	N	[% hm.]	$N1.5 \leq 1,5$	$N2.0 \leq 2,0$
Síra	S	[% hm.]	$S0.20 \leq 0,20$	$S0.30 \leq 0,30$

Tabulka 3 – Vlastnosti alternativních pelet [16]

- Pelety z ostatních materiálů

Jsou vyrobené z různých materiálů bez dalšího využití (drcený starý papír, uhelný prach apod.). Do této skupiny můžeme řadit i různé směsi těchto materiálů s částí dřevních nebo zemědělských surovin.

5.2 Výroba

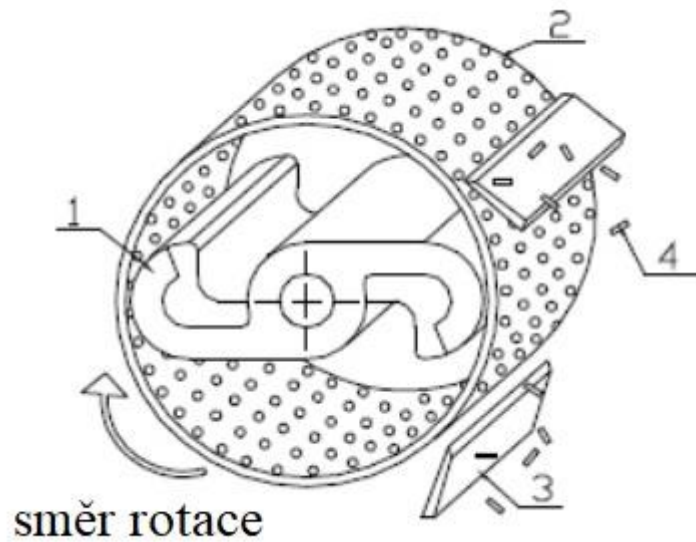
Výrobu pelet můžeme rozdělit do několika základních kroků – drcení, sušení, lisování a chlazení. Prvním krokem je sjednocení velikosti suroviny. Jako příklad můžeme uvést drcení dřevní hmoty, trhání kartonového papíru nebo obilné slámy na menší frakci [18].

Při výrobě pelet hraje zásadní roli vlhkost suroviny. Jestliže je příliš vysoká, surovina ztrácí svoji kvalitu a výhřevnost, při lisování pelet lepí, a navíc může představovat riziko pro zdraví obsluhy (vznik plísní, hub a spór, které mohou být vdechovány) [6]. Pokud je naopak vlhkost pelety při výrobě příliš malá, dochází později k vstřebávání vlhkosti z atmosféry, změně rozměrů a postupnému rozpadu pelety. Např. dřevní piliny obsahují v surovém stavu až 60 % vlhkosti (jejich optimální úroveň vlhkosti se pohybuje v rozmezí 10 až 15 %) [18]. Sušení suroviny je energeticky nejnáročnější částí výrobního procesu. Proto mají výhodu pelety ze zemědělských surovin, které se sklízí již suché.

Po drcení a sušení se surovina připraví k lisování, nejčastěji povrchovým vlhčením (v předchozím kroku jsme se zbavovali vlhkosti z celého objemu). Běžně se v ČR používají dva základní typy lisů – deskový a prstencový. Základními díly lisu jsou matrice a rolny. V matrici se nacházejí kanálky, které mají tvar a průměr výsledné pelety. Rolny, které se odvalují po matrici, protlačují materiál skrze kanálky. Z vnější strany matrice se nacházejí

nože, které odřezávají hotový výlisek. Při protlačování se peleta velmi zahřeje, a proto je třeba ji v dalším kroku výroby zchladit [6], [18].

Detaily výrobního procesu pelet se ovšem liší podle surovin, ze kterých jsou pelety vyrobeny.



Obrázek 4 – Horizontální peletovací stroj s lisovacím rotorem,
1 – lisovací rotor, 2 – matrice, 3 – nože, 4 – pelety [6]

6 Pelety z pšeničné slámy s přídavkem papírenského kalu

Vlastnosti základních surovin, jako jsou čistá dřevní hmota, šťovík, slámy obilovin, byly zjištěny a již mnohokrát ověřeny. I přes to je ovšem v oblasti peletování zatím stále mnoho nezjištěných podrobností, jak optimalizovat vlastnosti pelet, aby byl proces spalování ještě efektivnější. Průběh spalování můžeme ovlivnit výběrem spalovacího zařízení, ale především složením paliva. Abychom vylepšili vlastnosti různých paliv, obvykle tak činíme pomocí příměsí.

6.1 Pšeničná sláma

Pšeničná sláma vzniká jako druhotná surovina. Nejčastěji se používá v zemědělství jako podestýlka pro chovná zvířata, popř. jako jejich píce. O spalování pšeničné slámy má význam se bavit hlavně v době, kdy se nepodaří všechnu slámu využít pro zvířata. V dnešní době s nedostatkem srážek na území ČR se ovšem jedná o ekonomicky nevhodné řešení [19].

Z hlediska výroby pelet má pšeničná sláma výhodu, že proces sušení probíhá již na poli. Tím ušetříme energii, neboť surovinu nemusíme sušit při výrobě pelet. Hlavní výhodou slaměných pelet v minulosti byla jejich nižší cena (oproti peletám dřevěným), avšak nevýhodami obsah popela a jeho relativně nízká teplota tavení.

6.2 Papír a papírenský kal

Výroba papíru je dlouhý a energeticky náročný proces s mnoha kroky. V dnešní době se papír využívá ve velké míře, a tím také vzniká velké množství odpadu. Abychom pomáhali udržet kvalitní životní prostředí je třeba toto množství snižovat tříděním a recyklací. Recyklovaný odpadní papír nachází široké uplatnění a v dnešní době je považován za jednu z významných druhotných surovin. Mezi možné způsoby využití odpadního papíru patří [20]:

- Kartonáže z lepenky
- Nasávaná vláknina
- Mulčovací rohože
- Kompostování
- Sádroláknité desky
- Výroba bioplynu
- Papírové brikety a pelety

Recyklovat papír můžeme vícekrát (až sedmkrát), ovšem podle stupně recyklace dochází k postupnému zhoršování vlastností suroviny a zužování okruhů možného využití [20]. Během recyklace se nikdy nepodaří obnovit všechn starý papír (vzniká tzv. papírenský kal – vzniká také při obyčejné výrobě papíru). Tím se dostaneme ke kompostování nebo spalování papírového odpadu a papírenského kalu. Určitý podíl se spaluje přímo ve výrobnách papíru jako palivo pro procesy výroby nebo recyklace, ale v dnešní době stále množství odpadního papíru a papírenského kalu převyšuje (i přes různé způsoby zpracování) jejich využití. Při spalování hraje zásadní roli množství vody obsažené v kalu (až 70 %), je tedy třeba kal vysoušet [8], [20].

6.3 Vlastnosti

Pro dosažení zvýšení teploty tavení popela byl papírenský kal vyhodnocen jako nejvhodnější příměs. Tato vlastnost silně ovlivňuje možnosti použití. Pelety ze slámy

bez příměsí jsou nevhodné pro spalovací zařízení do 100 kW (dochází ke spékání popela – snižování účinnosti a životnosti kotle). Pro ilustraci vlivu příměsí budou vždy uváděny také hodnoty pro slámu bez příměsí. Referenční výsledky uvedeny v této kapitole byly měřeny Slovenskou univerzitou technologie v Bratislavě [7].

6.3.1 Prvkové složení

V následující tabulce je zobrazen obsah množství prvků v peletách v závislosti na příměsí papírenského kalu. Byly měřeny prvky, které jsou relevantní k tématu spalování. V tabulce můžeme pozorovat klesající tendenci (která je způsobena nízkým obsahem těchto prvků v papírenském kalu) [7].

Příměs kalu [% hm.]	Množství prvku [% hm.]			
	C	H	O	N
0	45,93	5,48	41,62	0,58
10	43,98	5,24	39,08	0,41
20	40,90	4,54	35,00	0,71

Tabulka 4 – Prvkové složení pelet s příměsí papírenského kalu [7]

6.3.2 Obsah vody

Při měření obsahu vody se postupovalo podle normy ISO 18134-3. Jednalo se o sušení v sušárně při teplotě 105 ± 2 °C. W_1 vyjadřuje obsah vody před zahájením procesu peletování, W_2 vyjadřuje obsah vody po 4 h a W_3 vyjadřuje obsah vody po 7 dnech. Norma ISO 17225 udává max. limit obsahu vody pro pelety 10 %. Všechny vzorky tento limit splňují [7].

Příměs kalu [% hm.]	W_1 [% hm.]	W_2 [% hm.]	W_3 [% hm.]
0	12	8	6
10	8	5	5
20	13	6	5

Tabulka 5 – Obsah vody pelet s příměsí papírenského kalu [7]

6.3.3 Obsah popela

Obsah popela byl určován podle normy ISO 18122. Jednalo se o spalování v peci při teplotě 550 °C. Papírenský kal obsahuje velké množství popela (až 56,4 %), zatímco sláma obsahuje pouze asi 6,4 %. Pro směsné pelety byly naměřeny hodnoty uvedené v tabulce.

Příměs kalu [% hm.]	Obsah popela [% hm.]
0	6,40
10	11,29
20	18,86

Tabulka 6 – Obsah popela pelet s příměsí papírenského kalu [7]

6.3.4 Spalné teplo a výhřevnost

Hodnota výhřevnosti pšeničné slámy je přibližně 17,2 MJ/kg, hodnota výhřevnosti papírenského kalu je pouze 8,2 MJ/kg. Z těchto hodnot je patrné, že s rostoucí příměsí papírenského kalu musí výhřevnost klesat. Na tyto výsledky nelze nahlížet pouze z pohledu výhřevnosti, neboť papírenský kal má pozitivní vliv na soudržnost pelet a na jejich tvrdost. Proto bylo třeba nalézt optimální množství příměsí [7].

Příměs kalu [% hm.]	Q_s [MJ/kg]	Q' [MJ/kg]
0	17,175	15,973
10	16,535	15,386
20	15,131	14,137

Tabulka 7 – Spalné teplo a výhřevnosti pelet s příměsí papírenského kalu [7]

6.3.5 Teplota tavení popela

U pšeničné slámy se setkáváme s prvními deformacemi popela již při 800 °C a teploty tečení dosáhneme přibližně při 1009 °C. U pelet s 10% příměsí papírenského kalu jsou již tyto teploty 1080 a 1370 °C a u vyššího podílu příměsí k deformaci vůbec nedocházelo (max. teplota měření byla 1450 °C) [7].

7 Palivový rozbor dodaných vzorků

Měření probíhala v laboratořích VUT. Cílem bylo určit obsah vody, popela, spalné teplo a výhřevnost. Zkoušky probíhaly pro pelety vyrobené z pšeničné slámy s příměsí papírenského kalu v procentuálních poměrech 90:10 a 80:20. V této práci budou vzorky dále označovány 90/10 a 80/20.

7.1 Obsah vody

Při zkoušce byla použita sušárna Venticel (viz obr. 5) a pro vážení vzorků analytické váhy OHAUS Explorer Pro, které váží s přesností na 0,1 mg.



Obrázek 5 – Sušárna Venticel

Pro měření bylo použito šest vzorků, tři pro typ 90/10 a tři pro typ 80/20. Prvním krokem bylo zvážení prázdných misek s víčky (m_1), které byly předem zbaveny vlhkosti v exsikátoru. Poté byla každá miska označena, do každé vložen vzorek o hmotnosti větší než 1 g, a proběhlo další vážení (m_2). Následně byly misky se vzorkem vloženy do sušárny k žihání, které probíhalo při $105\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ po dobu šesti hodin. Po vysušení vzorku v sušárně Venticel se nechal vzorek přibližně 5 min. zchladnout na vzduchu a proběhlo třetí vážení (m_3). Obsah vody v analytickém vzorku je dán vzorcem [21]:

$$W^r = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \cdot 100 [\%] \quad (12)$$

Z naměřených hodnot byly vytvořeny dvě tabulky (podle typu pelet).

vzorek	m_1 [g]	m_2 [g]	m_3 [g]	W^r [%]
4	30,2290	31,3950	31,3260	5,917667
5	27,9781	29,5307	29,4414	5,751642
6	27,2765	28,4685	28,3980	5,91443

Tabulka 8 – Obsah vody pelet 90/10

vzorek	m_1 [g]	m_2 [g]	m_3 [g]	W^r [%]
1	27,9570	29,4726	29,3830	5,91185
2	28,3312	29,7064	29,6245	5,955497
3	29,4072	30,8377	30,7492	6,186648

Tabulka 9 – Obsah vody pelet 80/20

Při měření obsahu vody se podařilo dosáhnout u obou typů paliva poměrně přesných výsledků. Můžeme tedy uvést výsledné hodnoty $W^r = 5,95$ % pro typ 90/10 a $W^r = 5,91$ % pro typ 80/20.

7.2 Popelovina v palivu

Pro měření popelovin bylo použito šest vzorků, tři pro typ 90/10 a tři pro typ 80/20. Misky byly opět připraveny v exsikátoru. Nejprve byly zváženy prázdné misky (m_1), poté byly zváženy misky se vzorky (m_2).



Obrázek 6 – Exsikátor a laboratorní pec

Protože misky nebylo možné označit fixem (v peci by popis shořel), bylo důležité zajistit jiný způsob označení. V našem případě se jednalo o kladení misek ve směru zleva doprava, zadní řada pro typ 90/10 a přední řada 80/20. Misky se vzorkem byly vloženy do pece, kde byly po dobu 30 min. zahřívány na teplotu 250 °C. Následovala výdrž na teplotě 250 °C po dobu 2 hod., aby se ze vzorků uvolnily prchavé hořlaviny. Poté se teplota v průběhu 30 min. zvýšila na 550 °C, na které setrvala po dobu 3 hod.

Aby nedošlo k poškození misek z důvodu tepelného šoku, před vyndáním misek se čekalo na pokles teploty v peci pod 250 °C. Po ochlazení misek na pokojovou teplotu byly zváženy, výsledky zapsány a vypočtena hodnota popelnatosti podle vzorce [22]:

$$A^r = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \cdot 100 [\%] \quad (13)$$

Získané výsledky jsou přehledně uvedeny v následující tabulce:

vzorek	m_1 [g]	m_2 [g]	m_3 [g]	A^r [%]
4	40,4540	52,4602	41,6325	9,815762
5	46,8425	58,2777	48,2501	12,30936
6	46,9408	59,4788	48,2986	10,82948

Tabulka 10 – Popelovina pelet 90/10

vzorek	m_1 [g]	m_2 [g]	m_3 [g]	A^r [%]
1	47,2368	61,9894	49,5344	15,5742
2	50,1819	63,0871	52,1863	15,53172
3	43,9273	58,615	46,2123	15,55723

Tabulka 11 – Popelovina pelet 80/20

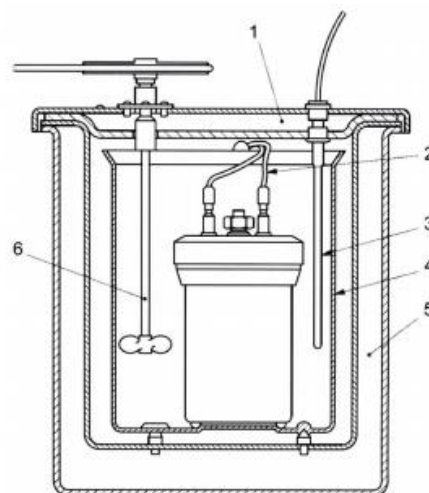
Měření typu 90/10 proběhlo úspěšně (odchylka výsledků byla zanedbatelná) a byla zjištěna hodnota popelnatosti $A^r = 15,5$ %. Pro typ 80/20 došlo k naměření výrazné odchylky, která mohla být způsobena nehomogeností vzorků. Za hodnotu A^r považujeme hodnotu $A^r = 10,83$ %. Pro získání přesnějšího výsledku by bylo třeba opakovat měření (získat více hodnot).

7.3 Spalné teplo a výhřevnost

Zařízení k provedení zkoušky se skládá z kalorimetru (a jeho součástí), bavlněných vláken, analytických vah, digestoře a kyslíkové bomby.

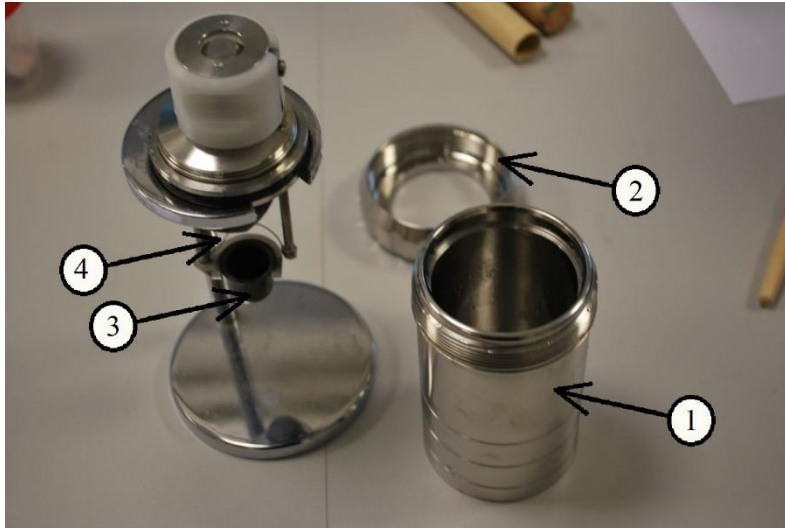
Použitý automatizovaný kalorimetr NEOTEK IKA C200 obsahuje tyto části (viz obr. 7):

- Kalorimetrická nádoba – izoluje od vnějšího prostředí (je vyrobená z kovu)
- Tlaková nádoba (bomba) s kelímkem
- Míchadlo
- Zařízení pro měření teploty
- Termostat
- Zapalovací obvod



Obrázek 7 – schéma kalorimetru

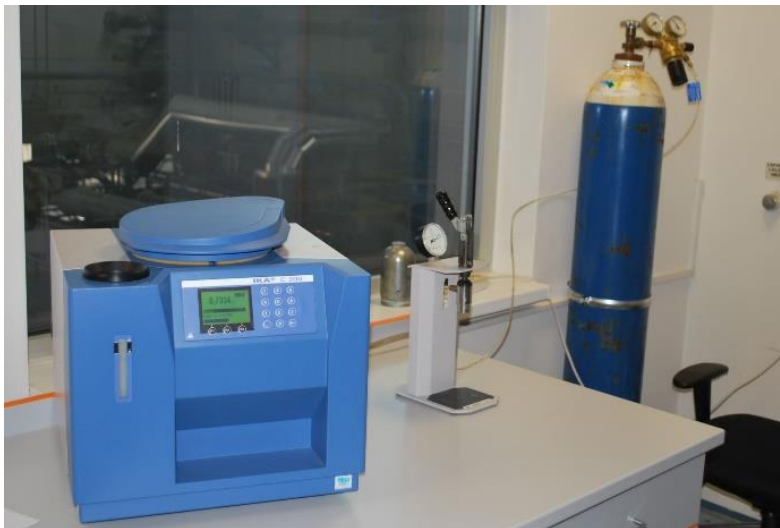
1 – víko, 2 – elektroda, 3 – teploměr, 4 – kalorimetrická nádoba, 5 – termostat, 6 – míchadlo [12]



Obrázek 8 – Součásti tlakové bomby

1 – tlaková bomba, 2 – pojistná matice, 3 – kelímek na vzorek, 4 – žhavicí drát pro zapálení

Na žhavicí drát uvážeme bavlněnou nit definované délky. Vzorek musí být zvážen a vložen do kelímku (viz obr. 9). Aby mohlo dojít k zapálení vzorku, musí být zajištěn dobrý kontakt nitky a vzorku v kelímku. Do tlakové nádoby se nalije přibližně 10 ml vody, která slouží jako ochrana před propálením dna nádoby a k absorpci oxidů síry. Bomba se uzavře a tlakuje na 3 MPa (v zařízení viz obr. 10), poté se vloží do kalorimetrické nádoby [12].



Obrázek 9 – Kalorimetr, zařízení pro tlakování bomby,
nádoba s O_2

Dále se musí naplnit kalorimetrickou nádobu vodou. K určení množství potřebné vody nám slouží rysky na přední straně kalorimetru, označující minimální a maximální možnou hladinu. Po uzavření víka kalorimetru, se na displeji kalorimetru nastaví parametry (hmotnost

vzorku, případně pomocné spalovací látky) a zahájí se zkouška. Všechny výpočty probíhají automaticky a na konci zkoušky z displeje odečteme hodnotu spalného tepla Q_s [MJ/kg].

Protože při spalování vznikají v bombě kyseliny, je třeba provádět odtlakování v digestoři a v rukavicích (aby nedošlo ke zranění, např. poleptání rukou, podráždění dýchacích cest). Po otevření bomby se vizuálně zkontroluje, zda se spálil celý vzorek. V případě nedopalku nebo vypadení části vzorku z kelímku je zkouška neplatná.

Výhřevnost se obvykle počítá pomocí rovnice (11) (viz kapitola 4.3), ovšem protože nebylo zjištěováno prvkové složení, byl použit vzorec (14) [23]:

$$Q^r = Q_s - m_v * 2,440 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1} \quad (14)$$

$$m_v = m_x \cdot \frac{(4 \cdot 18,015)}{128,17} \quad (15)$$

Kde	Q^r	[kJ/g]	výhřevnost
	Q_s	[kJ/g]	spalné teplo
	m_v	[g]	hmotnost vody ve vzorku (po reakci H_2 a O_2)
	m_x	[g]	hmotnost vzorku

vzorek	m_1 [g]	m_v [g]	Q_s [MJ/kg]	Q^r [MJ/kg]
1	1,3643	0,7670	16,712	14,840
2	0,7235	0,4068	15,877	14,884
3	0,9677	0,5441	16,256	14,928

Tabulka 12 – Spalné teplo a výhřevnost pelet 90/10

vzorek	m_1 [g]	m_v [g]	Q_s [MJ/kg]	Q^r [MJ/kg]
4	0,9942	0,5590	15,302	13,938
5	0,8056	0,4529	15,311	14,206

Tabulka 13 – Spalné teplo a výhřevnost pelet 80/20

U paliva 90/10 se hodnoty měření Q_s výrazně lišily, proto byla provedena měření tři a za přibližnou hodnotu Q_s považujeme 16,256 MJ. Pro upřesnění výsledku by bylo třeba provést měření další. Tyto rozdíly hodnot pravděpodobně způsobilo nehomogenní složení pelet (je velice obtížné docílit přesně požadovaného poměru). Výsledky pro palivo 80/20 byly téměř totožné, a proto můžeme určit hodnotu $Q_s = 15,3$ MJ. Výsledky hodnot Q^r je třeba ověřit po provedení prvkových rozborů paliv.

8 Spalovací zkoušky dodaných vzorků

Cílem bylo změření emisí CO, NO a TZL. Dále bylo provedeno vizuální zhodnocení popela (zda docházelo ke spékání).

8.1 Emise CO, NO

Při spalování biopaliv vznikají především CO₂ a H₂O. Vznik dalších látek závisí především na složení paliva a průběhu spalování. Tyto látky jsou považovány za znečišťující – emise. Mezi hlavní emise patří oxidy uhlíku, dusíku a síry, metan a tuhé znečišťující látky (TZL) [13], [24]. Emisemi CO a TZL (pro zařízení do výkonu 500 kW) se zabývá norma ČSN EN 303-5. Tato norma se ovšem nezabývá hodnotou NO.

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný výkon	Mezní hodnoty emisí								
			CO			OGC			prach		
			mg/m ³ při 10% O ₂ ^a								
			kW	třída	třída	třída	třída	třída	třída	třída	třída
	3	4	5	3	4	5	3 ^b	4	5		
ruční	biopaliva	≤ 50	5 000	1 200	700	150	50	30	150	75	60
		> 50 ≤ 150	2 500			100			150		
		> 150 ≤ 500	1 200			100			150		
	fosilní paliva	≤ 50	5 000			150			125		
		> 50 ≤ 150	2 500			100			125		
		> 150 ≤ 500	1 200			100			125		
samočinná	biopaliva	≤ 50	3 000	1 000	500	100	30	20	150	60	40
		> 50 ≤ 150	2 500			80			150		
		> 150 ≤ 500	1 200			80			150		
	fosilní paliva	≤ 50	3 000			100			125		
		> 50 ≤ 150	2 500			80			125		
		> 150 ≤ 500	1 200			80			125		

POZNÁMKA 1 Hodnoty prachu v této tabulce vycházejí ze zkušeností s gravimetrickou filtrační metodou. Použitá metoda musí být uvedena v protokolu o zkoušce. Emise pevných částic, měřeno podle této evropské normy, nezahnuje kondenzovatelné organické látky, které mohou tvořit dodatečné pevné částice, když se spaliny smísí s okolním vzduchem. Hodnoty nejsou proto přímo srovnatelné s hodnotami naměřenými metodami s ředěním v tunelu, ani nemohou být přímo převedeny do koncentrací částic v okolním vzduchu.

POZNÁMKA 2 Dodatečné zkušební metody a mezní hodnoty emisí, které platí v některých zemích, jsou uvedeny v odchylkách typu A v příloze C.

^a Vztahuje se k suchým spalinám, 0 °C, 1 013 mbar.

^b Kotle třídy 3 pro paliva typu E podle 1.2.1 nebo e-paliva podle 1.2.3 v této tabulce a označené klasifikací E-paliva a e-paliva nemusí splňovat požadavky na emise prachu. Skutečná hodnota musí být uvedena v technické dokumentaci a nesmí překročit 200 mg/m³ při 10% O₂.

Tabulka 14 – Norma ČSN EN 303-5 – mezní hodnoty emisí [25]

Měření emisí probíhalo v automatizovaném kotli na pelety VERNER A 251 s připojeným analyzátozem spalin Ultramat Siemens 21/O₂ a Ultramat Siemens 22/O₂. Tento analyzátor umožňuje pomocí metody NDIR (nedispersní infračervená spektrometrie) naměřit hodnoty O₂, CO a NO ve spalinách. Horké spaliny z kotle jsou vedeny do vymrazovacího boxu, kde jsou ochlazeny v Peltierově chladiči, oddělí se a zkondenzuje vlhkost. Zbytek spalin prochází filtrem a je dále veden do Ultramatu. Procesem spalování vzniká také NO₂. Analyzátor dokáže detekovat pouze NO, proto je nutné převést NO₂ zpět na NO pomocí konvertoru,

který je obsažen ve vymrazovacím boxu. Dalším příslušenstvím použitým během zkoušky byly průtokoměr, PID regulátor teploty vratné vody, váha (sledující hmotnost paliva v zásobníku) a teploměr teploty spalin.

Průběh zkoušky měření emisí bylo možné sledovat v reálném čase na monitorech, kde se zobrazuje množství O₂, CO, NO, výkon kotle, teplota vody, teplota spalin a další (viz obr. 11 a 12).



Obrázek 10 – program Labview



Obrázek 11 – zobrazení hodnot NO, CO a O₂

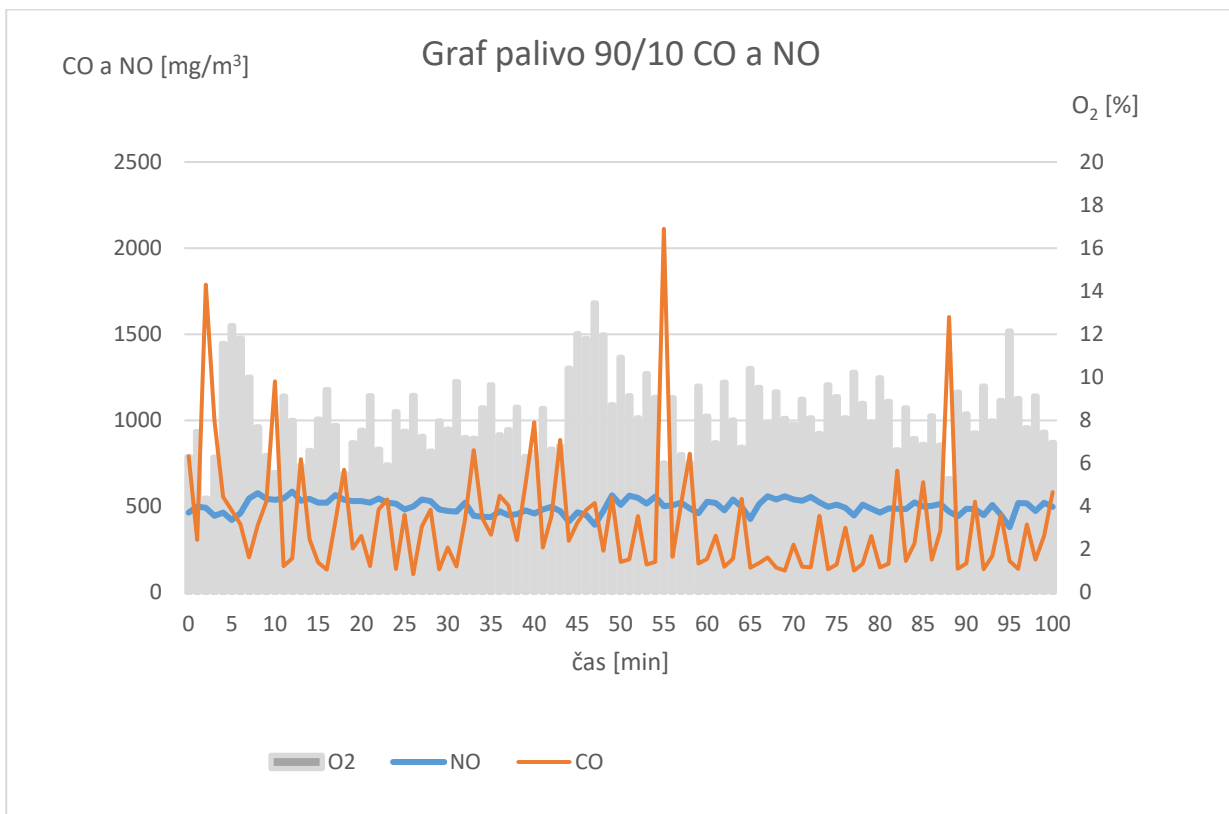
Nejprve bylo třeba odebrat palivo z předchozího měření a vložit do zásobníku pelety typu 90/10. Dále bylo třeba zkontrolovat analyzátory. Analyzátor NO neměřil žádné hodnoty, ale závada byla nalezena a opravena (vyměnění filtru v mrazicím boxu a utěsnění hadiček vedoucích část spalin k analýze). Dalším krokem bylo nastavení parametrů kotle (aby byl proces spalování stabilní a optimální). Regulovatelnými parametry jsou intenzita přikládání [s], síla ventilátoru [1–7] a roštování [min]. Dle podobného vzorku byly zvoleny tyto parametry: intenzita přikládání – 17 s, ventilátor – 3, rošt – 5 min.

První volba parametrů nebyla optimální (v kotli vznikala příliš velká vrstva paliva), proto došlo k prodloužení periody přikládání na 25 s, a zkrácení periody roštování na 3 min. Nastavením těchto parametrů se podařilo dosáhnout stabilního provozu (kolísání hodnot výkonu a teploty spalin nebylo příliš významné). Doba zkoušky spalování paliva 90/10 probíhalo pouze asi 100 min (z důvodu nedostatku paliva), poté byly do zásobníku nasypany pelety 80/20. Parametry kotle již nebylo třeba měnit a spalování tohoto typu probíhalo 120 min.

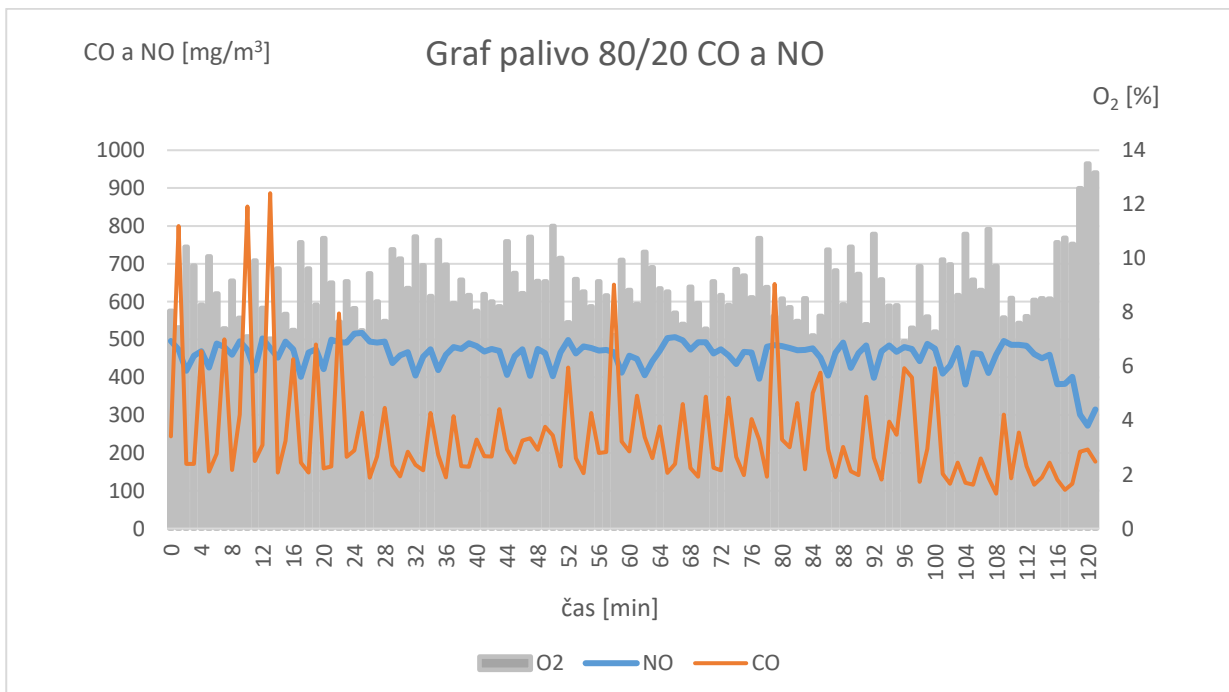
Naměřené hodnoty byly přepočítány podle obsahu O₂ na hodnoty referenční podle následujícího vzorce:

$$X_{ref} = X \cdot \frac{21 - O_{2,ref}}{21 - O_2} \quad (16)$$

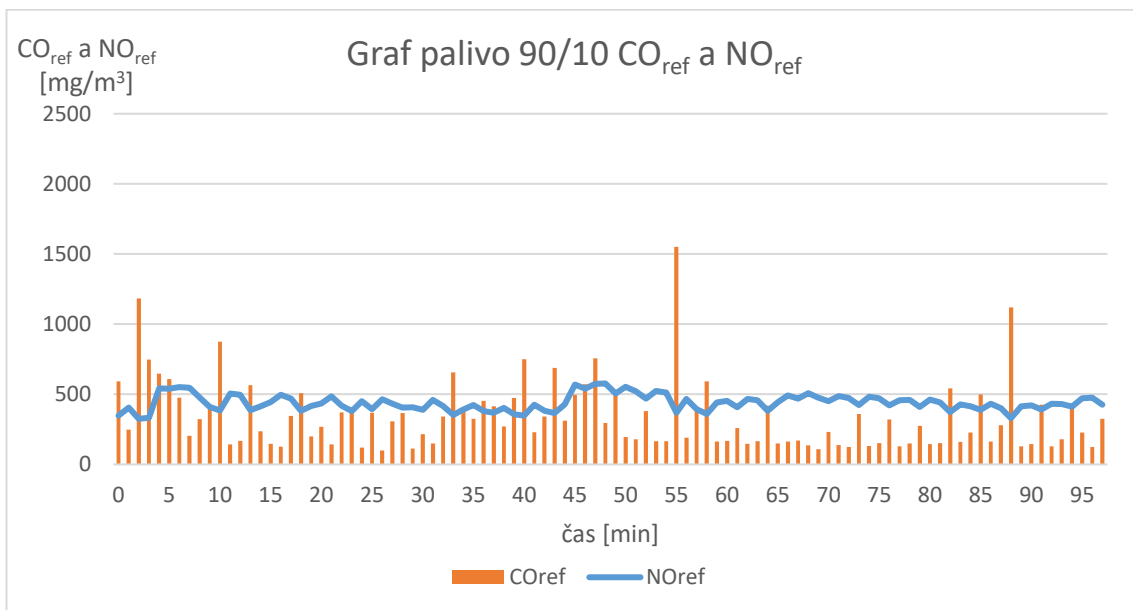
kde	X _{ref}	[%]	referenční hodnota (CO nebo NO)
	X	[%]	naměřená hodnota (CO nebo NO)
	O _{2,ref}	[%]	referenční hodnota kyslíku (dle normy O _{2,ref} = 10%)
	O ₂	[%]	naměřená hodnota kyslíku



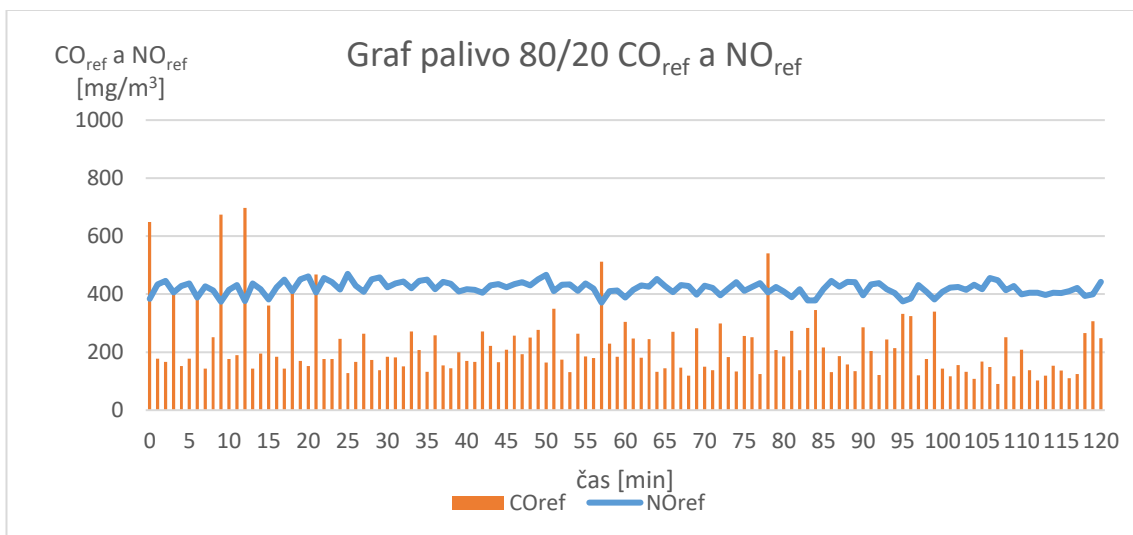
Obrázek 12 – Spalování paliva 90/10



Obrázek 13 – Spalování paliva 80/20



Obrázek 14 – Spalování paliva 90/10 (referenční hodnoty)

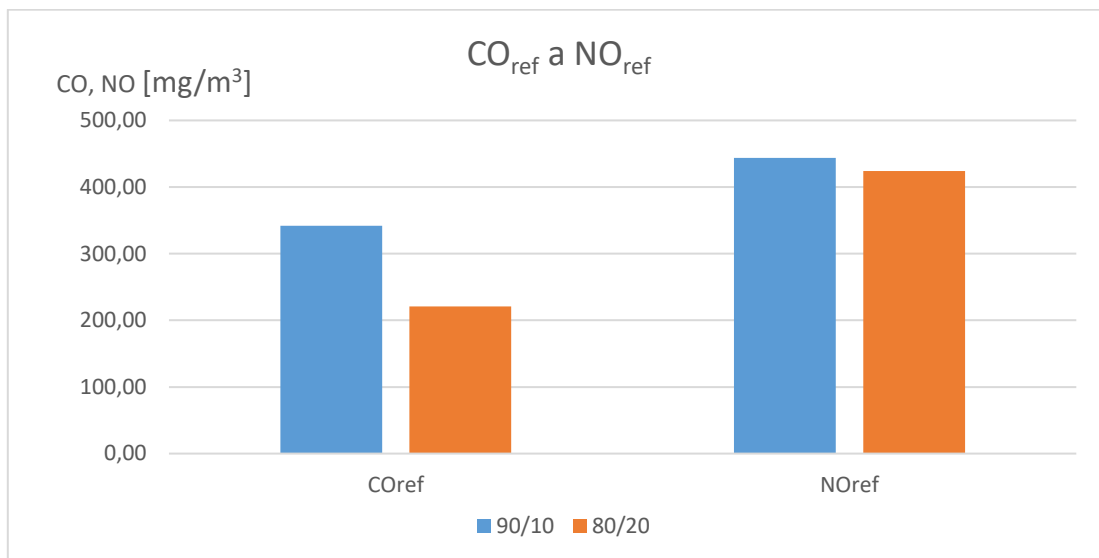


Obrázek 15 – Spalování paliva 80/20 (referenční hodnoty)

Referenční hodnoty byly zprůměrovány (přehledně jsou zobrazeny v tabulce 14) a byl vytvořen výsledný graf (viz obr. 17).

Palivo	O ₂	CO	NO	CO _{ref}	NO _{ref}
90/10	8,39	408,35	504,19	341,79	443,68
80/20	9,08	246,05	461,15	220,97	424,22

Tabulka 15 – výsledné hodnoty spalování



Obrázek 16 – Průměrné hodnoty CO_{ref} a NO_{ref}

Neboť byl průběh hoření stabilní, můžeme srovnat vypočítané hodnoty CO_{ref} s hodnotami uvedenými v normě ČSN EN 303-5 (viz tab. 10). Pro kotel Verner A 251 (o jmenovitém výkonu 25 kW) spadají oba typy paliv (90/10 i 80/20) do 5. třídy. Dalším závěrem bylo, že nedocházelo ke spékání popela (příměs papírenského kalu má tedy pozitivní vliv na průběh spalování).

8.2 Tuhé znečišťující látky (TZL)

Jedná se o částice velikosti od 0,1 μm do 0,5 mm s různorodým složením. Vznikají přírodní i lidskou činností, tato práce se zabývá TZL vznikajícími při spalování.

TZL jsou zachycovány na filtr, který je napojen na komín kotle VERNER A 251. Zachycování je řízeno pomocí sací jednotky napojené na tlakoměr. [5]

Při zkoušce musíme použít filtry zbavené vlhkosti. Toho dosáhneme žíháním při 105 °C po dobu alespoň 2 h. Vysušené filtry vložíme do exikátoru (zařízení se suchou atmosférou) ke zchlazení. Dále se musí napustit voda do chladicího zařízení a sestavit měřicí obvod. V dalším kroku bylo spuštěno sací zařízení, abychom mohli zkontrolovat sání a tlak. Bylo zjištěno, že zařízení nasává vodu (chladicí zařízení bylo pravděpodobně poškozeno). Proběhla výměna chladicího zařízení a nová kontrola nasávání. Bylo zjištěno, že obvod pravděpodobně není uzavřený (přisával vzduch), což by způsobilo významné zkreslení výsledků měření. Protože se nepodařilo nalézt místo závady, zkouška nebyla provedena.

9 ZÁVĚR

Byla zpracována stručná rešerše vlastností pelet vyrobených z pšeničné slámy s příměsí papírenského kalu, proveden rozbor paliva a spalovací zkoušky. K měření byly k dispozici dva typy vzorků – pelety z pšeničné slámy s příměsí papírenského kalu s poměrem složek 90:10 a 80:20.

V rozboru paliva byl zjišťován obsah vody, popela, hodnota spalného tepla a výhřevnosti. Při srovnání výsledků naměřených v této práci s výsledky uvedenými v kapitole 6 dojdeme k závěru, že měření proběhla úspěšně a srovnávané hodnoty se příliš neliší.

Typ paliva	Obsah vody W^r [% hm.]	Obsah popela A^r [% hm.]	Spalné teplo Q_s [MJ/kg]	Výhřevnost Q^r [MJ/kg]
90/10	5,95	10,83	16,256	14,884
80/20	5,91	15,50	15,300	14,200

Tabulka 16 – naměřené hodnoty

Příměs kalu [% hm]	Obsah vody W^r [% hm.]	Obsah popela A^r [% hm.]	Spalné teplo Q_s [MJ/kg]	Výhřevnost Q^r [MJ/kg]
10	5	11,29	16,535	15,386
20	6	18,86	15,131	14,137

Tabulka 17 – naměřené hodnoty (univerzita technologie v Bratislavě) [7]

Dále byly provedeny spalovací zkoušky pro oba typy paliv. Hodnoty emisí CO podle normy ČSN EN 303-5 spadají do kategorie 5. třídy. Hlavní nevýhodou pelet ze pšeničné slámy je spékání popela, tento jev nebyl u vzorků s příměsí papírenského kalu během spalovacích zkoušek pozorován. Můžeme tedy říci, že příměs papírenského kalu má na celkové vlastnosti převážně pozitivní vliv.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MIŠKOVSKÝ, Miroslav. *Paliva, úprava paliv a spalování*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1971.
- [2] BALÁŠ, Marek. *Kotle a výměníky tepla*. Vydání druhé. Brno: Akademické nakladatelství CERM®, s.r.o. Brno, 2013, 119 stran : ilustrace. ISBN 978-80-214-4770-7.
- [3] KNORRE, Georgij. *Pochody spalování: určeno provozním inženýrům, konstruktérům a vysokoškolským studentům energetického zaměření*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1956. Řada energetické literatury.
- [4] VERNER, Vladimír. Alternativní pelety. *Biom.cz* [online]. b.r. [cit. 2019-05-20]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/alternativni-pelety>
- [5] KUREČKOVÁ, Andrea. *Spalování pelet z kávy*. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Martin Lisý, Ph.D.
- [6] JANÍČEK, Jakub. *Výroba pelet*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Marek Baláš, Ph.D.
- [7] MATÚŠ, Miloš, Peter KRIŽAN, Ľubomír ŠOOŠ a Juraj BENIAK. The effect of papermaking sludge as an additive to biomass pellets on the final quality of the fuel. *Fuel* [online]. 2018, **219**, 196-204 [cit. 2019-05-20]. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.01.089. ISSN 00162361. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236118300978>
- [8] VASSILEV, Stanislav, Christina VASSILEVA a Vassil VASSILEV. Advantages and disadvantages of composition and properties of biomass in comparison with coal: An overview. *Fuel* [online]. 2015, **158**, 330-350 [cit. 2019-05-20]. DOI: 10.1016/j.fuel.2015.05.050. ISSN 00162361. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236115005578>
- [9] BALÁŠ, Marek, Martin LISÝ a Jiří MOSKALÍK. Kotle – 1. část. *TZB-info* [online]. 2012 [cit. 2019-05-10]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/teorie-a-schemata/8382-kotle-1-cast>
- [10] ROUBÍČEK, Václav. *Uhlí: zdroje, procesy, užití*. Ostrava: Montanex, 2002. Odborné publikace. ISBN 80-7225-063-9.
- [11] ČSN EN 15402. *Tuhá alternativní paliva - Stanovení obsahu prchavé hořlaviny*. Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [12] ČSN ISO 1928. *Tuhá paliva - Stanovení spalného tepla kalorimetrickou metodou v tlakové nádobě a výpočet výhřevnosti*. Praha: Český normalizační institut, 2010.
- [13] JIROUŠ, František. *Efektivní spalování paliv*. Vyd. 1. Praha: Český svaz zaměstnavatelů v energetice, 2013. ISBN 9788026053934.
- [14] ČSN EN ISO 17225-1. *Tuhá biopaliva - Specifikace a třídy paliv - Část 1: Obecné požadavky*. Praha: Český normalizační institut, 2015.

- [15] ČSN EN ISO 17225-2. *Tuhá biopaliva - Specifikace a třídy paliv - Část 2: Tříděné dřevní pelety*. Praha: Český normalizační institut, 2015.
- [16] ČSN EN ISO 17225-6. *Tuhá biopaliva - Specifikace a třídy paliv - Část 6: Tříděné nedřevní pelety*. Praha: Český normalizační institut, 2015.
- [17] *Česká peleta* [online]. 2019 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: www.ceska-peleta.cz/
- [18] LYČKA, Zdeněk. *Dřevní peleta, aneb, Peleta mýtů zbavená*. 1. vyd. Krnov: LING Vydavatelství, 2011. ISBN 978-80-904914-0-3.
- [19] BAJLEK, Jan. Využití slámy pro energetické účely: Zpracování slámy na topné účely. *Zemědělec.cz* [online]. 2012, (24) [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.ulozto.cz/!8A8iqSRi/zpracovani-slamy-pro-topne-ucely-pdf>
- [20] ŤUPA, Ondřej. *Možnosti využití odpadního papíru*. Ostrava, 2017. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská, Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Barbora Lyčková Ph.D.
- [21] ČSN EN ISO 18134-2. *Tuhá biopaliva - Stanovení obsahu vody - Metoda sušení v sušárně - Část 2: Celková voda - Zjednodušená metoda*. Praha: Český normalizační institut, 2017.
- [22] ČSN EN ISO 18122. *Tuhá biopaliva - Stanovení obsahu popela*. Praha: Český normalizační institut, 2016.
- [23] *Kalorimetrie – stanovení spalného tepla a výhřevnosti tuhých paliv* [online]. b.r. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://old.mssch.cz/2004-2009/old.mssch.cz/clanky/files/1204632299.Kalorimetrie.pdf.pdf>
- [24] PASTOREK, Zdeněk, Jaroslav KÁRA a Petr JEVIČ. *Biomasa: obnovitelný zdroj energie*. Praha: FCC Public, 2004. ISBN 80-865-3406-5.
- [25] ČSN EN 303-5. *Kotle pro ústřední vytápění - Část 5: Kotle pro ústřední vytápění na pevná paliva, s ruční a samočinnou dodávkou, o jmenovitém tepelném výkonu nejvýše 500 kW - Terminologie, požadavky, zkoušení a značení*. Praha: Český normalizační institut, 2013.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

TZL	tuhé znečišťující látky	
Symbol	Veličina	Jednotka
A^r	Obsah popela	[% hm.]
BD	Sypná hmotnost	[kg/m ³]
D	Průměr	[mm]
DU	Mechanická odolnost	[% hm]
F	Jemné částice	[% hm]
G	Hmotnost paliva	[kg]
h	Hořlavina v palivu	[% hm]
L	Délka	[mm]
m_1	Hmotnost prázdné misky	[g]
m_2	Hmotnost misky se vzorkem před provedením zkoušky	[g]
m_3	Hmotnost misky se vzorkem po provedení zkoušky	[g]
m_v	Hmotnost vody ve vzorku (po reakci H ₂ a O ₂)	[g]
m_x	Hmotnost vzorku	[g]
O_2	Naměřená hodnota kyslíku	[%]
$O_{2,ref}$	Referenční hodnota kyslíku	[%]
Q_c	Teplo uvolněné při vzniku CO ₂	[MJ/kg]
Q_{H_2}	Teplo uvolněné při vzniku H ₂ O	[MJ/kg]
Q_{s^*}	Teplo uvolněné při vzniku SO ₂	[MJ/kg]
Q^f	Výhřevnost	[MJ/kg]
Q_s	Spalné teplo	[MJ/kg]
r	Výparné kondenzační teplo vody	[kJ/kg]
ΔT	Rozdíl teploty vody v kalorimetru	[K]
V	Vodní hodnota kalorimetru	[kJ/K]
$V_{vz\ min}$	Teoretické množství vzduchu	[m ³]
$V_{vz\ sk}$	Skutečně přivedené množství vzduchu	[m ³]
W^r	Obsah vody v palivu	[% hm]
X	Naměřená hodnota (CO nebo NO)	[mg/m ³]
X_{ref}	Referenční hodnota (CO nebo NO)	[mg/m ³]
α	Koeficient přebytku vzduchu	[-]
τ_c	Celková doba hoření	[s]
τ_{ch}	Doba chemických procesů spalování	[s]
τ_f	Doba fyzikálních procesů spalování	[s]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 – Pelety ze pšeničné slámy a papírenského kalu (poměr složek 90:10).....	11
Obrázek 2 – Graf dynamického spalování [2]	14
Obrázek 3 – Závislost spalného tepla a výhřevnosti na obsahu vody [13]	18
Obrázek 4 – Horizontální peletovací stroj s lisovacím rotorem,.....	21
Obrázek 5 – Sušárna Venticel	25
Obrázek 6 – Exsikátor a laboratorní pec	26
Obrázek 7 – schéma kalorimetru.....	27
Obrázek 8 – Součásti tlakové bomby.....	28
Obrázek 9 – Kalorimetr, zařízení pro tlakování bomby, nádoba s O ₂	28
Obrázek 10 – program Labview	31
Obrázek 11 – zobrazení hodnot NO, CO a O ₂	31
Obrázek 12 – Spalování paliva 90/10	32
Obrázek 13 – Spalování paliva 80/20	32
Obrázek 14 – Spalování paliva 90/10 (referenční hodnoty)	33
Obrázek 15 – Spalování paliva 80/20 (referenční hodnoty)	33
Obrázek 16 – Průměrné hodnoty CO _{ref} a NO _{ref}	34

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – Hrubý rozbor paliv [9].....	16
Tabulka 2 –vlastnosti dřevních pelet [15]	19
Tabulka 3 – Vlastnosti alternativních pelet [16]	20
Tabulka 4 – Prvkové složení pelet s příměsí papírenského kalu [7]	23
Tabulka 5 – Obsah vody pelet s příměsí papírenského kalu [7].....	23
Tabulka 6 – Obsah popela pelet s příměsí papírenského kalu [7]	23
Tabulka 7 – Spalné teplo a výhřevnosti pelet s příměsí papírenského kalu [7]	24
Tabulka 8 – Obsah vody pelet 90/10	26
Tabulka 9 – Obsah vody pelet 80/20	26
Tabulka 10 – Popelovina pelet 90/10	27
Tabulka 11 – Popelovina pelet 80/20	27
Tabulka 12 – Spalné teplo a výhřevnost pelet 90/10.....	29
Tabulka 13 – Spalné teplo a výhřevnost pelet 80/20.....	29
Tabulka 14 – Norma ČSN EN 303-5 – mezní hodnoty emisí [25]	30
Tabulka 15 – výsledné hodnoty spalování	33
Tabulka 16 – naměřené hodnoty	35
Tabulka 17 – naměřené hodnoty (univerzita technologie v Bratislavě) [7]	35