



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

SPALOVÁNÍ PELET Z NEDŘEVNÍ BIOMASY V KOTLECH II

BURNING PELLETS FROM NON-WOOD BIOMASS IN BOILERS II

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Matúš Linda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vojtěch Zejda

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství
Student: **Matúš Linda**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Vojtěch Zejda**
Akademický rok: 2015/16

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:

Spalování pelet z nedřevní biomasy v kotlech II

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zásadní změnou pro výrobce kotlů je zpřísnění emisní vyhlášky a zákona o ovzduší – od roku 2018 bude možné prodávat pouze kotle 4. třídy, které budou splňovat přísnější emisní limity, zejména pro tuhé znečišťující látky (TZL). Snižovat emise kotlů je důležité, protože lokální topeniště jsou jedním z největších zdrojů emisí prachu.

Zvyšuje se poptávka po využívání ekologických paliv, mimo jiné také alternativních tuhých paliv, zejména odpadních produktů ze zemědělství, tzv. agropelet a zároveň se zvyšuje poptávka po kotlech nižších výkonů.

Bude se jednat o prakticky zaměřenou práci, ve které bude zkoumán vliv složení agropelet na používané materiály kotlů, emise TZL apod. Student se obeznámí s analytickými postupy a bude vykonávat palivářský rozbor agropelet různého složení. V diskusi bude rozebrán vliv složení na funkce kotle a spalování.

Cíle bakalářské práce:

- Stručný úvod do problematiky spalování pelet z nedřevní biomasy v kotlech.
- Shrnutí legislativní podmínky pro spalování pelet z nedřevní biomasy v kotlech a platné emisní limity
- Experimentální část – palivářský rozbor různých vzorků agropelet
- Zhodnocení rešeršně a experimentálně získaných poznatků a dat, diskuze vlivu složení agropelet na činnost kotle a emise.

Seznam literatury:

Černý,V., Janeba,B., Teyssler, J., Parní kotle, technický průvodce, SNTL Praha, 1983

VERMA, V.K., S. BRAM, F. DELATTIN, P. LAHA, I. VANDENDAEL, A. HUBIN a J. DE RUYCK. 2012. Agro-pellets for domestic heating boilers: Standard laboratory and real life performance. Applied Energy. 90(1): 17-23. DOI: 10.1016/j.apenergy.2010.12.079. ISSN 03062619. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030626191100002X>

SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2009/125/ES ze dne 21. října 2009 o stanovení rámce pro určení požadavků na ekodesign výrobků spojených se spotřebou energie. 2009.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Bakalárska práca je rozdelená na štyri hlavné časti. Prvá časť sa zaoberá problematikou spaľovania agropeliet v kotloch. V tejto časti sú špecifikované typy peliet, ich výroba a problémy so spaľovaním v kotloch spojené s tvorbou emisií. Druhá časť špecifikuje platnú legislatívu a emisné limity. Tretia časť opisuje palivársky rozbor daných vzoriek agropeliet. Tento rozbor zahŕňa analýzy za účelom zistenia vlastností a chemického zloženia agropeliet čoho výsledkom je určenie spalného tepla a výhrevnosti. Štvrtá časť zhodnocuje vplyv agropeliet na činnosť kotlov a tvorbu emisií na základe získaných dát a poznatkov. Doplnené je aj porovnanie výsledkov s dátami literárnych zdrojov iných bežne používaných tuhých palív.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ

Agropelety, biomasa, spaľovanie v kotloch, emisie, palivársky rozbor, sušina, strata žíhaním, spalné teplo, výhrevnosť, kalorimeter, elementárna analýza.

ABSTRACT

Bachelor thesis is divided into four main chapters. The first chapter deals with issue of combustion of agropellets in boilers. This section specifies types of pellets, their production and problems of combustion in boilers associated with formation of emissions. The second chapter specifies valid legislation and emissions limits. The third chapter describes fuel analysis of agropellets samples. This includes an analysis in order to determine the properties and chemical composition of agropellets resulting in determination of gross heat and calorific value. The fourth chapter evaluates agropellets influence on boilers and emissions creation on the basis of data and knowledge. The results are compared with data of other commonly used solid fuel found in literature sources.

KEYWORDS

Agropellets, biomass, boiler combustion, emissions, fuel analysis, dry matter, ignition loss, gross heat, calorific value, calorimeter, elemental analysis.

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

LINDA, M. *Spalování pelet z nedřevní biomasy v kotlech II.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 62 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Vojtěch Zejda.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením Ing. Vojtěch Zejda a s použitím literatúry uvedenej v zozname.

V Brne dňa 26. 5. 2016

.....

Meno a priezvisko

POĎAKOVANIE

Týmto ďakujem Ing. Vojtěchu Zejdovi za cenné rady, pripomienky a skúsenosti získané pri vypracovaní bakalárskej práce. Ďakujem aj svojej rodine, za poskytnutie podpory v priebehu štúdia.

OBSAH

Úvod	15
1 Pelety vyrobené z biomasy	16
1.1 Typy peliet	16
1.2 zloženie tuhých palív a ich cena	17
1.3 Výroba peliet.....	17
2 Spaľovanie v kotloch a jeho problémy	19
2.1 Vznik kyselín v kotly	19
2.2 Spekanie biomasového popola.....	19
2.3 Kotle na spaľovanie agropeliet	22
2.4 Kotle ako zdroj emisií.....	24
3 Legislatívne podmienky spaľovania.....	26
3.1 Zákon o ochrane ovzdušia	26
3.2 Norma EN 303-5.....	26
4 Zadanie palivárskeho rozboru	29
5 Prevedenie palivárskeho rozboru.....	31
5.1 Technická analýza.....	31
5.1.1 Výpočet sušiny a stanovenie straty žíhaním.....	31
5.1.2 Výsledky stanovenia sušiny a straty žíhaním	34
5.2 Celková analýza	36
5.2.1 Princíp elementárnej analýzy.....	36
5.2.2 Postup elementárnej analýzy	39
5.2.3 Výsledky elementárnej analýzy.....	40
6 Spalné teplo	42
6.1 Kalorimeter	42
6.1.1 Postup stanovenia spálneho tepla kalorimetrom	44
6.1.2 Výsledky stanovenia spálneho tepla pomocou kalorimetra	45
6.2 Výpočet.....	45
6.2.1 Prepočet výsledkov z elementárnej analýzy.....	45
6.2.2 Vlastný výpočet spálneho tepla	46
6.2.3 Výpočet výhrevnosti.....	47
7 Štatistické spracovanie dát.....	48
7.1 Spracovanie technickej analýzy.....	48
7.2 Spracovanie celkovej analýzy.....	49
8 Zhodnotenie a porovnanie výsledkov.....	50
8.1 Uvedenie výsledkov výhrevnosti.....	50

8.2	Porovnanie spalného tepla získaného kalorimetrom a pomocou výpočtov	50
8.3	Porovnanie spalného tepla získaného kalorimetrom a literatúrou.....	52
8.4	Vplyv chemického zloženia palív na emisie a činnosť kotlov	53
Záver		56
Zoznam použitej literatúry		57
Zoznam použitých skratiek a symbolov.....		60
Zoznam príloh.....		62

ÚVOD

Spaľovanie biomasy je jeden z najstarších vynálezov ľudstva. Akonáhle človek prišiel na spôsob ako si vytvoriť a udržiavať oheň, začal spaľovať kúsky dreva, konáre a všetko horľavé, čo našiel v prírode a vo svojom okolí. Všetok materiál rastlinného a živočíšneho pôvodu, ktorý sa dá priemyselne a energeticky využiť nazývame biomasa. Pri otvorenom ohni je väčšia časť energie rozptýlená do prostredia bez úžitku a účinnosť takéhoto spaľovacieho procesu je asi len 2 %. Dnešné moderné spaľovacie kotly sa vyznačujú podstatne vyššou účinnosťou okolo 90 % [1].

S postupným technickým pokrokom sa začali využívať fosílna palivá – uhlie, ropa, zemný plyn a urán ako zdroj tepelnej a elektrickej energie. Táto energia je v palivách akumulovaná ako chemická energia, ktorá sa uvoľňuje spaľovaním, čo je zmena chemickej energie na teplo. Spaľovanie spôsobuje únik škodlivých látok do atmosféry, akými sú napr. prach, oxid sýry, dusíka, uhlíka, ktoré majú negatívny vplyv na životné prostredie.

V budúcnosti hrozí, že zásoby fosílnych palív budú vyčerpané, a tak sme nútení hľadať alternatívne a ekologickejšie zdroje energie. Preto bude využitie biomasy na energetické účely nielen alternatívou, ale nutnosťou. Výhodou biomasy je, že nejde len o účelovo pestované energetické rastliny, ale aj o druhotné suroviny vzniknuté v poľnohospodárstve a iných odvetviach. Ďalšou výhodou je, že takúto surovinu nie je potrebné dovážať, je to domáci zdroj energie. Jej cena nezávisí od vývoja na medzinárodnom trhu a priaznivo pôsobí na miestnu ekonomiku, keďže sa zužitkuje takmer celá rastlina. Biomasa je označovaná ako CO₂ neutrálna, čo znamená že sa do ovzdušia vypúšťa len toľko CO₂, koľko rastlina sama spotrebuje pri svojom raste [2]. Tento prívlastok je spojený s fotosyntézou, keďže rastliny premieňajú oxid uhličitý a vodu na energiu potrebnú k rastu.

V dnešnej dobe sa okrem spaľovania drevnej biomasy, či už v surovej forme alebo vo forme peliet, čoraz viac zvyšuje dopyt po tzv. agropeletách z dôvodu domácej produkcie, štandardizovanej kvality, vysokej energetickej hustoty a využiteľnosti v automatizovaných vykurovacích systémoch.

.

1 PELETY VYROBENÉ Z BIOMASY

Energeticky využiteľná biomasa sa dá rozdeliť na dve hlavné skupiny – drevnú a nedrevnú. Drevné materiály sú napríklad palivové drevo, rýchlorastúce dreviny, piliny, hobliny, štiepka a iné odpadové materiály z drevospracujúceho priemyslu. Poľnohospodársky priemysel je producentom nedrevných biomasy ako napríklad slama, šupky semien obilnín ale aj rašelina [3]. Takúto biomasu väčšinou nie je možné použiť priamo v spaľovacích zariadeniach. Najčastejšou úpravou do vhodných rozmerov a tvarov je peletovanie a briketovanie, pričom sa kladie dôraz na ich rozmery, tvar a mechanické vlastnosti [9].

1.1 TYPY PELIET

Pelety sa podľa zloženia rozdeľujú na [11] :

1. Drevné – drevná hmota ako kôra, drevná štiepka a piliny o určitej vlhkosti sú lisované, a ďalej sa delia na:
 - a) biele – obsahujú len čistú drevnú hmotu, najmä piliny;
 - b) tmavé – obsahujú okrem pilín aj kôru.
2. Alternatívne – vyrábajú sa lisovaním nedrevných materiálov, teda rastlín a ich častí a ďalej sa delia na:
 - a) agropelety – vyrábajú sa lisovaním poľnohospodárskych plodín, napr. seno, obilná a repková slama, odpad z čistenia olejní a obilnín a iné;
 - b) ostatné – vyrábajú sa lisovaním obťažne využiteľných materiálov a miešaním s poľnohospodárskymi rastlinami, napr. uhoľný prach, starý papier atď.

Aktuálne je v platnosti šesť klasifikačných noriem rady ČSN EN ISO 17225 [12] pre tuhé bio palivá. Prvá časť normy ISO 17225-1 je všeobecná a klasifikuje tuhé palivá podľa pôvodu na drevnú, bylinnú a ovocnú biomasu. Ďalšie časti normy špecifikujú drevné pelety (ISO 17225-2), drevné brikety (ISO 17225-3), drevné štiepky (ISO 17225-4), palivové drevo (ISO 17225-5) a nedrevné pelety (ISO 17225-6) pre nepriemyselné využitie v spaľovacích zariadeniach do 500 kW. Drevné pelety majú svoju vlastnú certifikáciu najvyššej kvality ENplus [13]. Táto certifikácia ďalej delí drevné pelety podľa kvality použitého dreva od najkvalitnejšej triedy A1 obsahujúcu čisté drevo, cez A2 s prímесou kôry a najmenej kvalitná trieda B s vyšším obsahom popola a kôry.

Medzi hlavné výhody peliet patrí všestranné využitie v kotloch s ľubovoľným výkonom, nízky obsah popola pri spaľovaní, minimálny priestor potrebný na prepravu a skladovanie, absencia rozkladu pri dlhodobom skladovaní, vysoká výhrevnosť, domáca produkcia a v neposlednom rade aj to, že ide o obnoviteľný zdroj energie. Za hlavnú nevýhodu možno považovať vysokú investíciu do spaľovacieho zariadenia [3].

1.2 ZLOŽENIE TUHÝCH PALÍV A ICH CENA

Pre porovnanie chemického zloženia a ceny bežne používaných palív s peletami slúži tab. 1.1. Chemické zloženie ako aj ceny boli zistené z literatúry a od dodávateľov.

Tabuľka 1.1 Chemické zloženie a cena palív [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10]

<i>Druh paliva</i>	<i>Voda</i>	<i>Popol</i>	<i>C</i>	<i>H</i>	<i>N</i>	<i>S</i>	<i>Q_s</i>	<i>Cena</i>
	[hmot %]						[kJ/kg]	
Hnedé uhlie	29,3	8,6	45,5	3	0,7	0,72	19 478	3 753 Kč/t
Čierne uhlie	10,3	16,8	59,9	4,8	1	0,63	26 107	4 320 Kč/t
Jaseňové drevo	16,9	0,6	41,5	5,1	0,5	0,03	17 734	3 024 Kč/t
Pelety pšeničnej slamy	7,64	6,6	41,63	5,39	0,34	0,035	16 960	4 212 Kč/t
Pelety šťovíku	7,95	4,45	42,7	5,42	1,68	0,11	16 540	3 500 Kč/t
Drevné pelety	7	0,4	42,8	5,8	0,2	0,03	18 466	5805 Kč/t

Na základe tab. 1.1 sú v závere porovnané emisie, hodnota spalného tepla a vplyv paliva na konštrukciu kotla.

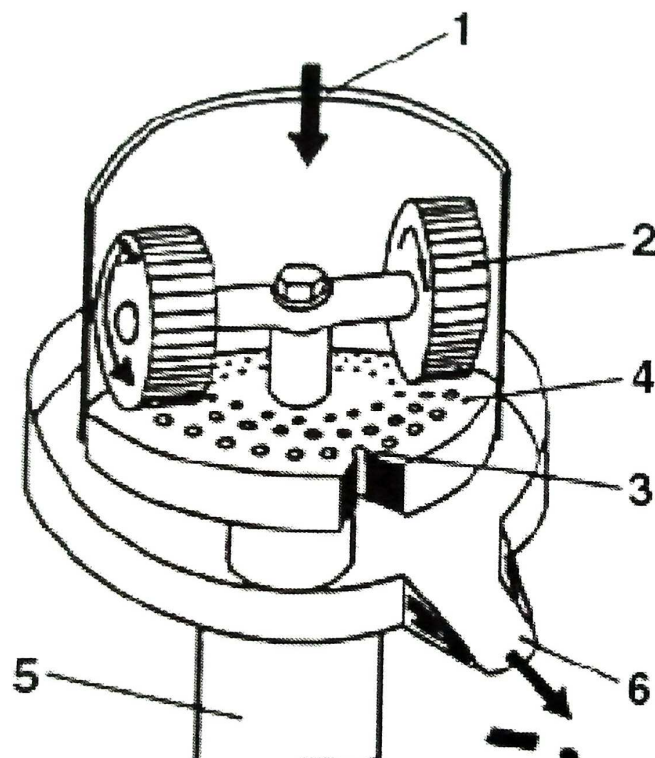
1.3 VÝROBA PELIET

Pelety sa vyrábajú procesom peletizácie bez použitia spojív. Princíp spočíva v priblížení častíc na minimálnu molekulovú vzdialenosť, pri ktorej sú účinné Van der Walsové valenčné sily. Častice sa priblížia len za pôsobenia veľmi vysokých tlakov (až 31,5 MPa). Pri pôsobení vysokého tlaku dochádza k uvoľneniu a zmäkčeniu lignínu obsiahnutého v materiály, ktorý pôsobí ako lepidlo. Najdôležitejším parametrom pri peletizácii je vlhkosť materiálu. Ak vlhkosť presiahne 20 % materiál sa v lisovacej komore dostatočne nezhutní a peleta sa rozpadne. Odporúčaná vlhkosť pre dostatočné zhutnenie je maximálne 15 % [9].

Výroba peliet je energeticky náročná z dôvodu prípravy materiálu, ktorá zahŕňa jeho rozomletie, pretriedenie a vysušenie. Najvýhodnejšia je peletizácia z materiálu vysušeného a rozomletého po predchádzajúcom technologickom procese, ako sú napríklad piliny z vysušeného dreva.

Prvým krokom peletizácie je homogenizácia vstupného materiálu. Materiál na šrotovanie sa privádza zo zásobníka pomocou dopravníku do pneumatického rozradovača pracujúceho na základe rozdielnej mernej hmotnosti, ktorý triedi nežiaduci materiál ako kamene, kovy atď. Pre kontrolu a zachytenie kovových častíc sa používa silný magnetický separátor [14]. Na šrotovanie materiálu sa najčastejšie používa kladivový drvič, ktorý podrví materiál na optimálne rozmery 2 až 3 mm. Počiatočný obsah vody materiálu býva okolo 45 % a najprv je potrebné znížiť ho na optimálnych 10 %. Sušenie pomocou spalín v bubnových sušičkách predstavuje najekonomickejší spôsob, ale materiál tak stráca prchavé horľavé látky. Ak je potrebné dosiahnutie vysokej kvality prebieha sušenie horúcim vzduchom s teplotou okolo 160 °C, čím sa odstráni len prebytočná voda [9].

Hlavný stroj peletizačnej linky je pretlačovací matricový lis, ako na obr. 1.1.



Obrázok 1.1 Matricový pretlačovací lis s horizontálnou maticou a pretlačovacími kolesami [9]

- 1) Vkladanie drveného materiálu
- 2) Pretlačovacie kolesá
- 3) Pretlačovacie otvory matrice
- 4) Horizontálna matica
- 5) Pohon
- 6) Odvod vyrobených peliet

Ďalšími riešeniami konštrukcie matricového lisu sú tanierový, prstencový alebo plochý lis. Pretlačovacie kolesá sa odvalujú po pretlačovacej matrici vyrobenej z ušľachtilej ocele so sústavou otvorov potrebného prierezu. Pelety držia svoj tvar vďaka vzniknutému tlaku a lignínu. Posledným krokom procesu je vychladnutie peliet, čím zatuhne lignín a pelety získajú potrebnú pevnosť a tuhosť. Výkonnosť takehoto lisu je väčšia než 1 t/hod pri príkone 150 kW [9].

2 SPAĽOVANIE V KOTLOCH A JEHO PROBLÉMY

Spaľovanie predstavuje fyzikálny chemický proces, pri ktorom horí horľavá zmes paliva s kyslíkom za intenzívneho uvoľňovania tepla. Horením, teda znižovaním energetického potenciálu sústavy dochádza k prudkému nárastu teploty zmesi a vzniknutých spalín.

Začiatok procesu horenia môže nastať samovznietením alebo pôsobením vonkajšieho tepelného impulzu zápalu. Horenie prebieha reťazovou reakciou, pri ktorej je nová zmes vstupujúca do reakcie zapáľovaná časťou spalného tepla v prebiehajúcom horení. Táto reakcia trvá až do vyhorenia horľaviny alebo klesnutím teploty pod zápalnú teplotu. [15]

Horenie prebieha len medzi elementárnymi zložkami horľaviny, uhlíkom, vodíkom a sírou v atomárnom stave a kyslíkom, pričom sa atómy horľaviny snažia doplniť svoje neúplné vonkajšie vrstvy na plný počet elektrónov. Kvalita spaľovania sa určuje stanovením objemových koncentrácií zložiek vzniknutých spalín, akými sú oxid uhličitý CO_2 , kyslík O_2 , oxid uhoľnatý CO a vodík H_2 . [15]

2.1 VZNIK KYSELÍN V KOTLY

Kondenzácia v kotloch má za následok vznik kyselín, ktoré zapríčiňujú nízkoteplotnú koróziu. V moderných nízkoteplotných kotloch a ich výmenníkoch tepla, ktoré sú najčastejšie vyrobené z ocele alebo liatiny, klesá teplota spalín pod $130\text{ }^{\circ}\text{C}$. Teplota vratnej vykurovacej vody býva nižšia ako $65\text{ }^{\circ}\text{C}$, a ak dosiahne teplotu rosného bodu 52 až $58\text{ }^{\circ}\text{C}$, spaliny začnú kondenzovať na častiach kotla. Pri takejto nízkoteplotnej kondenzácii dochádza k premene síry a oxidov dusíka na kyselinu sírovú H_2SO_4 a dusičnú HNO_3 . Tieto kyseliny pôsobia veľmi korozívne na oceľovú konštrukciu kotlov, čím znižujú životnosť kotla a zvyšujú náklady na opravu. [8]

2.2 SPEKANIE BIOMASOVÉHO POPOLA

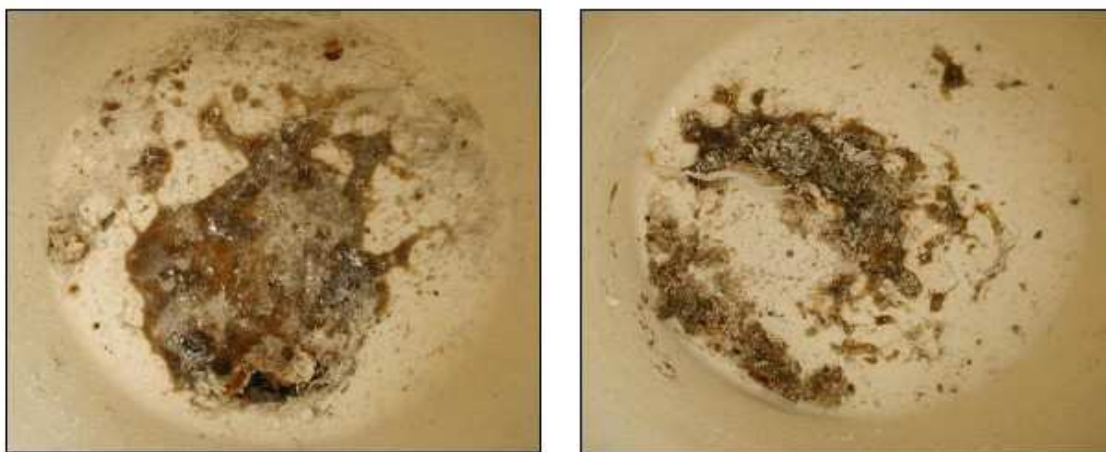
Pri spaľovaní nedrevnej biomasy, hlavne slamy, dochádza k tvorbe nápeku na horáku a vznik sklovitých vrstiev v plameňovej časti kotlového výmenníku.[17] Chemické zloženie popola má zásadný vplyv na vznik nízko topiaceho sa eutektika, čo má za následok veľké prevádzkové komplikácie.

Týmto problémom sa zaoberala Centrálna výhrevňa spoločnosti Žlutická teplárenská a.s. ktorá spaľuje drevnú štiepku a balíkovú slamu. Nežiaduce vrstvy boli ručne mechanicky odstraňované, pričom hrozil pracovný úraz. Z tohto dôvodu bola vykonaná analýza nápeku a popola čím sa zistili príčiny vzniku a spôsoby riešenia spekania biomasového popola.[17]



Obr. 2.1 Snímky sklovitých kryštalických vrstiev vzniknutých v plameňovej časti kotlového výmenníku tepla.[17]

Chemický rozbor bol vykonaný röntgenovou fluorescenčnou analýzou (XRF) na vzorkách sklovitých vrstiev vzniknutých spaľovaním slamy pšenice, jačmeňa, žita, repky a sena. Bol zistený vysoký obsah sklotvorných oxidov ako oxid kremičitý (SiO_2), oxid vápenatý (CaO) a oxid draselný (K_2O), ktoré navyše znižujú viskozitu tejto taveniny. Sklovitý charakter vrstvy v popole je viditeľný na obr. 2.1. Riadeným spaľovaním v laboratóriu pri teplote 1100°C boli slamené vzorky spálené v korundovom kremíku. Získaný popol bol analyzovaný XRF metódou, ktorá tiež preukázala prítomnosť oxidov. Toto zloženie popola má za následok jeho tavenie pri nízkych teplotách $720 - 1000^\circ\text{C}$. Teplota tavenia rastie s rastúcim obsahom CaO a s klesajúcim obsahom K_2O a SiO_2 . Na základe analýz sa dospelo k záveru, že vhodnými chemickými úpravami paliva sa obsah taveniny zníži. Boli vyrobené dva druhy aditív, ktoré sa pridávali spolu s palivami do spaľovacieho zariadenia. Prvé aditívum A1 obsahovalo vysoký obsah CaO , čím sa zvýšila teplota tavenia. Druhé aditívum A2 obsahovalo vysoký obsah SiO_2 a Al_2O_3 , ktoré zvýšili viskozitu taveniny. S aditívami A1 a A2 bola vykonaná laboratórna skúška. Pšeničná a žitná slama bola spálená spolu s aditívom v korundovom kremíku. Výsledky môžeme vidieť porovnaním obr. 2.2 s obr. 2.3 a obr. 2.4, z ktorých je zrejmé, že pridané aditíva významne potlačili vznik sklotvorenej taveniny.



Obr. 2.2 Ztuhnutá tavenina skelného charakteru so zbytkami popola spálenej pšeničnej a jačmennej slamy[17]



Obr. 2.3 Popol spálenej pšeničnej a jačmennej slamy s aditívom A1 v korundovom kelímku.[17]



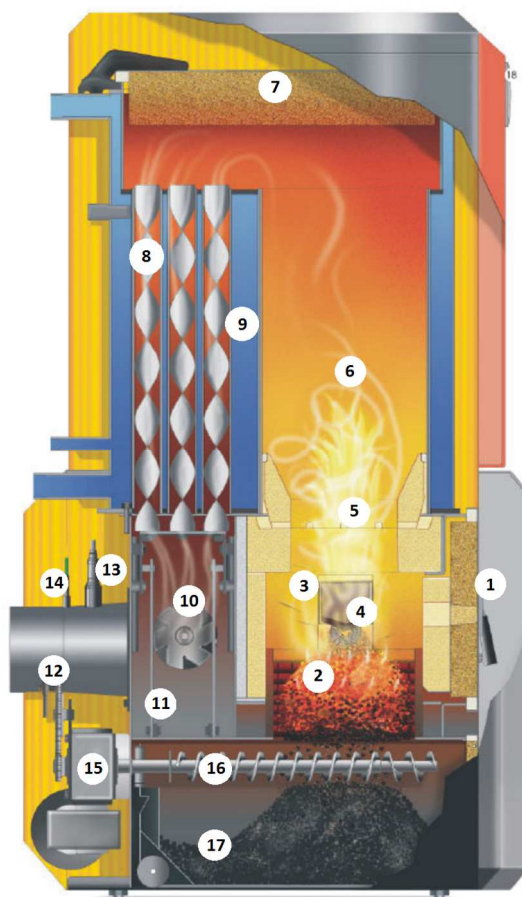
Obr. 2.4 Popol po spálení pšeničnej a jačmennej slamy s aditívom A2 v korundovom kelímku.[17]

Spoločnosť Žlutická teplárenská a.s. na základe týchto výsledkov pristúpila k prevádzkovým skúškam oboch aditív. Použitie aditíva A2 preukázalo malú účinnosť v porovnaní s aditívom A1, ktoré úspešne potlačilo vznik taveniny, a tým odstránilo problém vzniku nápeku na horáku.[17]

2.3 KOTLE NA SPAĽOVANIE AGROPELIET

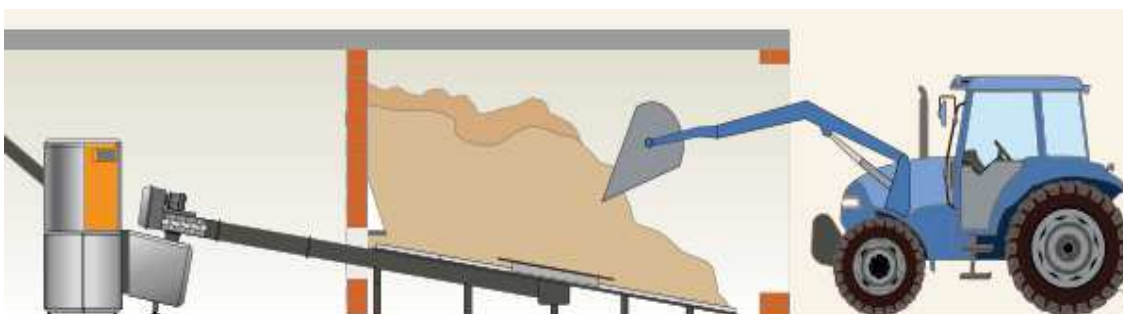
Spaľovanie agropeliet je možné len v kotloch na to určených. Keďže dochádza k spekaniu popola na horáku a vzniku kyselín s korozívnymi účinkami, musí byť kotol vybavený mechanizmami odolnými voči týmto javom.

Pre opis procesu spaľovania agropeliet je vhodný univerzálny kotol Powerchip značky Guntamatic s výkonom 50 kW na obr. 2.5. Medzi hlavné výhody tohto kotla patrí vnútorné obloženie s kyselinovzdornej ocele zabezpečujúce ochranu proti kyselinám vzniknutých pri spaľovaní poľnohospodárskych plodín. Ďalej je to samočistiaci pohyblivý rošt a automatické čistenie výmenníku tepla.



Obrázok 2.5 Univerzálny kotol Powerchip Guntamatic spaľujúci agropelie [16]

- 1) Dvierka do ohniska
- 2) Stupňový rošt-primárny vzduch
- 3) Spaľovacia komora
- 4) Ukazateľ naplnenia
- 5) Vírivá tryska-sekundárny vzduch
- 6) Reakčná trubka
- 7) Čistiace veko
- 8) Virbulátory/víridlá
- 9) Trubkový výmenník tepla
- 10) Odt'ahový ventilátor
- 11) Čistenie výmenníku tepla
- 12) Dymovod
- 13) Sonda lambda
- 14) Dymové čidlo
- 15) Pohon roštu
- 16) Popolníkový šnekový dopravník
- 17) Pojazdný popolník
- 18) Regulácia pomocou menu



Obrázok 2.6 Doprava peliet do kotla [16]



Obrázok 2.7 Samočistiaci kaskádový rošt [16]

Pelety sú dopravované zo skladovacieho priestoru do kotla šnekovým dopravníkom poháňaný nízkootáčkovým elektromotorom ako na obr. 2.6. Na konci dopravníku padá palivo prepadávajúcou šachtou, kde sa nachádza automaticky zatváraná protipožiarna klapka

zabraňujúca spätnému horeniu. Ďalšie bezpečnostné prvky sú teplotné čidlo na podávači s ochranou proti prehriatiu a revízna šachta s mechanickým čidlom k ochrane pred preplnením palivom. Palivo padá na šnek podávača, ktorý privádza vždy presné množstvo paliva a je riadený sondou lambda. Palivo následne horí na samočistiacom kaskádovom rošte obr. 2.7, ktorý umožňuje nastavenie veľkosti ohniska a výkonu kotla podľa potreby a paliva. Tento rošt sa pohybuje, čím dochádza k čisteniu štrbín primárneho vzduchu. Transport popola, zaisťuje optimálne spaľovanie a zabraňuje spekaniu popola. Pomaly pohybujúci sa popolový šnekový dopravník transportuje popol do nádoby s objemom 60 l, ktorá sa ľahko vyprázdni a s popolom je možné hnojiť záhradu. Spaľovanie prebieha za prívodu primárneho vzduchu pri kontrolovanej teplote ohniska asi 650 °C. Vďaka sonde lambda regulujúcej prívod vzduchu a paliva kotol spaľuje s účinnosťou až 94 %. Vznikajúce plyny zo spaľovania sa menia na energiu v dohorievanej zóne vďaka sekundárnemu vzduchu. Turbulátory pohybujúce sa neustále hore a dole v trubkovom výmenníku tepla zabraňujú usadzovaniu nečistôt, ktoré znižujú účinnosť. Kotol tak môže pracovať veľmi dlho bez údržby a čistenia.

Celá činnosť kotla je regulovaná elektronicky, vďaka čomu je možné nastaviť časovú prevádzku, prispôbiť výkon kotla potrebe tepla, pripraviť teplú vodu, či protimrazovú ochranu atď. [16]

2.4 KOTLE AKO ZDROJ EMISÍ

Spaľovacie kotly sú v dnešnej dobe veľmi rozšírené hlavne v rodinných domoch v obciach. Vyskytuje sa tak lokálny problém produkcie emisií, ktoré sú produkované priamo do dýchacích zón obyvateľov v malej výške nad obytnou zástavbou bez možnosti riadneho rozptylu. Dochádza tak k znečisteniu ovzdušia hlavne v oblastiach mimo dosahu znečistenia od priemyslových podnikov.[18] Podľa výsledku sčítania obyvateľstva, domov a bytov z roku 2011, ktorý vykonal Český štatistický úrad vyplýva, že Moravskoslezský kraj má najväčšiu hustotu kotlov na tuhé palivá, a to asi 55 000. [19]

Najväčším problémom znečistenia sú tuhé znečisťujúce látky (TZL) obsahujúce zmes uhlíka, prachu a aerosólov. Častice TZL majú rôzne chemické zloženie, veľkosť, pôvod a účinky. Prach vznikajúci pri spaľovaní tuhých palív vzniká z minerálnych frakcií paliva. Počas spaľovania z kúreniska postupne vyprchávajú veľmi malé častice vytvorené kondenzáciou zlúčenín, tzv. popolček. Druh spaľovacieho procesu má veľký vplyv na podiel popolčeka strhnutého spalínami do ovzdušia. Napríklad spaľovacie zariadenie, ktoré spaľuje práškové uhlie produkuje z celkového popola 80 až 90 % popolčeka. Naopak zariadenie s pohyblivým roštom vytvára omnoho menší obsah popolčeka, 20 až 40 % z celkového obsahu popola [8]. Vplyv takýchto malých častíc na živý organizmus je tým väčší, čím sú častice menšie. Niektoré väčšie častice sa do dýchacích ciest nedostanú, no najjemnejšie častice s priemerom pod 2,5 µm prenikajú hlboko do dýchacieho traktu a môžu spôsobovať vážne zdravotné problémy [8]. Pri spaľovaní tuhých palív je produkovaný celý rad ďalších znečisťujúcich látok, ako oxid siričitý SO₂, oxid dusičitý NO₂, oxid uhoľnatý CO, dioxíny, polyaromatické uhľovodíky, formaldehyd a ťažké kovy. Vdychovanie takýchto látok prináša aj zdravotné riziká, nehovoriac o tom, že vo vidieckych oblastiach sú hodnoty TZL prekračované omnoho viac ako v priemyselných oblastiach. Z emisnej bilancie, ktorú pravidelne vykonáva Český hydrometeorologický ústav vyplýva, že sa do ovzdušia dostáva až 40 % celkových emisií TZL spaľovaním tuhých palív v starých kotloch s tepelným príkonom do 300 kW.[19]

Výskumné energetické centrum VŠB – TU Ostrava v rokoch 2007 – 2010 experimentálne zistilo, že ročná produkcia TZL starých prehorievacích kotlov je 59 kg na rok na jeden dom pri čiernom uhlí a 249 kg pri hnedom uhlí [21]. Nedrevná biomasa nebola zistená. Naopak emisie TZL nových automatických kotlov dosahujú 12 kg pri čiernom uhlí a 6 kg pri hnedom uhlí na rok na jeden dom. U týchto kotloch bola zistená aj nedrevná biomasa v podobe peliet z kukuričnej slamy v hodnote 12 kg na rok a jeden dom. Z výsledkov správy č.90/10 o riešení tohto projektu SP/1a2/116/07 je zrejmé, že ročná úspora emisií TZL výmenou starých prehorievacích kotlov za moderné automatické kotly predstavuje pri čiernom uhlí 47 kg/rok a pri hnedom uhlí 243 kg/rok [21]. Je zrejmé, že podobné úspory emisií sú možné aj pri spaľovaní nedrevnej biomasy. Z dôvodu významného problému Českej republiky s kvalitou ovzdušia je v platnosti nový Předpis č. 201/2012 Sb. Zákon o ochraně ovzduší.

3 LEGISLATÍVNE PODMIENKY SPAĽOVANIA

V posledných rokoch došlo k sprísneniu emisných limitov pre spaľovanie tuhých palív v kotloch. V tejto kapitole sú priblížené Zákon o ochrane ovzdušia a emisné limity platné v Českej republike.

3.1 ZÁKON O OCHRANE OVZDUŠIA

V Českej republike je od 13. 6. 2012 v platnosti Předpis č. 201/2012 Sb. Zákon o ochraně ovzduší [21] v aktuálnom znení od 1. 1. 2016. „*Tento zákon zapracovává příslušné předpisy Evropské unie a upravuje,*

- a) přípustné úrovně znečištění a znečišťování ovzduší,*
- b) způsob posuzování přípustné úrovně znečištění a znečišťování ovzduší a jejich vyhodnocení,*
- c) nástroje ke snižování znečištění a znečišťování ovzduší,*
- d) práva a povinnosti osob a působnost orgánů veřejné správy při ochraně ovzduší,*
- e) práva a povinnosti dodavatelů pohonných hmot a působnost orgánů veřejné správy při sledování a snižování emisí skleníkových plynů z pohonných hmot v dopravě.“ [21]*

Zákon ďalej definuje dané pojmy, zoznam zón a aglomerácii, sadzby poplatkov za znečisťovanie a upresňuje emisné limity vychádzajúce z českej normy ČSN EN 303-5.

3.2 NORMA EN 303-5

Emisné limity určuje česká norma 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 [22]. Každý nový kotol na tuhé palivá musí splňovať emisné limity podľa tejto normy a byť certifikovaný. Táto norma bola schválená 10.5.2012, ktorá je totožná s európskou normou a nahradila tak normu EN 303-5 z roku 1999. Norma udáva tri triedy presnosti pre tri typy emisií. Prvou sledovanou emisiou je CO, ktorý vzniká pri nedokonalom spaľovaní, nedostatkom kyslíku v spaľovacom procese alebo spaľovaním vlhkými peletami. Ďalšou emisiou je OGC (celkový organický uhlík) a prach v spalinách. Pri spaľovaní nesmie dôjsť k prekročeniu emisných limitov uvedených v tab. 3.1 v prípade, že je kotol v prevádzke pri menovitom výkone [22].

Tabuľka 3.1 Emisné limity podľa ČSN EN 303-5[22]

Dodávka paliva	Palivo	Menovitý tepelný výkon	Medzné hodnoty emisií								
			CO			OGC			prach		
			mg/m ³ pri 10% O ₂ ^a								
			kW	tried a	tried a	tried a	tried a	tried a	tried a	tried a	tried a
		3	4	5	3	4	5	3b	4	5	
Ručná	bio-palivá	≤ 50	5 000	1 200	700	150	50	30	150	75	60
		> 50 ≤ 150	2 500			100			150		
		> 150 ≤ 500	1 200			100			150		
	fosílna palivá	≤ 50	5 000			150			125		
		> 50 ≤ 150	2 500			100			125		
		> 150 ≤ 500	1 200			100			125		
Samočinná	bio-palivá	≤ 50	3 000	1 000	500	100	30	20	150	60	40
		> 50 ≤ 150	2 500			80			150		
		> 150 ≤ 500	1 200			80			150		
	fosílna palivá	≤ 50	3 000			100			125		
		> 50 ≤ 150	2 500			80			125		
		> 150 ≤ 500	1 200			80			125		

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

^b Kotle triedy 3 pre palivá typu E - nedrevná biomasa, ako je slama, travy, rákosie, jadrá a zrná podľa EN 14961-6 v tejto tabuľke nemusia spĺňať požiadavky na emisie prachu. Skutočná hodnota musí byť uvedená v technickej dokumentácii a nesmie prekročiť 200 mg/m³ pri 10 % O₂

V tab. 3.1 je možné vidieť značný rozdiel v jednotlivých triedach. Emisné limity na spaľovacie stacionárne zdroje 3. triedy sú platné od 1.1.2014, kedy prestali platiť limity na triedy 1. a 2. V praxi to znamená, že triedy kotlov 1. a 2. sa prestali predávať, ale používajú sa v domácnostiach aj naďalej. Používanie takýchto kotlov na pevné palivá je možné len po vykonaní revízie a jej predložení na obecnom úrade najneskôr do začiatku roku 2017 [23]. Za nepredloženie revízie do tohto dátumu hrozí pokuta 20 000 korún. Od 1.9. 2022 je nutné preukázať, že kotel spĺňa emisné limity 3. triedy. Za nesplnenie limitov hrozí pokuta až 50 000 korún [21]. Prísnejšie emisné požiadavky a vyvíjajúce sa technológie majú za následok sprísnenie emisných limitov a od roku 2018 bude možné predávať len kotle 4. triedy, od roku 2020 len kotle 5. triedy a od 1.9.2022 bude zakázané používať kotle 1. a 2. emisnej triedy [23]. Okrem emisných limitov uvedených v tab. 3.1 norma určuje aj minimálnu účinnosť kotlov na pevné palivá v závislosti na tepelnom výkone a triede kotla uvedenú v tab. 3.2

Tabuľka 3.2 Minimálna účinnosť kotlov podľa ČSN EN 303-5[22]

Trieda	Menovitý tepelný výkon	Účinnosť [%]
3	> 300 kW	82 %
4	> 100 kW	84 %
5	>100 kW	89 %

Norma EN 303-5 platí v celej Európskej únii, no štáty ako Nemecko a Rakúsko majú limity prísnejšie. V Rakúsku musia kotly spĺňať prísnejšie hodnoty okrem CO aj NO_x. Ďalšie odchýlky majú štáty ako Dánsko, Chorvátsko, Švajčiarsko, Veľká Británia a Taliansko.[22]

4 ZADANIE PALIVÁRSKEHO ROZBORU

Hlavnou úlohou tejto bakalárskej práce je stanovenie spalného tepla a výhrevnosti vybraných druhov agropeliet palivárskym rozborom. Pri spaľovaní prebiehajú oxidačné reakcie, pri ktorých sa uvoľňuje teplo vzťahujúce sa na hmotnostnú jednotku ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$). Toto teplo sa rozlišuje na spalné teplo a výhrevnosť. Spalné teplo Q_s je teplo uvoľnené dokonalým spálením mernej jednotky paliva (kg , m^3), pričom vodná para v spalinách skondenzuje. Výhrevnosť Q_i sa líši len tým, že vodná para v spalinách neskondenzuje.[26] Spalné teplo je možné získať experimentálne kalorimetrom alebo pomocou výpočtov na základe znalosti chemického zloženia vzoriek. V nasledujúcich kapitolách je popísaný postup a porovnanie výsledkov oboch metód.

Analýza bola vykonaná na 4 typoch vzoriek – agropeliet :

- 1) Drevené
- 2) Šťovíkové
- 3) Slamenné
- 4) Slnečnicové



Obr. 4.1 Drevené pelety



Obr. 4.2 Šťovíkové pelety



Obr. 4.3 Slamenné pelety



Obr. 4.4 Slnečnicové pelety

K posúdeniu chovania sa paliva pri jeho horení, ale aj vhodnosti jeho použitia pre spaľovacie zariadenia je potrebná znalosť základných vlastností paliva. Chemické zloženie paliva má priamy vplyv na výhrevnosť, spaľné teplo, cenu paliva a na spôsob a priebeh spaľovania. Určenie chemického zloženia sa vykonáva pomocou dvoch analýz:

1. Technická analýza – pri tejto analýze sa určuje podiel sušiny, z ktorej sa vypočíta obsah vody. Následne sa vykoná strata žiňaním, z ktorej vieme vypočítať obsah popola.
2. Celková analýza – určuje hmotnostné podiely základných prvkov horľaviny, ako sú uhlík C, vodík H, kyslík O, dusík N, síra S, popol a voda v percentách.[26]

5 PREVEDENIE PALIVÁRSKEHO ROZBORU

Experimentálna časť tejto bakalárskej práce bola vykonaná v laboratóriách Ústavu procesného inžinierstva ÚPI VUT v Brne, pričom boli využité prístroje a postupy uvedené v kap. 5.1, 5.2 a 6.1.

5.1 TECHNICKÁ ANALÝZA

Pomocou technickej analýzy bude stanovený obsah sušiny a obsah popola vo vzorkách palív. Tieto vzorky boli pripravené v takom stave, v akom by sa spaľovali v kotloch. Získané dáta sú použité pri určení spalného tepla a výhrevnosti.

5.1.1 VÝPOČET SUŠINY A STANOVENIE STRATY ŽIHANÍM

Ako prvý krok palivárskeho rozboru daných agropeliet je výpočet sušiny podľa literatúry [27]. Aby sme získali obsah sušiny, je potrebné skúmanú vzorku úplne zbaviť vody. Norma popisuje dve metódy stanovenia sušiny v závislosti na povahe vzoriek (kvapalnú, pevnú alebo s viac fázami):

1. Metóda A – Sušenie pri 105 °C (podiel sušiny)
2. Metóda B – Titrácia podľa Karla Fischera (obsah vody)

Metóda A sa používa pri pevných vzorkách alebo vzorkách, ktoré sa stanú pevnými počas sušenia. Metóda B je vhodná pre vzorky, pri ktorých sa očakáva zvýšené množstvo prchavých látok, ktoré majú vplyv na výsledky. Pre analýzu našich agropeliet je vhodná metóda A.

Pomôcky:

1. Sušiareň – riadená termostatom schopným udržiavať teplotu na $(105 \pm 3)^\circ\text{C}$
2. Exsikátor – s aktívnym sušiacim činidlom silikagel
3. Analytická váha – s presnosťou váženia na 1 mg
4. Odparovacia miska – keramická

Postup:

Všetky vzorky agropeliet sa pomleli na jemný prach. Prázdne odparovacie misky sa umiestnili do sušiarne pri teplote 105 °C na dobu 30 min. Po ochladení v exsikátore na teplotu okolia sa misky zvažili s presnosťou na 1 mg. Následne sa navážilo najmenej 0,5 g pomletého materiálu do odparovacích misiek a zvažilo s presnosťou na 1 mg. Odparovacie misky obsahujúce vzorky sa umiestnili do sušiarne pri teplote $(105 \pm 3)^\circ\text{C}$ po dobu 5 hodín. Po ochladení v exsikátore sa odvážili misky s ich obsahom.

Výpočet výsledkov:

Podiel sušiny sa vypočíta podľa vzťahu (5.1):

$$w_{\text{dr}} = \frac{(m_c - m_a)}{(m_b - m_a)} \cdot f \quad (5.1)$$

kde

- w_{dr} podiel sušiny vzorky, vyjadrený ako hmotnostný zlomok v percentách [%] po procese sušenia pri 105 °C;
 m_a hmotnosť prázdnej misky, vyjadrená v gramoch [g];
 m_b hmotnosť misky so vzorkou vyjadrená v gramoch [g];
 m_c hmotnosť misky s vysušenou vzorkou vyjadrená v gramoch [g];
 f prevodný koeficient $f=100$ pre vyjadrenie výsledkov ako hmotnostný zlomok v percentách [%].

Sušina sa vypočíta podľa vzťahu (5.2):

$$w_{dm} = w_{dr} \quad (5.2)$$

kde

- w_{dm} je sušina (vzorka, ktorá neobsahuje vodu) vyjadrená ako hmotnostný zlomok v percentách [%];

Obsah vody w je časť obsahu vzorky, ktorá sa odparí sušením. Určí sa podľa vzťahu (5.3):

$$w = 100 - w_{dm} \quad (5.3)$$

kde

- w je obsah vody vyjadrený v percentách [%];

Ďalším krokom v palivárskom rozbere je stanovenie straty žíhaním podľa literatúry [28]. Toto stanovenie sa používa pre zistenie obsahu popola dôležitého k určeniu spalného tepla a výhrevnosti palív. Do hodnoty straty žíhaním bude zahrnutý elementárny uhlík zo vzorky a akékoľvek prchavé alebo chemické reakcie s anorganickým zlúčeninami. Norma upresňuje tieto pojmy:

Strata žíhaním je zmena hmotnosti vzniknutá žíhaním vzorky za stanovených podmienok, vyjadruje sa v hmotnostných percentách sušiny. Často je používaná k odhadu obsahu neprchavých organických látok vo vzorke. Zvyšok po žíhaní je zvyšná hmotnosť po žíhaní vzorky za stanovených podmienok, vyjadruje sa v percentách sušiny.

Pomôcky:

1. Muflová pec – schopná udržať teplotu (550 ± 25) °C
2. Exsikátor – s aktívnym sušiacim činidlom silikagel
3. Analytická váha – s presnosťou váženia na 1 mg
4. Otvorený plochý tavný téglík – použijeme rovnakú odparovaciu keramickú misku použitú v sušičke, ktorá je zároveň vhodná aj na žíhanie
5. Kovová doska

Postup:

Norma udáva dva postupy – pre vzorky neobsahujúce prchavé látky a pre vzorky obsahujúce prchavé látky. Agropelety neobsahujú prchavé látky, preto volíme prvý postup. Stanovenie

straty žíhaním a stanovenie sušiny sme robili v dvoch po sebe idúcich krokoch, preto sme mohli zvážiť misky s vysušenými vzorkami na najbližší 1 mg a vložiť ich hneď do pece. V peci sa žíhali 1,5 hodiny pri teplote 550 °C. Následne sme misky vybrali, ochladili na kovovej doske a presunuli do exsikátoru, kde sa ochladili na okolitú teplotu. Misky obsahujúce zvyšok po žíhaní sme zvážili na najbližší 1 mg a zaznamenali.

Výpočet výsledkov:

Strata žíhaním W_{LOI} sa vypočíta podľa vzťahu (5.4):

$$W_{LOI} = \frac{m_c - m_d}{m_c - m_a} \cdot 100 \quad (5.4)$$

kde

m_d hmotnosť misky obsahujúca zvyšok po žíhaní, vyjadrená v gramoch [g];

W_{LOI} strata žíhaním vzorku je vyjadrená v hmotnostných percentách sušiny [hmot %].

Zvyšok po žíhaní vzorku W_{ROI} sa vypočíta podľa vzťahu (5.5):

$$W_{ROI} = 100 - W_{LOI} \quad (5.5)$$

kde

W_{ROI} zvyšok po žíhaní vzorku (popol) vyjadrený v hmotnostných percentách sušiny [hmot %].

Výpočet obsahu popola v pôvodnej vzorke norma neuvádza, no na základe vzťahov (5.4) a (5.5) získame vzťahy (5.6) a (5.7):

$$A_{LOI} = \frac{m_b - m_d}{m_b - m_a} \cdot 100 \quad (5.6)$$

kde

A_{LOI} strata žíhaním vzorku vyjadrená v hmotnostných percentách pôvodného vzorku [hmot %].

$$A = 100 - A_{LOI} \quad (5.7)$$

A zvyšok po žíhaní vzorku (popol) vyjadrený v hmotnostných percentách pôvodného vzorku [hmot %].

Namerané a vypočítané hodnoty sušiny, obsahu vody a popola sú v kapitole 5.1.25.1.2.

5.1.2 VÝSLEDKY STANOVENIA SUŠINY A STRATY ŽÍHANÍM

Na základe predošlého postupu došlo k stanoveniu výsledkov uvedených v tejto podkapitole.

Tabuľka 5.1 Výsledky pre drevo

Vzorka	Drevo		
číslo misky	14	36	39
m_a [g]	15,655	15,664	15,902
m_b [g]	16,306	16,729	16,957
m_c [g]	16,25	16,634	16,865
m_d [g]	15,66	15,67	15,912
Sušina W_{dm} [%]	91,40	91,08	91,28
Obsah vody W [%]	8,60	8,92	8,72
Strata žíhaním sušiny W_{LOI} [hmot%]	99,16	99,38	98,96
Strata žíhaním pôvodného vzorku A_{LOI} [hmot%]	99,23	99,44	99,05
Zvyšok po žíhaní sušiny W_{ROI} [hmot%]	0,84	0,62	1,04
Zvyšok po žíhaní pôvodného vzorku A [hmot%]	0,77	0,56	0,95

Tabuľka 5.2 Výsledky pre štrôvík

Vzorka	Štrôvík		
číslo misky	55	13	11
m_a [g]	17,252	15,881	16,831
m_b [g]	18,809	16,892	17,904
m_c [g]	18,673	16,809	17,807
m_d [g]	17,336	15,936	16,887
Sušina W_{dm} [%]	91,27	91,79	90,96
Obsah vody W [%]	8,73	8,21	9,04
Strata žíhaním sušiny W_{LOI} [hmot%]	94,09	94,07	94,26
Strata žíhaním pôvodného vzorku A_{LOI} [hmot%]	94,61	94,56	94,78
Zvyšok po žíhaní sušiny W_{ROI} [hmot%]	5,91	5,93	5,74
Zvyšok po žíhaní pôvodného vzorku A [hmot%]	5,39	5,44	5,22

Tabuľka 5.3 Výsledky pre slamu

<i>Vzorka</i>	<i>Slama</i>		
číslo misky	38	18*	19
m_a [g]	18,797	18,878	14,741
m_b [g]	19,657	19,49	15,356
m_c [g]	19,592	19,447	15,313
m_d [g]	18,852	18,916	14,78
Sušina W_{dm} [%]	92,44	92,97	93,01
Obsah vody W [%]	7,56	7,03	6,99
Strata žíhaním sušiny W_{LOI} [hmot%]	93,08	93,32	93,18
Strata žíhaním pôvodného vzorku A_{LOI} [hmot%]	93,60	93,79	93,66
Zvyšok po žíhaní sušiny W_{ROI} [hmot%]	6,92	6,68	6,82
Zvyšok po žíhaní pôvodného vzorku A [hmot%]	6,40	6,21	6,34

Tabuľka 5.4 Výsledky pre slnečnicu

<i>Vzorka</i>	<i>Slnečnica</i>		
číslo misky	52	611	152
m_a [g]	19,222	20,847	20,417
m_b [g]	20,102	21,889	21,21
m_c [g]	20,042	21,813	21,152
m_d [g]	19,248	20,881	20,442
Sušina W_{dm} [%]	93,18	92,71	92,69
Obsah vody W [%]	6,82	7,29	7,31
Strata žíhaním sušiny W_{LOI} [hmot%]	96,83	96,48	96,60
Strata žíhaním pôvodného vzorku A_{LOI} [hmot%]	97,05	96,74	96,85
Zvyšok po žíhaní sušiny W_{ROI} [hmot%]	3,17	3,52	3,40
Zvyšok po žíhaní pôvodného vzorku A [hmot%]	2,95	3,26	3,15

5.2 CELKOVÁ ANALÝZA

Vykonaním celkovej analýzy sa dospeje k obsahu dôležitých prvkov daných vzoriek.

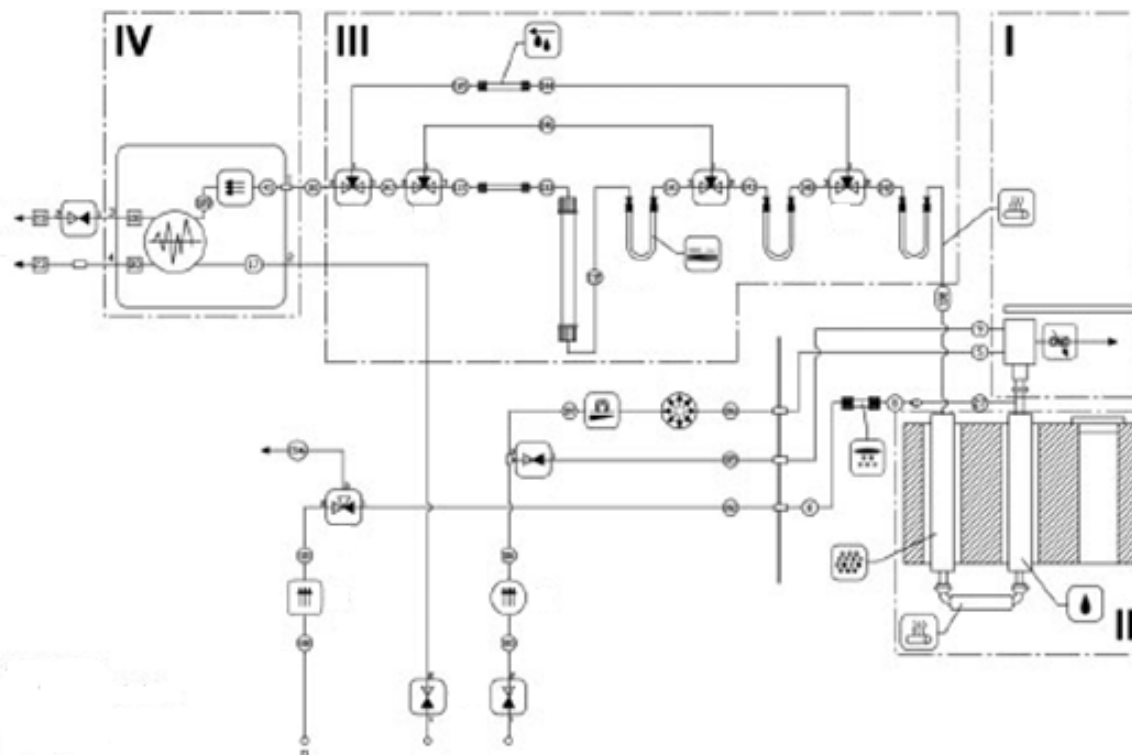
5.2.1 PRINCÍP ELEMENTÁRNEJ ANALÝZY

Pre stanovenie spalného tepla výpočtom je potrebné poznať chemické zloženie vzoriek paliva, ktoré sa zistí elementárnou analýzou. Na túto analýzu sa použil prístroj vario MACRO cube od firmy Elementar na obr. 5.1. Princíp práce prístroja je spracovaný z príručky vario MACRO [29].



Obr. 5.1 Prístroj Elementar vario MACRO cube

Pre vysvetlenie procesu elementárnej analýzy slúži nasledujúca schéma funkčných jednotiek analyzátoru prvkov v režime CHNS (analyzované prvky uhlík, vodík, dusík a síra) na obr. 5.2.



Obr. 5.2 Schéma funkčných jednotiek analyzátoru prvkov v režime CHNS [29]

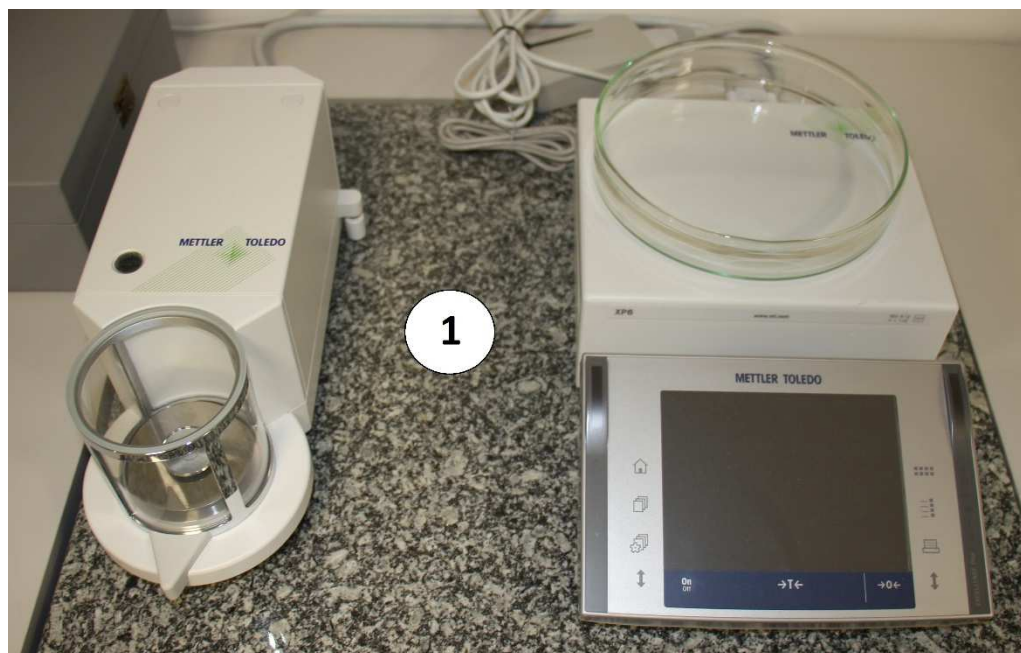
Funkčné jednotky sú :

- I – mechanika vkladania vzoriek
- II – priestor piecky a reakčná zóna
- III – separátor
- IV – detektor

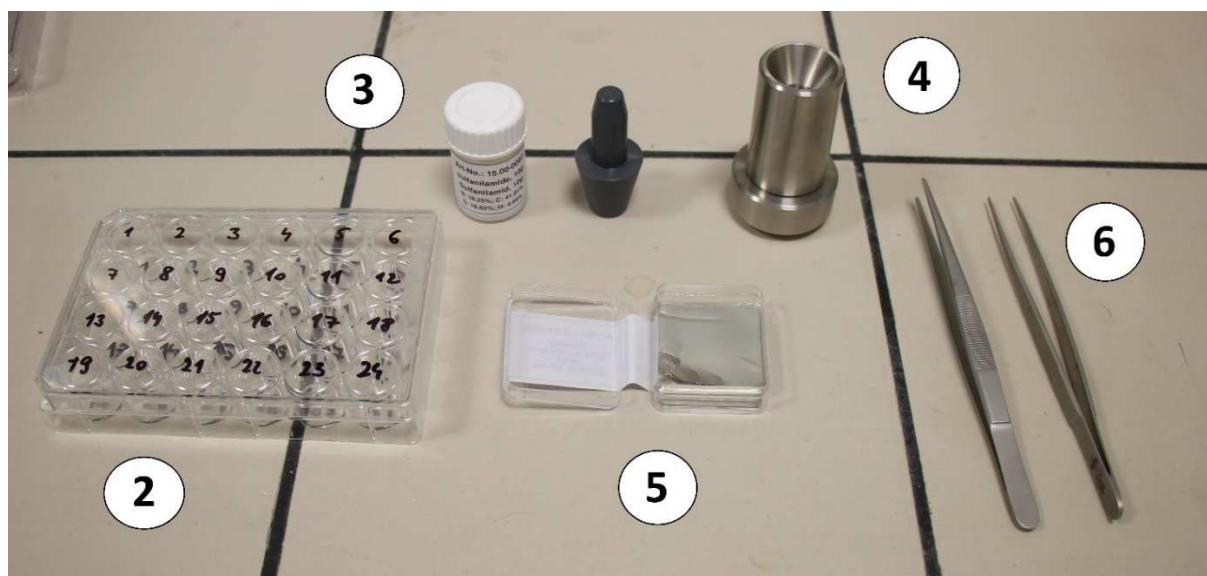
Po vložení vzorky do otočného karuselu (zásobníku), ktorý drží vzorky v očíslovaných radách, prenáša vzorky do guľového ventilu. V guľovom ventile je aktuálna vzorka zbavená vonkajšieho ovzdušia héliom a prenesená do spaľovacej trubice. Piecka drží spaľovaciu a redukčnú trubicu na konštantnej teplote. V spaľovacej trubici sa nachádza spaľovací katalyzátor a dochádza k dokonalému spáleniu vzorky. V trubici sa nachádza náplň, ktorá naviaže rušiacie prvky alkálií a alkalických zemín. Redukčná trubica s náplňou viaže nadbytok kyslíku, redukuje NO_x na N₂ a viaže prchavé zlúčeniny halových prvkov. V separátore sa nachádzajú absorpčné kolóny a dodatočné absorpčné trubice. V analyzovanej vzorke absorpčné kolóny absorbujú merané prvky CO₂, H₂O, SO₂ a zvýšením teploty umožňujú definovanú desorpciu jednotlivých prvkov. Dodatočné absorpčné trubice naviažu zvyšné H₂O na absorpčnej kolóne behom desorpcie CO₂ a SO₂. Samotné prvky C, H, N, S sú detekované tepelne vodivostným detektorom (TCD), ktorý zostáva z dvoch komôr vytvárajúcich merací mostík. Behom analýzy preteká zmes analyzovaných plynov komorou meracej kyvety a čisté hélium komorou referenčnej kyvety. Malé množstvo cudzích plynov ako sú N₂, CO₂, H₂O, SO₂ citlivo reagujú s tepelnou vodivosťou nosného plynu He. Ak je niektorý z meraných

prvkov prítomný v analyzovanej zmesi plynov dôjde k narušeniu meracieho mostíka, ktorý sa digitalizuje elektrickým signálom a prenesie do počítača.

Ako prvou úlohou bolo pripravenie vzoriek na analýzu. K tomu slúžili nástroje na obr. 5.3 a obr. 5.4.



Obr. 5.3 Analytické váhy Metler Toledo



Obr. 5.4 Nástroje potrebné k elementárnej analýze

- 1) Analytické váhy Metler Toledo
- 2) Vzorkovnica
- 3) Sulfanilamid
- 4) Tvarovník fólií
- 5) Cínové fólie
- 6) Pinzety

5.2.2 POSTUP ELEMENTÁRNEJ ANALÝZY

Nasledovný postup je spracovaný z príručky vario MACRO [29]. K príprave vzoriek je potrebné používať latexové rukavice a so vzorkami manipulovať len pomocou pinzety. V prípade styku kože a vzorky by došlo k ovplyvneniu výsledkov analýzy. Pri vyberaní fólií z obalu je nutné danú fóliu odvážiť, aby sa pre jednu vzorku použila vždy len jedna fólia (približne 70 mg). Použitím viac ako jednej fólie by sa mohol prístroj poškodiť.

Obr. 5.5 slúži pre ilustráciu nasledujúceho postupu. Navážilo sa 7 vzoriek sulfanilamidu, 9 prázdnych fólií pre prečistenie systému a 6 vzoriek z každého typu podrvených peliet s navážkou 7 – 12 mg na analytických váhach. Navážka sa zabalila do fólie pomocou tvarovníka a pinzety do tvaru malého „balíčku“, ktorý nesmel byť prederavený, ani sa z neho nemohla vzorka sypať. Pripravené vzorky sa priebežne vkladali do vzorkovnice na danú očíslovanú pozíciu. Číslo vzorky vo vzorkovnici sa zhodovalo s číslom na zásobníku prístroja vario MACRO cube. Váha každej vzorky sa zaznamenala do počítačového software-u, na rozdiel od 9 prázdnych prečisťovacích fólií, kde bola predvyplnená váha 1 mg.

Na začiatku merania bolo potrebné vyčistiť systém pomocou sekvencie RunIn analýz. Metóda prvej analýzy bola sulf1 so vzorkou sulfanilamid s pred vyplnenou váhou 1 mg. Pokračovalo sa s 6 RunIn analýzami, 3 metódou blank with O₂, 1 metódou blank without O₂ a 1 metódou blank with O₂. Prvý krok skontroloval prietok kyslíku v systéme. Ďalšie kroky čistili systém, aby sa dosiahlo hodnôt N, C, H, S Area menších ako N<50, C<50, H<200, S<50. Ďalšie 4 analýzy Blnk (blankov) metódou blank with O₂ určilo hodnoty prvkov pre prázdne fólie.

Nasledovala séria 6 navážených vzoriek sulfanilamidu metódou sulf1. Prvé 2 vzorky prečistili systém analýzou RunIn. Ďalšie 3 vzorky určili hodnoty štandardu sulfanilamidu.

Tento krok je nutný z dôvodu kalibrácie. Je nutné vytvoriť koreláciu medzi signálom detektoru a absolútnym obsahom prvku v analyzovanom vzorku sulfanilamidu, ktorého obsah prvkov je známy. Na základe známeho obsahu prvkov v sulfanilamide a jeho navážok software vypočíta kalibračné faktory. Posledná vzorka bola testová, ktorá ukázala zhodu hodnôt zistených analýzou s hodnotami na štítku sulfanilamidu. Po vyčistení a štandardizácii sa pristúpilo k samotnej analýze zloženia peliet metódou coal10. Pred každým typom vzorky boli 2 RunIn analýzy danej vzorky slúžiace ako príprava na meranie, nasledované 4 vzorkami samotnej analýzy.

File Edit View System Math. Statistics Calibration Windows Options Help												
No.	Weight [mg]	Name	Method	C [%]	H [%]	N [%]	S [%]	N Area	C Area	H Area	S Area	
✓ 1	1.0000	RunIn	sulf1	227.30	41.684	86.04	56.226	10 772	20 395	12 012	2 259	
✓ 2	1.0000	RunIn	blank with O2	0.41	2.212	0.28	14.798	56	94	349	639	
✓ 3	1.0000	RunIn	blank with O2	2.81	1.094	0.35	7.787	64	321	151	355	
✓ 4	1.0000	RunIn	blank with O2	0.17	0.377	0.31	3.959	60	72	89	201	
✓ 5	1.0000	RunIn	blank without O2	0.22	0.241	0.00	2.212	17	77	78	131	
✓ 6	1.0000	RunIn	blank with O2	3.97	0.065	0.54	1.002	87	430	63	82	
✓ 7	1.0000	Blnk	blank with O2	0.00	0.000	0.00	0.000	47	83	63	57	
✓ 8	1.0000	Blnk	blank with O2	0.00	0.000	0.00	0.000	17	58	72	41	
✓ 9	1.0000	Blnk	blank with O2	0.00	0.000	0.00	0.000	20	42	50	33	
✓ 10	1.0000	Blnk	blank with O2	0.00	0.000	0.00	0.000	3	41	41	37	
✓ 11	9.0870	RunIn	sulf1	41.73	3.717	29.17	14.300	33 668	33 953	9 533	5 104	
✓ 12	11.4370	RunIn	sulf1	41.52	4.019	22.83	14.605	33 161	42 657	13 342	6 702	
✓ 13	7.6870	sulfanilamide	sulf1	41.65	3.798	18.87	15.672	18 172	28 686	8 103	4 730	
✓ 14	9.5550	sulfanilamide	sulf1	41.81	4.650	16.26	18.620	19 956	35 735	10 767	5 817	
✓ 15	10.0260	sulfanilamide	sulf1	41.81	4.650	16.26	18.620	20 788	37 444	11 571	6 354	
✓ 16	11.3160	Test	sulf1	41.48	4.803	16.10	19.808	23 405	42 165	13 519	7 593	
✓ 17	7.0190	RunIn	coal10	45.82	6.307	0.77	9.529	676	28 766	10 828	2 231	
✓ 18	8.4170	RunIn	coal10	45.89	6.154	0.65	4.808	687	34 529	12 844	1 383	
✓ 19	10.0230	drevene	coal10	45.70	6.392	0.57	2.429	718	41 159	16 033	855	
✓ 20	10.9670	drevene	coal10	45.49	6.644	0.78	1.371	1 070	44 792	18 200	546	
✓ 21	10.6460	drevene	coal10	45.44	6.527	0.72	0.910	955	43 441	17 382	366	
✓ 22	7.5120	drevene	coal10	45.84	6.154	0.62	0.762	588	30 797	11 356	232	
✓ 23	9.2830	RunIn	coal10	43.07	5.788	1.42	0.444	1 642	35 745	13 355	179	
✓ 24	8.1580	RunIn	coal10	43.26	5.751	1.38	0.382	1 403	31 563	11 538	146	
✓ 25	11.5890	stovik	coal10	43.13	6.103	1.33	0.186	1 919	44 868	17 684	114	
✓ 26	8.9850	stovik	coal10	43.25	5.952	1.35	0.165	1 519	34 742	13 288	91	
✓ 27	8.0050	stovik	coal10	43.09	5.968	1.32	0.165	1 319	30 845	11 769	86	
✓ 28	7.8660	stovik	coal10	43.17	5.856	1.37	0.108	1 342	30 372	11 310	70	
✓ 29	8.5790	RunIn	coal10	42.75	5.997	0.74	0.038	791	32 795	12 750	53	
✓ 30	10.5640	RunIn	coal10	42.62	6.174	0.77	0.052	1 011	40 469	16 324	60	
✓ 31	8.8660	slama	coal10	42.28	6.043	0.83	0.012	918	33 513	13 315	46	
✓ 32	8.0070	slama	coal10	42.39	6.003	0.80	0.002	801	30 354	11 847	43	
✓ 33	9.1320	slama	coal10	41.70	5.953	0.80	0.030	913	34 049	13 522	51	
✓ 34	11.1380	slama	coal10	42.27	6.253	0.80	0.030	1 114	42 290	17 420	53	
✓ 35	11.1230	RunIn	coal10	46.87	6.577	0.96	0.017	1 327	46 783	18 270	48	
✓ 36	11.7090	RunIn	coal10	46.73	6.698	0.97	0.021	1 420	49 073	19 505	50	
✓ 37	11.5980	slunecnice	coal10	46.68	6.639	0.99	0.049	1 429	48 562	19 175	61	
✓ 38	7.4350	slunecnice	coal10	47.01	6.268	0.84	0.015	783	31 259	11 455	46	
✓ 39	8.7960	slunecnice	coal10	47.08	6.480	0.96	0.022	1 050	37 013	14 215	48	
✓ 40	7.3890	slunecnice	coal10	46.96	6.345	0.91	0.039	836	31 033	11 531	51	

Obr. 5.5 Ilustrácia postupu elementárnej analýzy

5.2.3 VÝSLEDKY ELEMENTÁRNEJ ANALÝZY

V nasledujúcej tab. 5.5 sa nachádzajú výsledky elementárnej analýzy pre dané agropelety.

Z tejto tabuľky sú prvé dve hodnoty obsahu síry u dreva viditeľne vyššie ako posledné dve hodnoty. Táto nepresnosť v meraní bola spôsobená nedostatočným prečistením systému na detekciu síry na začiatku analýzy. V budúcnosti by obsah síry vo vzorku dreva bolo potrebné namerať znova. Pre ďalšie výpočty sú prvé dve hodnoty obsahov prvkov u dreva zanedbané.

Tabuľka 5.5 Výsledky elementárnej analýzy

Typ vzorky	Hmotnosť [g]	C [%]	H [%]	N [%]	S [%]
Drevo	10,023	45,7	6,39	0,57	2,43
	10,70	45,49	6,64	0,78	1,37
	10,60	45,44	6,53	0,72	0,91
	7,20	45,84	6,15	0,62	0,76
Šťovík	11,90	43,13	6,10	1,33	0,19
	8,50	43,25	5,95	1,35	0,17
	8,005	43,09	5,97	1,32	0,17
	7,60	43,17	5,86	1,37	0,11
Slama	8,60	42,28	6,04	0,83	0,01
	8,007	42,39	6,00	0,8	0,002
	9,132	41,7	5,95	0,8	0,03
	11,138	42,27	6,25	0,8	0,03
Slničnica	11,80	46,68	6,64	0,99	0,05
	7,50	47,01	6,27	0,84	0,02
	8,60	47,08	6,48	0,96	0,02
	7,90	46,96	6,35	0,91	0,04

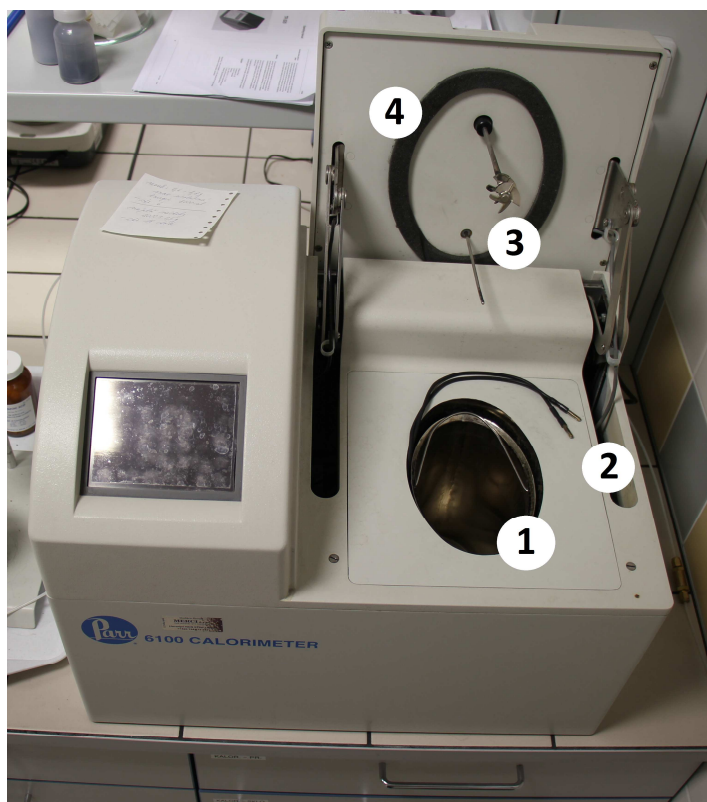
6 SPALNÉ TEPLLO

Stanovenie spalného tepla prebehlo dvomi spôsobmi na základe predošlých analýz:

1. kalorimetrom,
2. výpočtom.

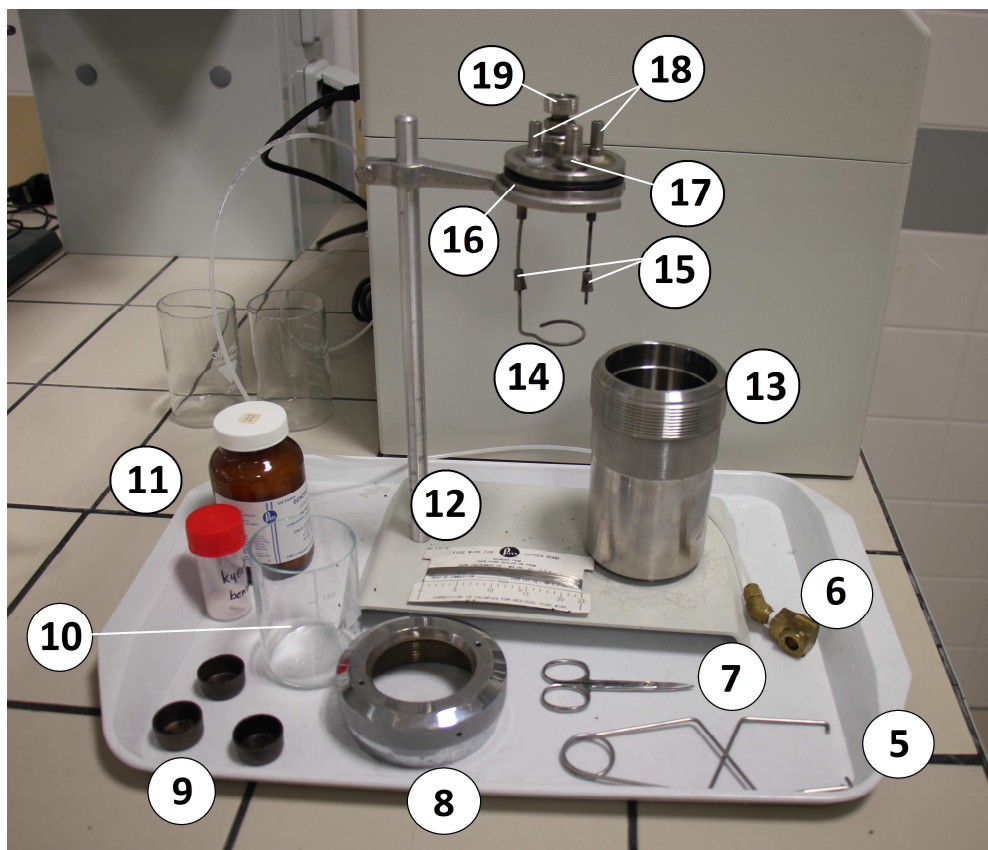
6.1 KALORIMETER

Experimentálne stanovenie spalného tepla bolo vykonané na prístroji Calorimeter Parr 6100 na obr. 6.1 spolu s pomôckami a súčasťami kalorimetru na obr. 6.2.



Obr. 6.1 Calorimeter Parr 6100

- 1) Kalorimetrická nádoba
- 2) Zapal'ovacie vodiče
- 3) Miešadlo
- 4) Veko kalorimetru



Obr. 6.2 Pomôcky a súčasti kalorimetru

- 5) kliešte
- 6) plniaci konektor kyslíku
- 7) nožnice
- 8) skrutkovacie prevlečné veko
- 9) kovový téglík
- 10) kadička
- 11) kyselina benzoová
- 12) drôtik
- 13) spaľovacia tlaková bomba
- 14) držiak téglíku
- 15) dierky na drôtik
- 16) veko spaľovacej bomby
- 17) plniaci ventil
- 18) dierky na zapal'ovacie vodiče
- 19) ihlový ventil

Princíp stanovenia spalného tepla v kalorimetri podľa návodu [30] spočíva v úplnom spálení paliva za prítomnosti kyslíka pod tlakom v kalorimetrickej tlakovej nádobe. Táto nádoba je ponorená vo vode, ktorá prijme teplo uvoľnené spálením paliva. Spalné teplo prístroj určí automaticky podľa vzťahu (6.1).

$$Q_s = \frac{c \cdot D_t - e_1 - e_2 - e_3}{m} \quad (6.1)$$

Kde

- c je tepelná kapacita kalorimetrického systému [$J \cdot K^{-1}$];
D_t celkový nárast teploty [K];
e₁ teplo vyprodukované spálením dusíka obsiahnutého vo vzduchu bomby pri vytváraní kyseliny dusičnej [J];
e₂ teplo vyprodukované vytváraním kyseliny sírovej reakciou oxidu siričitého, vody a kyslíka [J];
e₃ teplo vyprodukované spálením drôtu [J];
m hmotnosť vzorku paliva [g].

6.1.1 POSTUP STANOVENIA SPALNÉHO TEPLA KALORIMETROM

Do kalorimetrickej nádoby sa pomocou odmernej banky naleje $2000 \pm 0,5$ g demineralizovanej vody s teplotou $1 - 2$ °C menšou než je teplota nádoby. Navážená vzorka s hmotnosťou $0,6 - 1,2$ g sa vloží do kovového téglíku, ktorý sa umiestni do držiaku na veku spaľovacej bomby. Pomocou nožníc sa odstrihne 100 mm drôtu, ktorý sa vloží do dierok na držiaku téglíka. Poloha drôtu sa upraví tak, aby sa dotýkal vzorky a došlo tak k jej zapáleniu. Z dôvodu uvoľnenia plynu z bomby pri jej zatváraní je potrebné uvoľniť ihlový ventil. Do spaľovacej bomby sa umiestni kadička a bomba sa následne uzatvorí vekom. Poistí sa skrutkovacím prevlečným vekom a uzavrie sa ihlový ventil, čím sa bomba utesní. Otvorí sa kyslíková bomba a skontroluje sa tlak za redukčným ventilom, ktorý by mal byť 3 000 kPa. Po zatlačení plniaceho konektoru kyslíka na plniaci ventil sa gombíkom O₂ Fill spustí 60 sekundové plnenie bomby kyslíkom. Po naplnení sa odstráni plniaci konektor a pomocou klieští sa bomba so vzorkou premiestni do kalorimetrickej nádoby s vodou. Do dierok na hornej časti veka bomby sa vložia zapal'ovacie vodiče a kalorimeter sa zatvorí vekom. Kalorimeter je týmto pripravený a môže sa pristúpiť k spáleniu vzorky. Stlačením tlačidla Start sa spustí spaľovací proces v kalorimetri, pričom je na začiatku nutné zadať hmotnosť a obsah síry vzorky. Po stanovení sa bomba vyberie z kalorimetru, uvoľní sa ihlový ventil, čím uniknú spaliny a bomba sa otvorí. Ak sú v téglíku nespálené zvyšky, stanovenie je neúspešné a proces sa musí opakovať. V prípade úspešného spálenia vzorky sa odstráni nespálený drôt a odmeria sa. Hodnota dĺžky drôtu sa zadá do prístroja. Kalorimeter na základe údajov vypočíta spalné teplo a zobrazí výsledky. Kadičku, téglík a bombu je potrebné umyť demineralizovanou vodou a usušiť pred ďalším stanovením. Výsledky stanovenia spalného tepla sú v tab. 6.1.

6.1.2 VÝSLEDKY STANOVENIA SPALNÉHO TEPLA POMOCOU KALORIMETRA

Výsledky stanovenia spalného tepla pomocou kalorimetra sú uvedené v tab. 6.1. Priemer dvoch nameraných hodnôt spalného tepla bude ďalej porovnaný s hodnotami spalného tepla vypočítaného analyticky.

Tabuľka 6.1 Výsledky stanovenia spalného tepla pomocou kalorimetra

Typ vzorky	Hmotnosť m [g]	Obsah síry S [%]	Dĺžka drôtu l [mm]	Spalné teplo Q _s [kJ/kg]	Priemer Q̄ _s [kJ/kg]
Drevo	0,7392	1,37	16	18 467	18 237,6
	0,9179	1,37	17	18 008	
Šťovík	0,8306	0,16	14	17 163	17 218,2
	0,7606	0,16	14	17 274	
Slama	0,8149	0,02	17	17 073	17 069,8
	0,7594	0,02	12	17 066	
Slnečnica	0,6199	0,03	18	19 378	19 186,8
	0,7185	0,03	19	18 995	

6.2 VÝPOČET

Výpočet spalného tepla je založený na znalosti chemického zloženia, obsahu popola, vody a sušiny vzorku paliva.

6.2.1 PREPOČET VÝSLEDKOV Z ELEMENTÁRNEJ ANALÝZY

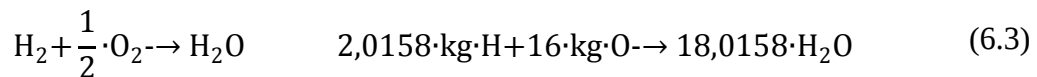
Celková vzorka paliva sa skladá z horľaviny, popola a vody. Elementárna analýza určila obsah jednotlivých prvkov pre celkovú vzorku. Pre nasledujúce empirické vzťahy je ale nutné zadať obsah prvkov len v horľavine. Preto sa musia výsledky z elementárnej analýzy prepočítať.

Pre každú analýzu je nutné dopočítať obsah kyslíku podľa nasledujúceho vzťahu (6.2).

$$w_O = w_C + w_H + w_O + w_N + w_{S_o} + w_A \quad [\%] \quad (6.2)$$

w _C ; w _H ; w _O ; w _N	hmotnostný podiel uhlíku, vodíku, kyslíku a dusíku v percentách [%].
w _{S_o}	hmotnostný podiel síry [%],
w _A	hmotnostný podiel popola v pôvodnom vzorku [%],
w _w	hmotnostný podiel všetkej vody [%].

Výsledky z jednotlivých analýz sa spriemerujú. Od obsahov vodíku a kyslíku je nutné odčítať vodík a kyslík obsiahnutý vo vode. Zo stechiometrickej rovnice vody (6.3) sa vypočíta všeobecné zastúpenie vodíka a kyslíka vo vode vyjadrených v hmotnostných zlomkoch podľa (6.4). Relatívna atómová hmotnosť bola zistená z [24].



$$\text{H}_v = 2,0158 / 18,0158 \quad \text{O}_v = 16 / 18,0158 \quad (6.4)$$

Pre jednotlivé vzorky sa konkrétny obsah kyslíku a vodíku vo vode vyjadrený v hmotnostných zlomkoch vypočíta podľa nasledujúceho zvähu (6.5):

$$\text{H} = \text{W} \cdot \text{H}_v \quad \text{O} = \text{W} \cdot \text{O}_v \quad (6.5)$$

Tieto hodnoty sa potom odčítajú od celkového obsahu vodíku a kyslíku. Teraz súčet obsahov všetkých prvkov tvorí 100 % horľaviny, takže sa akurát prepočíta pomer jednotlivých prvkov na objem horľaviny. Tieto obsahy prvkov sa použijú pre výpočet spálneho tepla. Celý výpočet sa nachádza v Exceli, ktorý je uvedený v prílohe tohto dokumentu.

6.2.2 VLASTNÝ VÝPOČET SPALNÉHO TEPLA

Po predošlých analýzach je známe zloženie paliva (teda obsah w_C ; w_H ; w_O ; w_N ; w_{SO} ; w_A ; w_w) a je možné k výpočtu spálneho tepla využiť empirické vzťahy (6.6) – (6.14) [26], [31].

P. Dulong (1843)

$$Q_s = 339 \cdot w_C + 1440 \cdot \left(w_H - \frac{w_O}{8} \right) + 105 \cdot w_S \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.6)$$

Mendelejev (1897)

$$Q_s = 339 \cdot w_C + 1256 \cdot w_H - 109 \cdot (w_O - w_S) \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.7)$$

G. Strache a R.Lant (1924)

$$Q_s = 340,6 \cdot w_C + 1432,4 \cdot w_H + 104,6 \cdot w_S - 153,2 \cdot w_O \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.8)$$

Steuer (1926)

$$Q_s = 339 \cdot \left(w_C - \frac{3}{8} \cdot w_O \right) + 239 \cdot \left(\frac{3}{8} \cdot w_O \right) + 1444 \cdot \left(w_H - \frac{w_O}{16} \right) + 105 \cdot w_S \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.9)$$

Grummel, Davies (1933)

$$Q_s = (15,22 \cdot w_H + 987,5) \cdot \left(\frac{w_C}{3} + w_H - \frac{w_O - w_S}{8} \right) \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.10)$$

Michel (1938)

$$Q_s = 340,3 \cdot w_C + 1243,2 \cdot w_H + 62,8 \cdot w_N + 190,9 \cdot w_S - 98,4 \cdot w_O \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.11)$$

V.Boie (1957)

$$Q_s = 351,6 \cdot w_C + 1162 \cdot w_H - 110,9 \cdot w_O + 104,6 \cdot w_S \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.12)$$

Schuster (1957)

$$Q_s = 339 \cdot w_C + 1423 \cdot \left(w_H - \frac{w_O}{8} \right) + 92 \cdot w_S \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.13)$$

Institute of Gas Technology (1990)

$$Q_s = 341 \cdot w_C + 1322 \cdot w_H + 68,5 \cdot w_S - 120 \cdot (w_O - w_N) \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6.14)$$

Pomocou týchto empirických vzťahov sa spočíta spalné teplo horľaviny. Pre výpočet výhrevnosti je potrebné toto spalné teplo prepočítať na spalné teplo sušiny podľa (6.15) a spalné teplo pôvodného vzorku podľa (6.16) [25]:

$$Q_{ss} = Q_{sh} \cdot \left(\frac{1 - (W + A)}{W_{dm}} \right) \quad (6.15)$$

$$Q_{sp} = Q_{ss} \cdot W_{dm} \quad (6.16)$$

Kde

- Q_{sh} Spalné teplo horľaviny [kJ/kg];
 Q_{ss} Spalné teplo sušiny [kJ/kg];
 Q_{sp} Spalné teplo pôvodného vzorku [kJ/kg].

6.2.3 VÝPOČET VÝHREVNOSTI

Výhrevnosť pôvodného vzorku pri 20 °C sa vypočíta zo spálneho tepla pôvodného vzorku paliva podľa vzťahu (6.17) [25]:

$$Q_i = Q_s - r_{H_2O} \cdot (W + 8,937 \cdot x_H) \quad (6.17)$$

Kde

- Q_i Výhrevnosť pôvodného paliva [kJ/kg];
 Q_s Spalné teplo pôvodného paliva [kJ/kg];
 r_{H_2O} Výparné teplo vody [kJ/kg] (pri 20 °C je $r_{H_2O} = 2\,454$ kJ/kg);
 x_H Obsah spaliteľného vodíku v pôvodnom palive [hm. zlomok];
 W Obsah vody v palive [hm. zlomok].

Výsledky spálneho tepla vypočítané pomocou vzťahov sú porovnané v kap. 8.2. Pred samotným výpočtom je potrebné štatisticky zhodnotiť namerané veličiny.

7 ŠTATISTICKÉ SPRACOVANIE DÁT

Táto kapitola sa zaoberá štatistickým spracovaním nameraných dát z kapitol 5, 6, a 7. Z každého merania boli zistené minimálne dve hodnoty, ktoré je možné štatisticky spracovať. Bol spočítaný aritmetický priemer, smerodajná odchýlka a interval spoľahlivosti. Aritmetický priemer $\bar{x}$ pre nespracované dáta sa vypočíta pomocou vzťahu (7.1) [32].

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (7.1)$$

Kde

x_i sú jednotlivé hodnoty;

n je celkový počet hodnôt výberu.

Smerodajná odchýlka σ určuje ako sú jednotlivé hodnoty odchýlené od priemernej hodnoty. Vypočíta sa podľa vzťahu (7.2) [32].

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2\right)} \quad (7.2)$$

Interval spoľahlivosti s_n predstavuje rozsah hodnôt. Priemerná hodnota vzorky $\bar{x}$ sa nachádza v strede rozsahu $\bar{x} \pm s_n$ s koeficientom spoľahlivosti 95 %. Vypočíta sa podľa vzťahu (7.3) [33].

$$s_n = \sqrt{\left(\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2\right)} * \sqrt{\frac{1}{n}} \quad (7.3)$$

7.1 SPRACOVANIE TECHNICKEJ ANALÝZY

Pre ďalšie výpočty sú z technickej analýzy dôležité hodnoty obsahu vody W a obsah popola v pôvodnom vzorku A .

Tabuľka 7.1 Spracovanie technickej analýzy

	Vzorky	Drevo	Šťovík	Slama	Slnečnica
	Obsah vody W [%]	8,75	8,66	7,19	7,14
$\bar{x}$	A popol v pôvodnom vzorku [hmot%]	0,76	5,35	6,32	3,12
	W_{dm} [%] sušina	91,25	91,34	92,81	92,86
	Obsah vody W [%]	0,1313	0,3429	0,2592	0,2291
σ	A popol v pôvodnom vzorku[hmot%]	0,1571	0,0954	0,0782	0,1276
	W_{dm} [%] sušina	0,1313	0,3429	0,2592	0,2291
	Obsah vody W [%]	0,1485	0,3881	0,2934	0,2592
s_n	A popol v pôvodnom vzorku[hmot%]	0,1777	0,1080	0,0885	0,1444
	W_{dm} [%] sušina	0,1485	0,3881	0,2934	0,2592

V tab. 7.1 je viditeľné, že smerodajná odchýlka a interval spoľahlivosti dosahujú veľké hodnoty pri obsahu vody vzoriek slamy, šťovíku a slnečnice. Naopak hodnoty intervalu spoľahlivosti sú nízke u vzoriek dreva.

7.2 SPRACOVANIE CELKOVEJ ANALÝZY

Tab. 7.2 vyhodnocuje elementárnu analýzu celkového vzorku.

Tabuľka 7.2 Spracovanie celkovej analýzy celkového vzorku

	Prvky	C [%]	H [%]	N [%]	S [%]
$\bar{x}$	Drevo	45,64	6,34	0,67	0,84
	Šťovík	43,16	5,97	1,34	0,16
	Slama	42,16	6,06	0,81	0,02
	Slnečnica	46,93	6,43	0,93	0,03
σ	Drevo	0,2	0,1865	0,05	0,074
	Šťovík	0,059161	0,088052	0,019203	0,029009
	Slama	0,269722	0,114237	0,01299	0,012031
	Slnečnica	0,151884	0,14108	0,056789	0,013461
s_n	Drevo	0,195996	0,182767	0,048999	0,072519
	Šťovík	0,057977	0,08629	0,018818	0,028428
	Slama	0,264323	0,11195	0,01273	0,01179
	Slnečnica	0,148844	0,138256	0,055652	0,013191

Z tab. 7.2 sú viditeľné nízke hodnoty intervalu spoľahlivosti pre všetky vzorky. Vzorka dreva dosahuje prijateľné výsledky obsahu síry vďaka vyradeniu prvých dvoch chybných hodnôt obsahu prvkov.

8 ZHODNOTENIE A POROVNANIE VÝSLEDKOV

V tejto kapitole sú porovnané spalné teplá palív, vplyv chemického zloženia na emisie a činnosť kotlov.

8.1 UVEDENIE VÝSLEDKOV VÝHREVNOSTI

Výhrevnosť pôvodného vzorku bola spočítaná vzťahom (6.17).

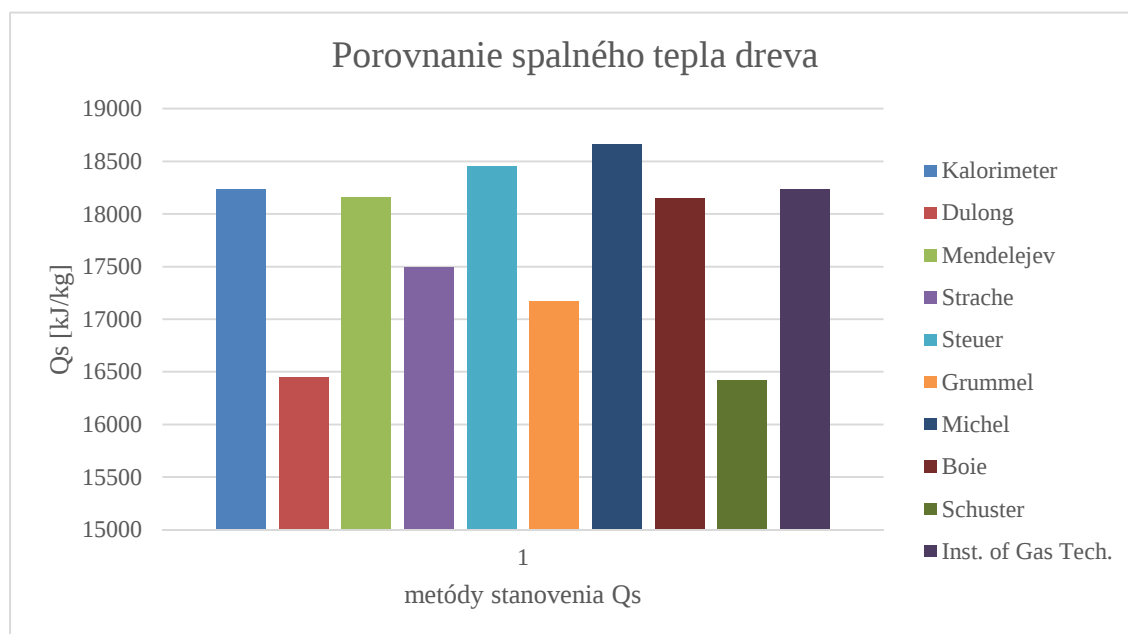
Tabuľka 8.1 Výhrevnosť agropeliet

	Výhrevnosť Q_i [kJ/kg]
Drevo	16 296
Šťovík	15 210
Slama	14 906
Slnečnica	17 239

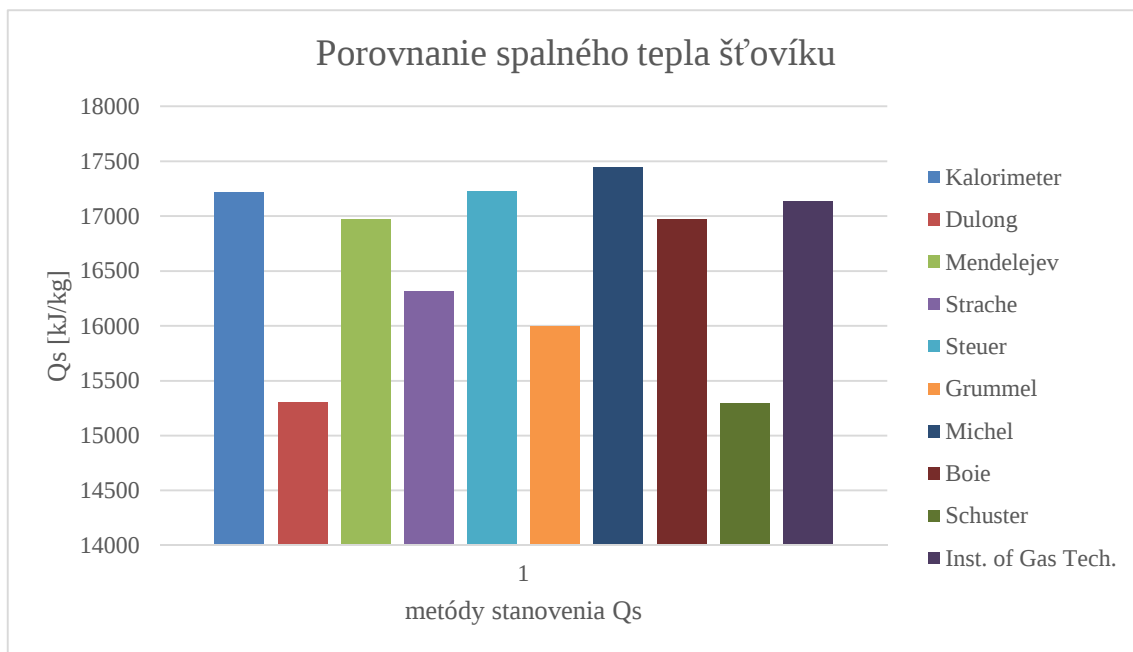
Slnečnicové agropelety dosahujú najvyššiu výhrevnosť spolu s drevenými. Najmenšiu výhrevnosť majú slamené pelety.

8.2 POROVNANIE SPALNÉHO TEPLA ZÍSKANÉHO KALORIMETROM A POMOCOU VÝPOČTOV

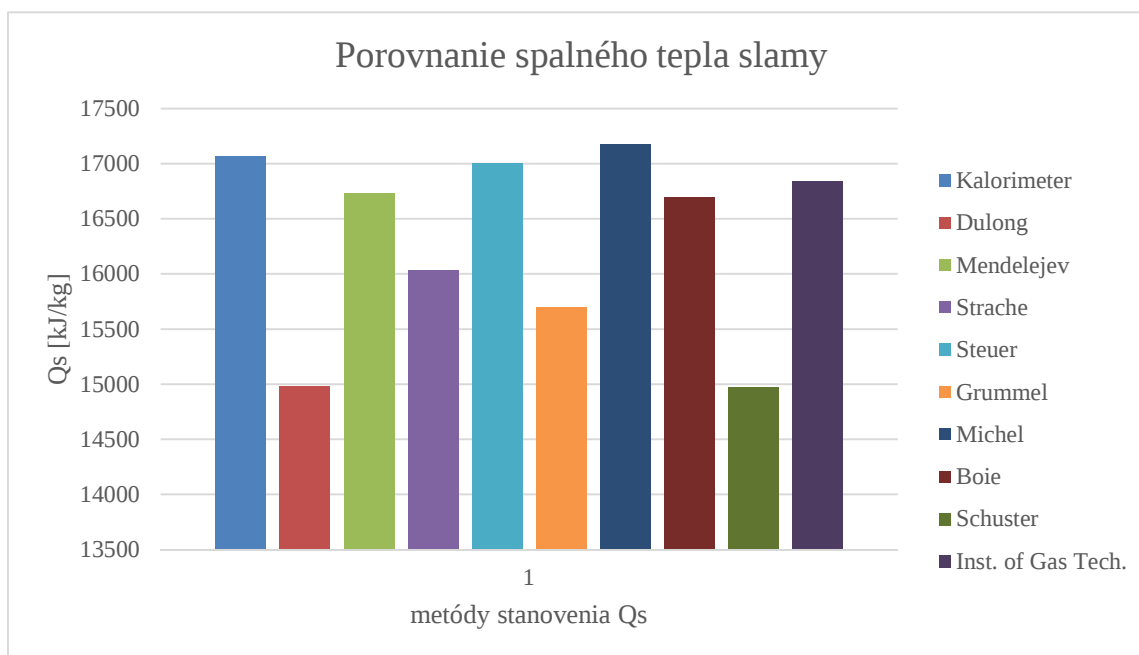
V tejto podkapitole sú porovnané jednotlivé empirické vzťahy (6.6-6.14) s hodnotou spalného tepla zistenou kalorimetrom. Pretože kalorimeter udáva spalné teplo celého vzorku, výsledky z empirických vzťahov, ktoré udávajú spalné teplo len horľaviny boli prepočítané na spalné teplo celého vzorku. Jednotlivé výsledky sú porovnané v nasledujúcich grafoch.



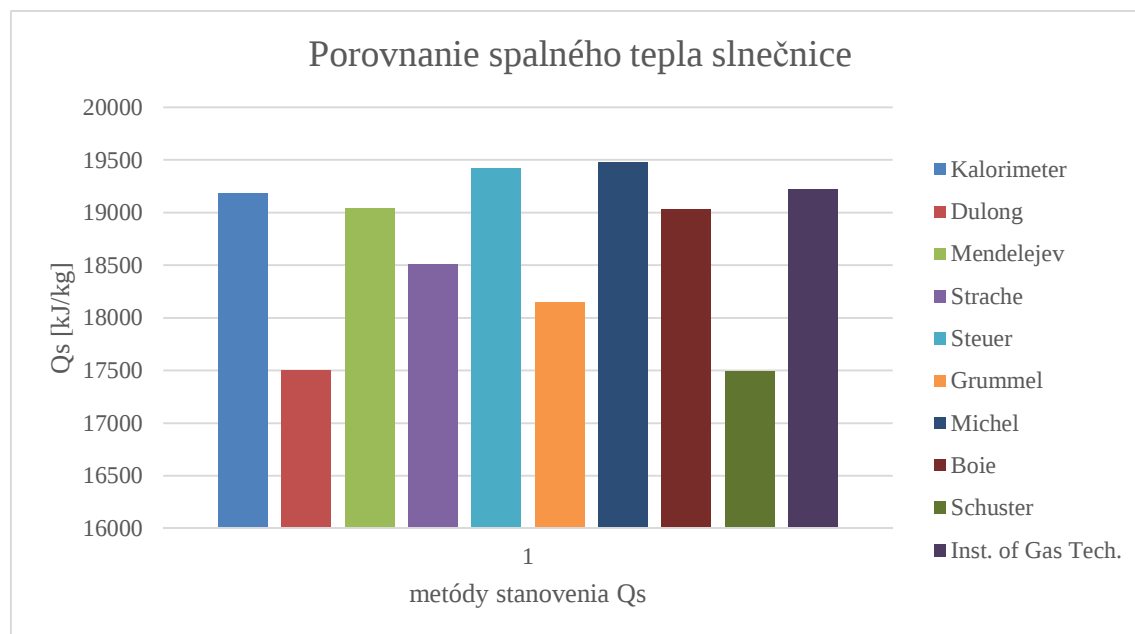
Graf 8.1 Porovnanie spalného tepla dreva



Graf 8.2 Porovnanie spalného tepla š'ovíku



Graf 8.3 Porovnanie spalného tepla slamy

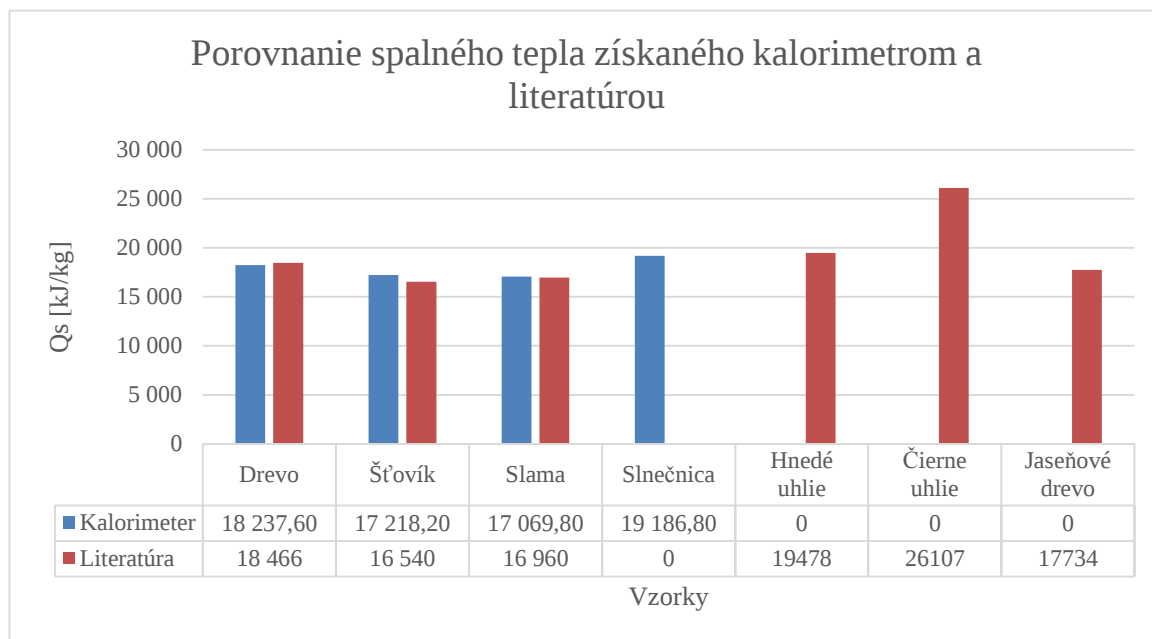


Graf 8.4 Porovnanie spalného tepla slnečnice

Z grafov 8.1 až 8.4 vyplýva ako najspoľahlivejšia metóda výpočtu spalného tepla pre všetky dané vzorky peliet Institute of Gas Technology a Steuer. Boie a Mendelejev dosahuje tiež uspokojivé výsledky. Pre vzorky drevených peliet sa hodnote spalného tepla zisteného kalorimetrom najviac približovala metóda podľa Institute of Gas Technology. Pre nedrevné vzorky štróvíku, slamy a slnečnice boli najbližšie metódy podľa Steueru a Institute of Gas Technology, pričom aj metódy Mendelejev, Boie a Michel sú dostatočne presné. Pre budúce merania je vhodné počítať len so spomenutými vzťahmi.

8.3 POROVNANIE SPALNÉHO TEPLA ZÍSKANÉHO KALORIMETROM A LITERATÚROU

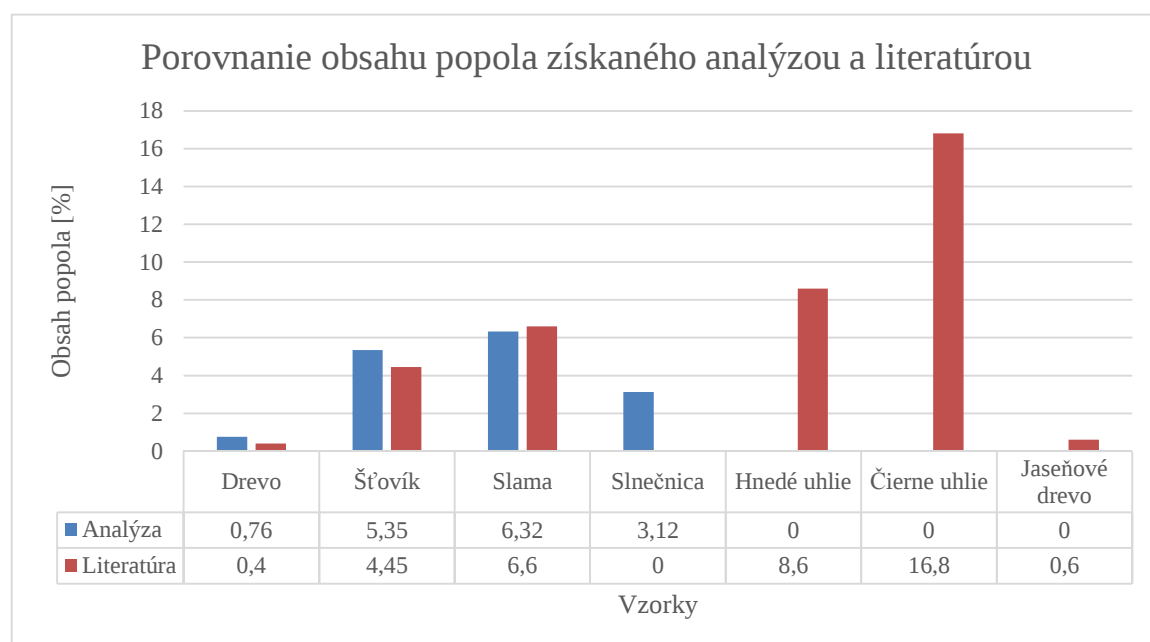
V porovnaní spalných tepiel jednotlivých vzoriek peliet sa vychádza z hodnôt získaných pomocou kalorimetra a literatúry. Literárne ani iné internetové zdroje neuvádzajú hodnotu spalného tepla ani chemického zloženia slnečnicových peliet a tak je táto vzorka považovaná za relevantnú a bude porovnaná s ostatnými palivami. Z grafu 8.5 je viditeľný veľmi malý rozdiel spalných tepiel zistených kalorimetrom a z literatúry, z čoho plynú len malé odchýlky od nameraných veličín v tejto bakalárskej práci. Zo zadaných vzoriek má najväčšie spalné teplo slnečnica. V porovnaní s inými bežne využívanými palivami má slnečnica podobné hodnoty spalného tepla ako hnedé uhlie a jaseňové drevo, no čierne uhlie prevyšuje všetky skúmané palivá.



Graf 8.5 Porovnanie spalného tepla získaného kalorimetrom a literatúrou

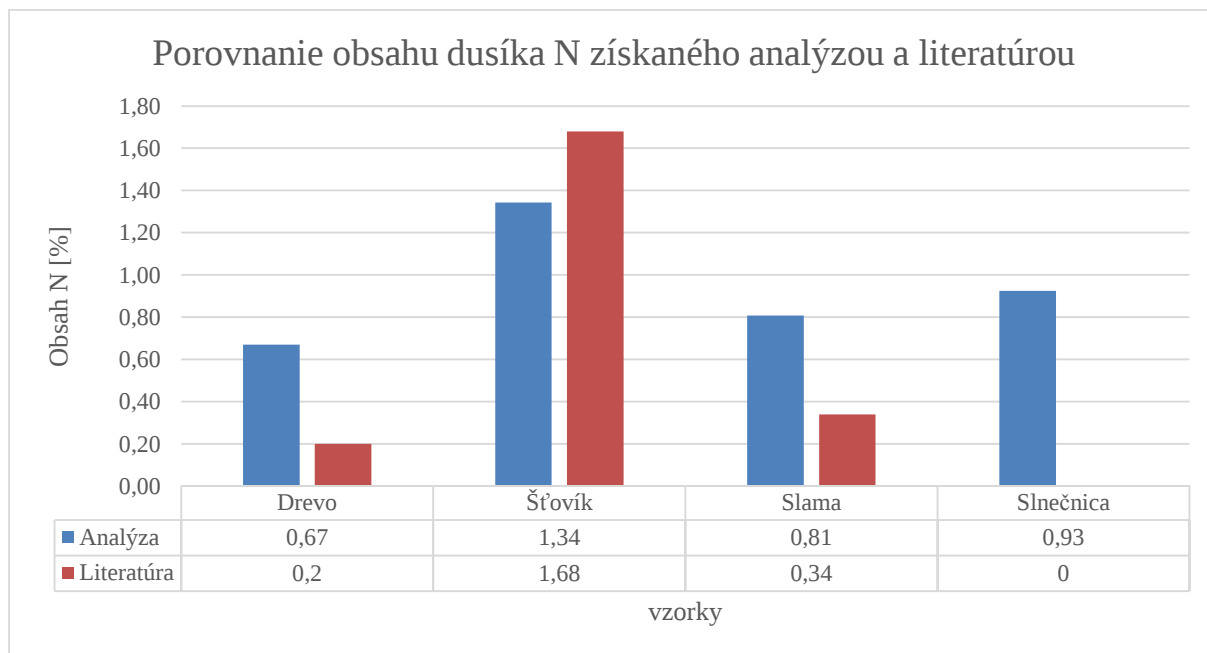
8.4 VPLYV CHEMICKÉHO ZLOŽENIA PALÍV NA EMISIE A ČINNOSŤ KOTLOV

Pre zaujímavosť bude porovnaný obsah popola jednotlivých vzoriek peliet získaných pomocou analýz a literatúry. Vychádza sa z hodnôt vypočítaných v predošlých kapitolách. Z grafu 8.6 je viditeľný malý rozdiel obsahu popola zistených analýzou a z literatúry, a teda nedošlo k veľkým chybám pri meraní. Zo zadaných vzoriek má najväčší obsah popola slama a šťovík. Bežne používané palivá ako hnedé a čierne uhlie majú vysoký podiel popola a tým dochádza pri spaľovaní k vysokým hodnotám TZL. Naopak najnižší obsah popola majú drevené pelety a slnečnicové pelety, čím sa radia k najmenej znečisťujúcim palivám z pohľadu TZL.

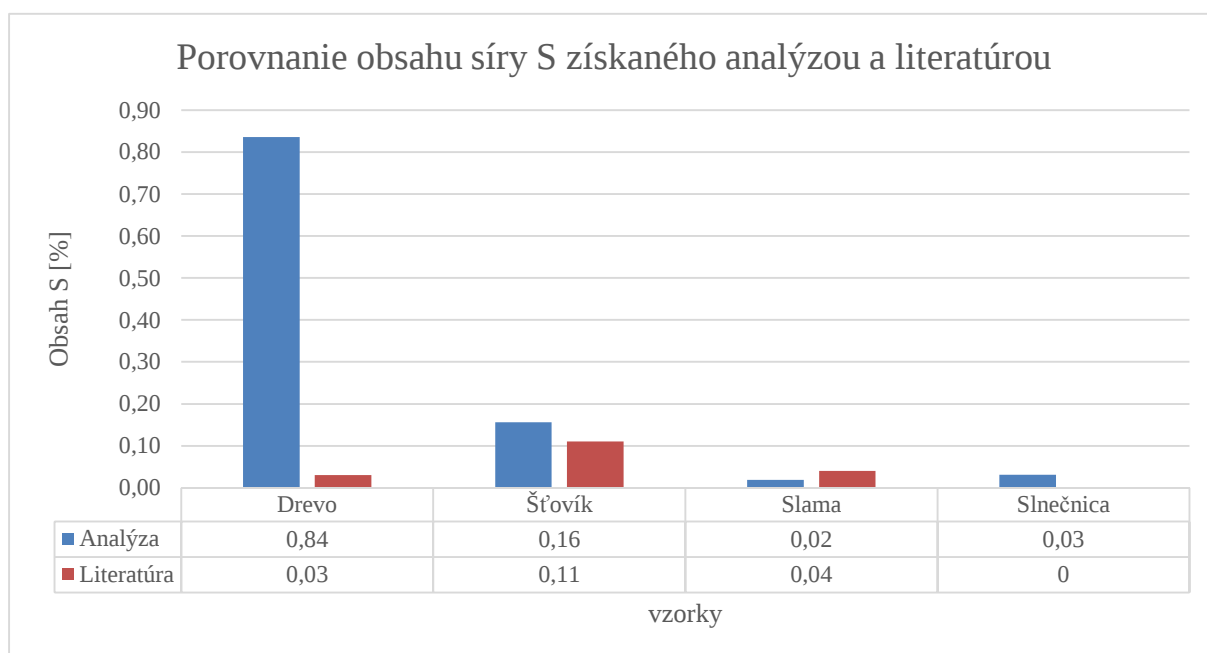


Graf 8.6 Porovnanie obsahu popola získaného analýzou a literatúrou

Porovnanie chemického zloženia skúmaných agropeliet získaného pomocou analýz a z literatúry je v nasledujúcich grafoch. Porovnané sú prvky dusík N a siera S. Tieto prvky sú najškodlivejšie z dôvodu tvorby emisií ako oxid siričitý SO_2 , oxid dusičitý NO_2 a oxid uhoľnatý CO . Ovpływujú aj činnosť kotla tvorbou kyseliny sírovej a dusičnej, ktoré spôsobujú koróziu konštrukcie kotla.



Graf 8.7 Porovnanie obsahu dusíka N získaného analýzou a literatúrou



Graf 8.8 Porovnanie obsahu síry S získaného analýzou a literatúrou

Obsah síry podľa grafu 8.8 sa najviac odlišuje pri drevených peletách. Pri ďalších vzorkách sa obsah síry veľmi neodlišoval od literárnych zdrojov. Obsah dusíka podľa grafu 8.7 vykazuje tiež značné odchýlky od literárnych zdrojov pri drevených a slamených peletách.

Všetky skúmané agropelety majú podobnú výhrevnosť a chemické zloženie a sú vhodné na spaľovanie v kotloch. Najvhodnejšie pre spaľovanie v kotloch sú na základe získaných výsledkov slnečnicové agropelety. Ich výhrevnosť je spomedzi daných vzoriek agropeliet najvyššia, obsahujú minimálny podiel síry, dusíka a popola. Majú tak najmenší vplyv na znečisťovanie prostredia a tvorbu kyselín v kotly. Podobné vlastnosti majú aj drevené pelety. Slamené pelety majú nízky obsah síry a dusíka a tak majú malý vplyv na tvorbu kyselín. Naopak šťovíkové pelety majú najvyšší obsah síry, čo spôsobuje väčšiu tvorbu kyselín. Slamené a šťovíkové pelety vykazujú vyšší obsah popola, čo má dopad na tvorbu TZL a spekavosť popola na konštrukcii kotlov. Ich výhrevnosť je najnižšia z daných agropeliet.

ZÁVER

Prvá časť bakalárskej práce bola zameraná na opis spracovania biomasy na pelety a ich rozdelenie. Boli spomenuté normy týkajúce sa kvality peliet, ich výhody a nevýhody. Prieskum trhu porovnal vlastnosti a chemické zloženie agropeliet s inými používanými palivami. Prvú časť uzavrel stručný opis výroby peliet.

Druhá časť opisuje fyzikálny princíp spaľovania a podrobný princíp činnosti kotlov. Vysvetľuje príčiny problémov vyskytujúcich sa pri spaľovaní biomasy. Opisuje možnosti riešenia týchto problémov ako kyselinovzdorné konštrukcie kotlov, pohyblivé rošty a pridávanie aditív zabráňujúcich spekaniu popola. Zaoberá sa tvorbou emisií ako TZL, rôznych škodlivých oxidov, uhlíkovodíkov, ťažkých kovov a dopad na zdravie človeka. Z dôvodu neustále sa sprísňovaniu ochrany životného prostredia sú spracované platné emisné limity.

V tretej časti bol vykonaný palivársky rozbor za účelom určenia spalného tepla a výhrevnosti zadaných vzoriek agropeliet. Bola vyhodnotená vhodnosť jednotlivých empirických vzťahov pre výpočet spalného tepla porovnaním výsledkov z kalorimetra. Výsledky z vzťahov Institute of Gas Technology, Steuer, Boie, Mendeleejev a Michel sa najviac približovali výsledkom z kalorimetra.

Vhodnosť agropeliet pre spaľovanie v kotloch bola hodnotená na základe podmienok nízkeho obsahu popola, uhlíka, dusíka, síry a veľkosti hodnôt spalného tepla a výhrevnosti. Najmenší obsah vody mali slamené a slnečnicové pelety. Obsah popola bol najmenší u drevených a slnečnicových peliet, vďaka čomu majú menší vplyv na tvorbu TZL. Obsah dusíka bol u rastlinných peliet väčší ako u drevených, no najvyšší obsah mal šťovík. Taktiež obsah síry šťovíku vykazoval omnoho vyššie hodnoty ako iné pelety. Z pohľadu tvorby kyselín je šťovík z daných vzoriek najmenej vhodný pre spaľovanie v kotloch. Najvyššiu hodnotu spalného tepla dosiahli slnečnicové pelety, čím sa vďaka ostatným vlastnostiam stávajú najvhodnejšími agropeletami pre spaľovanie v kotloch.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] Spaľovanie biomasy. *Greenproject* [online]. 2013 [cit. 2016-03-24]. Dostupné z: www.greenprojekt.sk/spalovaniebiomasy.html
- [2] KRÍŽIK, Peter. Biomasa-palivo budúcnosti? *Urob si sám* [online]. JAGA GROUP, 2010 [cit. 2016-03-24]. Dostupné z: <http://urobsisam.zoznam.sk/dom/vykurovanie/biomasa-palivo-buducnosti>
- [3] EkoTOM. *EkoTOM* [online]. 2013 [cit. 2016-03-24]. Dostupné z: <http://ekotom.webnode.sk/>
- [4] Palivové drevo tvrdé. *SK Forest* [online]. 2015 [cit. 2016-03-27]. Dostupné z: http://www.skforest.sk/palivove_tvrde.php
- [5] Cena a doprava rostlinných pelet. *Agropelety* [online]. 2012 [cit. 2016-03-27]. Dostupné z: <http://www.rostlinne-pelety.cz/cena-a-doprava.html>
- [6] Balenie a cena peliet. *PelletsXL* [online]. 2014 [cit. 2016-03-27]. Dostupné z: <http://www.pelletsxl.eu/sk/cennik>
- [7] Predaj uhlia. *Belobrad* [online]. 2016 [cit. 2016-03-27]. Dostupné z: <http://www.uhlie.eu/predaj-uhlia/>
- [8] MIKULÍK, Marian a Jozef JANDAČKA. *POSTUPY SPRÁVNEHO VYKUROVANIA*. Európska únia: Jozef Bulejčík, 2009. ISBN 978-80-969595-7-0.
- [9] MALAŤÁK, Jan a Petr VACULÍK. Biomasa pro výrobu energie. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008. ISBN 978-80-213-1810-6.
- [10] Ivory pelety standard. *CDP IVORY* [online]. 2016 [cit. 2016-03-27]. Dostupné z: <http://www.cdp-pelety.sk/pelety/pelety-impuls-2/>
- [11] VERNER, Vladimír: Alternativní pelety. *Biom.cz* [online]. 2007-12-31 [cit. 2016-03-24]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/alternativni-pelety>. ISSN: 1801-2655.
- [12] Normy pro pelety a brikety. *Česká peleta* [online]. 2016 [cit. 2016-03-24]. Dostupné z: <http://www.ceska-peleta.cz/pelety-brikety-drevo/normy-pro-pelety-a-brikety/>
- [13] Certifikace ENplus. *Česká peleta* [online]. 2016 [cit. 2016-03-24]. Dostupné z: <http://www.ceska-peleta.cz/pelety-brikety-drevo/normy-pro-pelety-a-brikety/>
- [14] KOTT, Jiří: Výroba pelet z biomasy - technické a ekonomické aspekty. *Biom.cz* [online]. 2010-12-20 [cit. 2016-03-24]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyroba-pelet-z-biomasy-technicke-a-ekonomicke-aspekty>. ISSN: 1801-2655.

- [15] ČERNÝ, Václav, Břetislav JANEBA a Jiří TEYSSLER. *Parní kotle*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1983. Technický průvodce (SNTL-Nakladatelství technické literatury). ISBN 04-224-83.
- [16] GUNTAMATIC. *Automatické flexibilní vytápění* [online]. Kostelec nad Černými lesy: Esel Technologies, 2015 [cit. 2016-04-05]. Dostupné z: http://www.avytapeni.cz/Upload/WYSIWYG/file/prospekty/powerchip_CZ.pdf
- [17] MÍKA, Martin, VOLÁKOVÁ, Pavlína, KLÁPŠTĚ, Břetislav, JANKOVSKÝ, Ondřej, VERNER, Vladimír: Jak potlačit spékání biomasového popela?. *Biom.cz*[online]. 2011-11-28 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/jak-potlacit-spekani-biomasoveho-popela>. ISSN: 1801-2655.
- [18] Proč řešit kotle. *Lokalni-topeniste* [online]. 2016 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <http://lokalni-topeniste.kr-moravskoslezsky.cz/proc-resit-kotle>
- [19] <https://www.czso.cz/csu/czso/demograficka-prirucka-2014>: Demografická příručka-2014. Český Štatistický úrad [online]. 2014 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/demograficka-prirucka-2014>
- [20] HORÁK, Jiří a František HOPAN. *Emise POP a těžkých kovů z malých zdrojů a jejich emisní faktory*[online]. Ostrava, 2010 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: http://emisnifactory.zuova.cz/doc/extrakt_ze_zaverecne_zpravy.pdf. Vysoká škola báňská.
- [21] *Předpis č. 201/2012 Sb. Zákon o ochraně ovzduší*. In: . 2012, 201/2012. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-201/zneni-20160101>
- [22] ČSN EN 303-5 (075303). *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: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [23] PLAVECKÝ, Radek. Emisní třídy rozhodují, které kotle zůstanou na trhu. In: *Česká peleta* [online]. 2014 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <http://www.ceska-peleta.cz/tiskove-zpravy/emisni-tridy-rozhoduji-ktre-kotle-zustanou-na-trhu/>
- [24] Periodická soustava prvků. *Canov.jergym* [online]. [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://canov.jergym.cz/vyhledav/varian37/czech/czech4.jpg>
- [25] Ing. Vojtěch Zejda. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, osobná konzultácia.
- [26] RÉDR, Miroslav a Miroslav PŘÍHODA. *Základy tepelné techniky: celost. vysokošk. učebnice pro hutnické fakulty*. Praha: SNTL, 1991. ISBN 80-03-00366-0.
- [27] ČSN EN 14346. *Charakterizace odpadů - Výpočet sušiny stanovením podílu sušiny nebo obsahu vody*. Praha: Český normalizační institut, 2007.

- [28] ČSN EN 15169. *Harakterizace odpadů - Stanovení ztráty žíháním v odpadech, kalech a sedimentech*. Praha: Český normalizační institut.
- [29] ELEMENTAR ANALYSENSYSTEME GMBH. *Elementární analyzátor CHNOS vario MACRO cube, Návod k obsluze*. Hanau, Německo: Elementar, 2009.
- [30] PARR INSTRUMENT COMPANY. *Operating Instruction Manual 6100 Oxygen Bomb Calorimeter*. Moline, Illinois: Parr, 2010.
- [31] FORMULAS FOR CALCULATING THE HEATING VALUE OF COAL AND COAL CHAR: DEVELOPMENT, TESTS AND USES. MASON, David M. a Kiran N. GANDHI. *FORMULAS FOR CALCULATING THE HEATING VALUE OF COAL AND COAL CHAR: DEVELOPMENT, TESTS AND USES* [online]. Chicago, Illinois: Institute of Gas Technology, 1980, s. 235-245 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: https://web.anl.gov/PCS/acsfuel/preprint%20archive/Files/25_3_SAN%20FRANCISCO_08-80_0235.pdf
- [32] BUŠA, Ján, Viktor PIRČ a Štefan SCHRÖTTER. *Numerické metódy, pravdepodobnosť a matematická štatistika* [online]. Košice, 2006 [cit. 2016-05-15]. ISBN 80-8073-633-2. Dostupné z: <http://web.tuke.sk/fei-km/sites/default/files/prilohy/1/statnumo.pdf>
- [33] Intervaly spoľahlivosti. *Avozarm* [online]. Klára Mrázová, 2016 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.avozarm.sk/Statistika6.htm>

Zoznam Použitých Skratiek a Symbolov

Symbol Jednotka Veličina

A	[hmot %]	Popol pôvodného vzorku
A _{LOI}	[hmot %]	Strata žíhaním pôvodného vzorku
C	[%]	Hmotnostný podiel uhlíku v skúšobnom palive
c	[J*K ⁻¹]	Tepelná kapacita kalorimetrického systému
D _t	[K]	Celkový nárast teploty
e ₁	[J]	teplo vyprodukované spálením N ₂ pri vytváraní HNO ₃
e ₂	[J]	teplo vyprodukované v kalorimetri
e ₃	[J]	teplo vyprodukované spálením drôtu
f	[%]	Prevodný koeficient
H	[%]	Hmotnostný podiel vodíku v skúšobnom palive
H _v	[hm.zl.]	všeobecné zastúpenie vodíka vo vode
CHNS	[-]	Analyzované prvky uhlík, vodík, dusík a síra
l	[mm]	Dĺžka drôtu
m	[g]	hmotnosť vzorku paliva
m _a	[g]	Hmotnosť prázdnej misky
m _b	[g]	Hmotnosť misky obsahujúca vzorok
m _c	[g]	Hmotnosť misky obsahujúca vysušený vzorok
m _d	[g]	Hmotnosť misky obsahujúca zvyšok po žíhaní
N	[%]	Hmotnostný podiel dusíku v skúšobnom palive
n	[-]	Celkový počet hodnôt výberu
O	[%]	Hmotnostný podiel kyslíku v skúšobnom palive
OGC	[-]	celkový organický uhlík
O _v	[hm.zl.]	všeobecné zastúpenie kyslíka vo vode
Q _i	[kJ/kg]	Výhrevnosť
Q _s	[kJ/kg]	Spalné teplo
S	[%]	Hmotnostný podiel síry v skúšobnom palive
s _n	[-]	Interval spoľahlivosti
TCD	[-]	Tepelne vodivostný detektor
TZL	[-]	Tuhé znečisťujúce látky
W	[%]	Obsah vody vo vzorku

w_A	[%]	Hmotnostný podiel popola
w_C	[%]	Hmotnostný podiel uhlíku
w_{dm}	[%]	Sušina
w_{dr}	[%]	Podiel sušiny vzorku
w_H	[%]	Hmotnostný podiel vodíku
W_{LOI}	[hmot %]	Strata žíhaním vzorku sušiny
w_N	[%]	Hmotnostný podiel dusíku
w_O	[%]	Hmotnostný podiel kyslíku
W_{ROI}	[hmot %]	Zvyšok po žíhaní vzorku (popol) sušiny
w_{So}	[%]	Hmotnostný podiel síry organickej
w_{Sp}	[%]	Hmotnostný podiel síry pyritovej
w_{Ss}	[%]	Hmotnostný podiel síry sulfidovej
w_w	[%]	Hmotnostný podiel všetkej vody
$\bar{x}$	[-]	Aritmetický priemer
x_i	[-]	Jednotlivé hodnoty
XRF	[-]	röntgenová fluorescenčná analýza
σ	[-]	Smerodajná odchýlka

ZOZNAM PRÍLOH

Príloha č.1 CD (bakalárska práca vo formáte PDF, výpočtový program v Exceli)