



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

ENERGETICKÉ VYUŽITÍ BIOMASY

ENERGY USE OF BIOMASS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Alexandra Středanská

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Energetický ústav
Studentka:	Alexandra Středanská
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.
Akademický rok:	2017/18

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:

Energetické využití biomasy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V poslední době je biomasa velmi oblíbeným palivem pro domovní vytápění i jako zdroj energie pro centrální zásobování teplem či výrobu elektrické energie. Na jednu stranu je biomasa obnovitelný zdroj energie, či zdroj, který si umíme vyrobit (vypěstovat), na druhou stranu její využívání má zpravidla nižší účinnost než zdroje jiné, její spalovací vlastnosti nejsou optimální a mluví se i o některých negativních jevech s využíváním biomasy souvisejících.

Studentka se ve své práci bude zabývat problematikou využití agropelet, zejména s ohledem na účinnost kotle a chemický nedopal.

Cíle bakalářské práce:

rešerše dostupných druhů biomasy

vlastnosti biomasy jako paliva

experimentální porovnání účinnosti kotle při provozu na dřevní pelety a agropelety

Seznam doporučené literatury:

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

JANDAČKA, Jozef. Technologie pre zvyšovanie energetickeho potencialu biomasy. 1. Žilina: BALPO, 2007. ISBN 978-80-969595-4-9.

MALAŤÁK, Jan a Petr VACULÍK. Biomasa pro výrobu energie. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008. ISBN 978-80-213-1810-6.

QUASCHNING, Volker. Obnovitelné zdroje energií. Praha: Grada, 2010. Stavitel. ISBN 978-80-2-7-3250-3.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

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

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

Abstrakt

Bakalárska práca sa zaoberá energetickým využitím biomasy, konkrétne porovnaním procesu spaľovania agropeliet a drevených peliet. Dá sa rozdeliť na dve hlavné časti. Prvá časť práce je rešeršná. Pojednáva o rozdelení a vlastnostiach biomasy. Druhá časť je experimentálna s výpočtom účinnosti kotla a popisu experimentu. Tiež rieši rozdiely v spaľovaní daných druhov palív a následné zhodnotenie výsledkov.

Kľúčové slová

biomasa, spaliny, tepelné straty kotla, účinnosť

Abstract

This bachelor thesis concerns on energy utilization of biomass. The main objective is to compare the combustion process of agropellets and wood pellets. This matter may be divided into two main parts. The first part focuses on research. It discusses the division of biomass and its properties. The second part is fully experimental. It focuses on experimenting with boiler efficiency calculations and describes these experiments. It also addresses the differences in combustion of given kinds of fuels and the subsequent evaluation of the measured results.

Key words

biomass, flue gas, boiler heat loss, boiler efficiency

STREĎANSKÁ, A. *Energetické využití biomasy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 60 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D..

Čestné prehlásenie

Týmto prehlasujem, že predkladanú bakalársku prácu som vypracovala samostatne, s využitím uvedenej literatúry a podkladov, na základe konzultácií a pod vedením vedúceho bakalárskej práce.

V Brne dňa

.....
Alexandra Stred'anská

Pod'akovanie

Rada by som pod'akovala pánu doc. Ing. Marekovi Balášovi, Ph.D. za odborné rady a pripomienky pri vypracovávaní tejto záverečnej práce. Pod'akovanie patrí aj pánovi Ing. Otakarovi Štelcovi za odbornú pomoc a trpezlivosť pri meraní experimentálnej časti.

Obsah

1	Úvod	15
2	Teoretická časť	16
2.1	Definícia pojmu biomasa	16
2.2	Charakteristika biomasy – vznik a rozdelenie	16
2.3	Palivá z biomasy	18
2.3.1	Charakteristika a rozdelenie palív z biomasy	18
2.3.2	Vlastnosti biomasy ako paliva	21
2.3.3	Definícia jednotlivých vlastností	21
2.3.4	Porovnanie vlastností dendromasy a fytomasy	24
3	Praktická časť	26
3.1	Norma ČSN EN 303-5	26
3.1.1	Skúšobné palivo	26
3.1.2	Účinnosť	26
3.1.3	Chemický nedopal	26
3.2	Popis experimentu	27
3.2.1	Kotol Verner A251.1	28
3.2.2	Komplex mraziaci box na spaliny	30
3.2.3	Analyzátory spalín Siemens Ultramat 21/O ₂ a 22	30
3.2.4	Indukčný prietokomer Flomag 3000	31
3.2.5	Tepelný výmenník	31
3.2.6	Trojcestný ventil	32
3.2.7	Čerpadlo Grundfos	32
3.3	Chemický nedopal v procese spaľovania	32
4	Výpočet tepelnej účinnosti	34
4.1	Metódy výpočtu	34
4.2	Priama metóda	34
4.3	Nepriama metóda	34
4.3.1	Straty	34
4.4	Tepelná účinnosť kotla pri spaľovaní drevených peliet	36
4.4.1	Nepriama metóda výpočtu účinnosti	36
4.5	Tepelná účinnosť kotla pri spaľovaní agropeliet	44
4.5.1	Nepriama metóda výpočtu	44
4.6	Vyhodnotenie experimentu	51

5	Záver	53
6	Zoznam použitej literatúry	54
7	Zoznam symbolov a použitých skratiek	57
8	Zoznam obrázkov	59
9	Zoznam tabuliek	60

1 Úvod

Biomasa, obnoviteľné zdroje energie, ekologické hospodárstvo, toto všetko sú pojmy skloňované takmer denne. Niet sa čo čudovať, keď svet zaplavuje odpad, zásoby planéty sa mieniajú čoraz rýchlejšie, ovzdušie ničia skleníkové plyny, na základe čoho našej Zemi škodí globálne otepľovanie a podľa najhorších prognóz budú musieť ľuďom narásť žiabre, aby náš druh prežil. Riešenie je veľa, väčšina takpovediac, na dlhé lakte. Všetky však majú niečo spoločné – začať škodiť budúcnosti čo najmenej. Aj preto sa snažíme hľadať náhradné, no nemenej efektívne zdroje energie akým biomasou bez pochyb je.

Ak sa využívajú energetické odpady, vyrieši sa tým aj spôsob ako ich zlikvidovať. Nie každý druh odpadu však môžeme neškodne spáliť. Poľnohospodárske, inak nevyužité zvyšky ako slama, d'atelina, odpad z repky olejnej, majú veľký potenciál. Napriek tomu sa v minulosti ako palivo na výrobu energie takmer nevyužívali a aj dnes sa s väčšou obľubou stretáva drevo, či fosílna palivá. A to dokonca aj v dobe, kedy sa dá všestranne spracovať, inak ako do balíkov slamy. Napríklad do alternatívnych peliet. Nastáva teda otázka, prečo to tak je. Prečo sa rastlinná biomasou využíva tak málo? Zo strachu z menšej výhrevnosti, neinformovanosti alebo ide len o nedostatočnú ponuku na trhu?

Práca má dva hlavné ciele. Ako prvé spracovať rešerš o dostupných druhoch biomasy. Úlohou je teda zistiť, čo to biomasou je, z akých zdrojov je možné ju získať a následne v akých formách sa dá využiť ako palivo, ktorého kvalitu a efektívnosť ovplyvňujú práve jeho vlastnosti. Pre druhý cieľ je veľmi dôležité poznať základné rozdiely drevených peliet a agropeliet – peliet z rastlinnej biomasy, preto by súhrn ich odlišností mala obsahovať už prvá časť. Úlohou druhou je porovnať tieto dva druhy experimentálne. Uskutočniť pokus, výsledky oboch meraní spracovať vo výpočtoch, a následne vyhodnotiť, ktorý druh je na tom z hľadiska účinnosti spaľovacieho zariadenia lepšie. Ďalšie porovnanie sa má týkať toho istého pokusu avšak porovnať sa majú rozdiely v chemickom nedopale.

2 Teoretická část

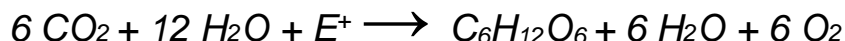
2.1 Definícia pojmu biomasa

Definícia pojmu biomasa podľa smernice európskeho parlamentu a rady č. 2003/30/ES znie: „biomasa“ znamená biologicky rozložiteľné frakcie výrobkov, odpadu a zvyškov z poľnohospodárstva (vrátane rastlinných a živočíšnych látok), lesníctva a príbuzných odvetví, ako aj biologicky rozložiteľné frakcie priemyselného a komunálneho odpadu. [1]

2.2 Charakteristika biomasy – vznik a rozdelenie

Biomasa sa berie ako obnoviteľný zdroj energie z dôvodu, že na regeneráciu použitých prírodných fondov je nutný pomerne krátky čas oproti napr. fosílnym palivám (uhlie, zemný plyn, ropa), ktorých v dnešných dňoch ľudstvo spotrebuje za jeden rok také množstvo, aké v prírode vznikali približne milión rokov.

Rastliny prijímajú oxid uhličitý z ovzdušia a pri horení biomasy ho uniká do atmosféry iba také množstvo aké v minulosti rastlina spotrebovala. V rastlinách sa tiež zhromažďuje slnečná energia, ktorá sa za účasti oxidu uhličitého a vody v zelených častiach metabolicky mení na ústrojné látky - cukor a energiu chemických väzieb. Ak ide o rastlinnú biomasu je veľmi dôležité, že vďaka fotosyntéze sa uhlík vracia späť do prírody, čo takmer eliminuje skleníkový efekt.



Teoreticky sa dá energia získať zo všetkých foriem biomasy, keďže ide o hmotu z rastlín alebo živočíšnych zvyškov. Ich základom je uhlík a jeho chemické väzby obsahujúce energiu. Prakticky využívame biomasu rastlinnú s vysokým obsahom lignocelulózy, škrobu a cukru, z olejnatých plodín, organické odpady a vedľajšie živočíšne produkty či organický odpad.

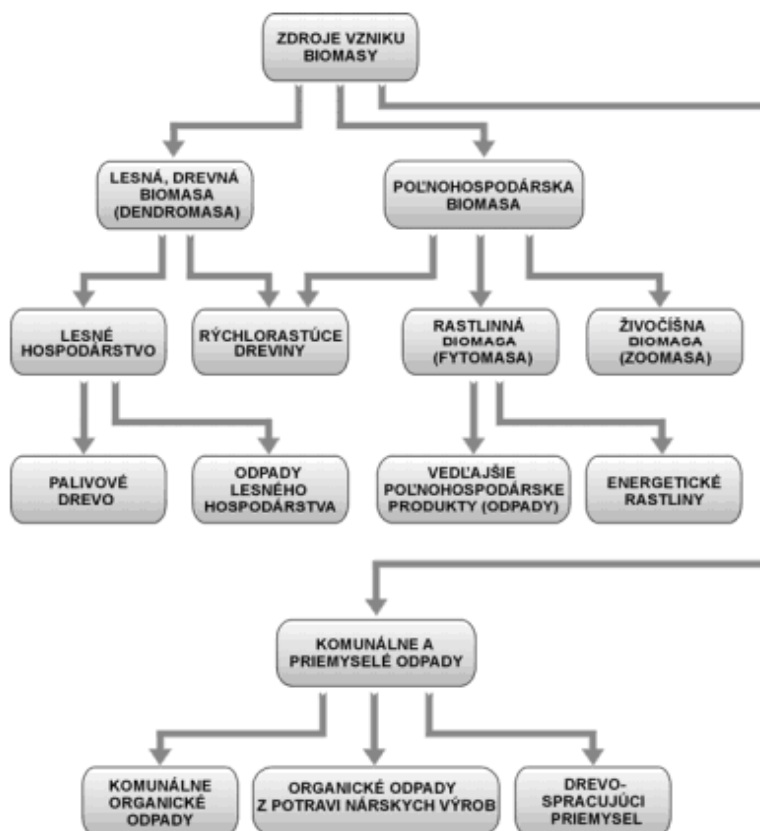
Tak ako rastlinnú biomasu vieme rozdeliť na *dendromasu* – biomasu z drevených rastlín a *fytomasu* – biomasu z celozelených rastlín a živočíchov, vieme ju tiež rozdeliť podľa ďalších kategórií nasledovne: [6][7]

Rozdelenie podľa zdroja vzniku:

- **lesná biomasa**
 - palivové drevo, konáre, pne, korene, kôra, piliny,
- **poľnohospodárska biomasa:**
 - *fytomasa*
 - obilná slama, obilie, konope,
 - *živočíšna biomasa (zoomasa)*
 - exkrementy, živočíšne odpady,
- **priemyselné odpady**
 - drevospracujúci priemysel,
 - potravinársky priemysel.

Rozdelenie z hľadiska energetického využitia:

- **biomasa zámerne pestovaná na tento účel:**
 - *rýchlo rastúce dreviny*
 - topoľ, vŕba, jelša,
 - *nedrevnaté energetické plodiny*
 - *jednoročné*: konope, slez, láskavec,
 - *dvojročné*: komonica, pupalka,
 - *trvalky a viacročné*: ozdobnica čínska, topinambur (invazívna a zakázaná rastlina).
- **biomasa odpadová (zvyšková)**
 - *z ťažby a spracovania dreva a lesný odpad (najčastejší zdroj)*
 - konáre, kôra, korene, odrezky, piliny a hobliny, pne, šišky,
 - *z rastlinnej výroby*
 - zvyšky z poľnohospodárskej prvovýroby, odpady zo sádov a viníc, slama, a odpady z úprav parkov a z úprav plôch pri komunikáciách,
 - *z živočíšnej výroby*
 - výkaly hospodárskych zvierat, zvyšky krmív,
 - *biologicky rozložiteľný komunálny odpad*
 - zvyšky potravín, papierové obaly,
 - *biologicky rozložiteľný priemyselný odpad*
 - odpad z bitúniku, výroby cukru, múky a papieru,
 - *splašky z kanalizácie.*



obr. 2.2.1 Zdroje biomasy [7]

Rozdelenie podľa vlastností:

- vlhká – tekutý odpad – výroba bioplynu (exkrementy, dendromasa),
- suchá – spaľovanie priamo (fytomasa, dendromasa, energetické rastliny),
- špeciálna – olejiny, škrobové a cukornaté plodiny - bionafta a lieh (olejnaté).

2.3 Palivá z biomasy

2.3.1 Charakteristika a rozdelenie palív z biomasy

Chemickým zložením, prihliadajúc na obsah prvkov, sa biomasa od fosílnych palív príliš nelíši. Najväčšie množstvo v suchom podiele zaujíma kyslík (O₂), vodík (H₂) a uhlík (C). Rozdiel je v cca dvojnásobnom množstve kyslíka a menšiemu množstvu uhlíka v biomase. Nachádzajú sa v nej tiež iné chemické prvky napr. síra (S), dusík (N₂) či chlór (Cl) a tiež stopové množstvo olova (Pb), draslíku (K), sodíku (Na), vápniku (Ca), kremíku (Si), mangánu (Mn), bóru (B), medi (Cu), železa (Fe), niklu (Ni), horčíku (Mg), zinku (Zn) atď., ktoré zapríčiňujú vznik škodlivých látok. Na rozdiel od fosílnych palív však obsahuje biomasa minimálne množstvo síry, takže pri spaľovaní nevzniká takmer žiaden oxid siričitý, ktorý zapríčiňuje kyslé dažde a znečistenie smogom. [3]

Na palivá sú v súčasnosti okrem energetických, environmentálnych a ekonomických kritérií kladené i požiadavky vysokého komfortu pri manipulácii a bezpečnosti pri ich spaľovaní. Pri tuhých palivách je podstatná rovnomerná hustota, vlhkosť a vhodný tvar. To je pri trávnej *fytomase* možné zabezpečiť technológiou zhutňovania, ktorá umožňuje vyrobiť palivo vo forme brikiet alebo agropeliet. [5]

Dendromasa sa na energetické využitie používa ako rozmerovo upravená alebo neupravená. Rozmerová úprava sa vykonáva formou štiepkovania, drvenia a lisovania.

Rozmerovo neupravená dendromasa (palivové drevom, manipulačné odpady, kusový odpad po mechanickom spracovaní dreva) sa používa na výrobu tepla a prípravu teplej úžitkovej vody v menších objektoch ako rodinné domy. Dávkovanie do kotla sa vykonáva manuálne.

Rozmerovo upravená dendromasa (rôzne typy štiepky, podrvená kôra, podrvený komunálny a priemyselný drevený odpad, pelety a brikety vyrobené z vysušeného jemnozrnného odpadu) sa využíva na výrobu tepla, elektrickej energie a kvapalných palív. Dávkovanie do kotlov a splynovačov sa vykonáva automatizovane mechanicky. [2]

- *Pelety* sú názov pre granule kruhového prierezu s priemerom 6 alebo 8 mm a dĺžkou 30-40 mm. Vyrábajú sa z pilín alebo hoblín lisovaním, tzv. peletizáciou. Okrem použitia peliet na vykurovanie a výrobu tepla je možné použiť pelety ako podstielku pod domáce zvieratá. [10] Pri peletizovaní pilín na pelety vzniká ako vedľajší produkt spracovania jemný drevený prach, ktorý vzhľadom na skladovanie peliet v silách predstavuje potencionálne nebezpečenstvo výbuchu. Preto je potrebné odstrániť prachový podiel z produktu. Aj samostatná kvalita peliet sa hodnotí tým vyššie, čím nižší je podiel prachových častíc v produkte. Odstránia sa pomocou cyklónového odlučovača v spojení s elektrickým odsávačom prachu. [14] Okrem drevených peliet existujú aj pelety alternatívne – *agropeliety*.



obr. 2.3.1 Pelety [21]

- *Brikety* sú zlisované drevné zvyšky (pilín, štiepky, kôry alebo rôznych rastlinných zvyškov) v tvare valcov či kvádrov dlhých až 30 cm. Sú vysoko univerzálnym palivom (dá sa s nimi kúriť vo všetkých typoch kotlov na drevo a uhlie). Najväčšiu účinnosť dosahujú v kotloch na drevoplyn. Brikety z odlišných zdrojov biomasy sa používajú pre rôzne spôsoby vykurovania – ľahšie alebo perforované brikety uľahčujú rýchle vykúrenie menších priestorov, ťažšie vedú k stabilnému a pomalému sálaniu, ktoré môže trvať až 6 hodín. [11]



obr. 2.3.2 Brikety [22]

- *Palivové štiepky* sú produkt sekania, drvenia alebo frézovania dreva približne rovnakej veľkosti s podielom , alebo bez podielu kôry a prímiesí, rozmermi a kvalitou vhodný na energetické použitie. [2]



obr. 2.3.3 Štiepka [23]

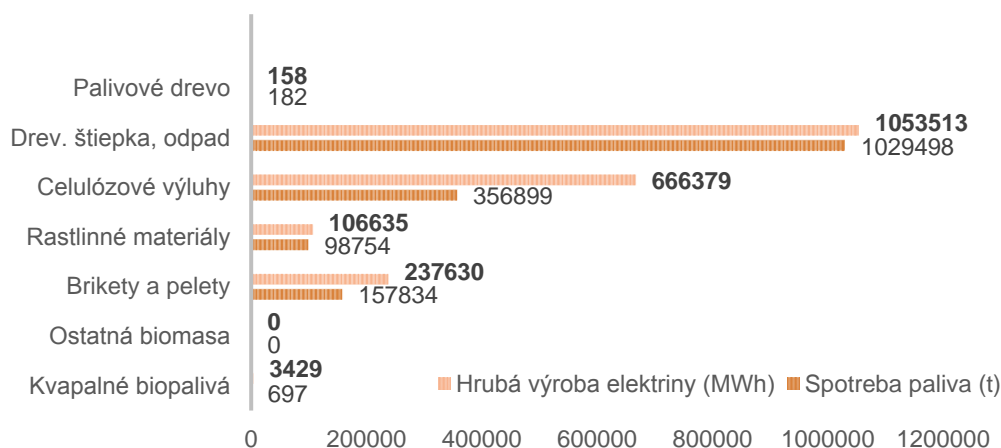
- *Palivové drevo* primárne sa delí na „tvrdé“ listnaté a „mäkké“ ihličnaté drevo. Ihličnaté drevo horí rýchlejšie a rýchlejšie odovzdá teplo, zatiaľ čo tvrdé drevo horí pomalšie a predlžuje interval prikladania. Na dobu horenia má nezanedbateľný vplyv veľkosť polien, kde menšie a tenšie horia rýchlejšie. Dôležitejšie pre použitie dreva na kúrenie je údaj o jeho vlhkosti, respektíve obsahu vody. [17]



obr. 2.3.4 Kusové drevo [23]

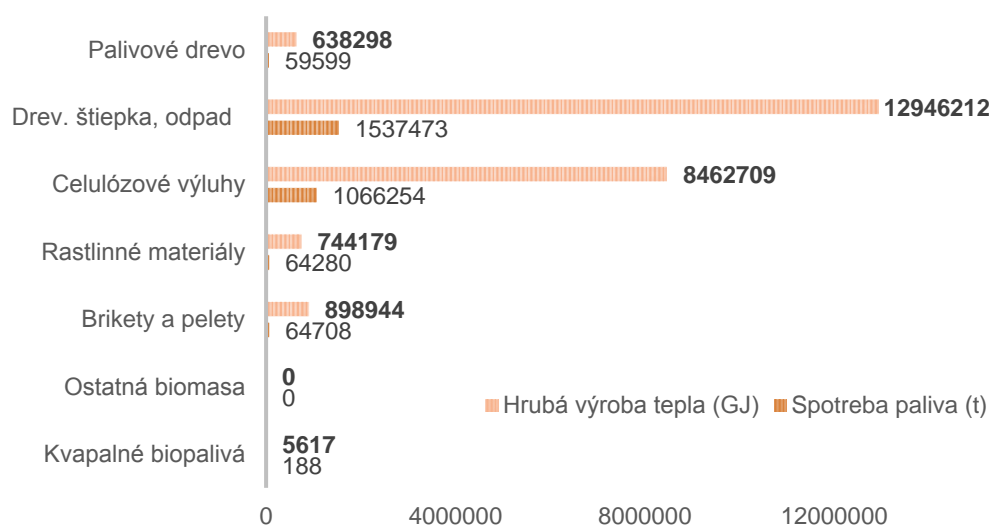
Pokiaľ ide o využitie biomasy ako paliva podľa jej typu, v Českej republike, v oblasti výroby elektriny a tepelnej energie, v oboch vedie biomasa odpadová a drewná štiepka (viz graf 2.3.1 a graf 2.3.2). Ide o odpad z drevospracujúceho priemyslu, ktoré nevyhovuje kvalitatívnym kritériám pre ďalšie spracovanie ako hobliny, piliny, korene, tenké konáre či rôzne odrezky. Ďalej dominujú celulóznové výluhy. [8]

VÝROBA ELEKTRINY Z BIOMASY PODĽA JEJ TYPOV V ROKU 2016



obr. 2.3.5 Vyrobená elektrina z biomasy v Českej republike za rok 2016 [8]

VÝROBA TEPELNEJ ENERGIE Z BIOMASY PODĽA JEJ TYPOV V ROKU 2016



obr. 2.3.6 Tepelná energia z biomasy v Českej republike za rok 2016 [8]

K vysokej a zrovnateľnej kvalite tuhých biopalív prispievajú jednotné celosvetové normy. Slúžia k lepšej orientácii na trhu a umožňujú špecifikovať požiadavky na vhodné palivo u spaľovacích zariadení.

Pre tuhé biopalivá bolo vydaných šesť klasifikačných noriem rady ČSN EN ISO 17225. Všeobecná norma ISO 17225-1 definuje klasifikáciu tuhých biopalív podľa pôvodu – rozlišuje drevnú, bylennú a ovocnú biomasu. Ďalšie normy sa týkajú palív pre nepriemyselné použitie v spaľovacích zariadeniach do 500 kW. Je to špecifikácia drevných peliet (ISO 17225-2), drevných brikiet (ISO 17225-3), drevenej štiepky (ISO 17225-4), palivového dreva (ISO 17225-5) a nedrevených peliet (ISO 17225-6). Zatiaľ čo u všeobecnej normy sú parametre skôr informatívne, tu sú prísnejšie, pretože malé spaľovacie zariadenia v husto zaľudnených oblastiach nedisponujú najnovšími reguláciami, nečistia odpadové plyny a neobsluhujú ich profesionáli. [9]

2.3.2 Vlastnosti biomasy ako paliva

Vzhľadom na fyzikálne a chemické kritéria hodnotíme biomasu ako bežné tuhé palivá. A teda hodnotíme výhrevnosť, spalné teplo, mernú hmotnosť, údaje z hrubého rozboru (zisťuje sa výhrevnosť a hmotnostný obsah vody, popola a prchavého podielu v %), údaje z rozboru chemických prvkov a údaje o vlastnostiach spalín a popolovín (teplota spekania, mäknutie, topenie a tečenie). [12]

2.3.3 Definícia jednotlivých vlastností

Výhrevnosť (energetický potenciál) paliva Q_i^f je množstvo tepla ktoré sa uvoľní pri dokonalom spálení 1 kg paliva, kedy voda v spalinách je v podobe pary a uvádza sa v $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$. Tým sa líši od definície spálneho tepla, ktoré zahŕňa navyše kondenzačné teplo vody obsiahnuté v spalinách. Toto teplo je vo väčšine prípadov (automobilové palivá, palivá bežných kotlov apod.) nevyužiteľné a de facto odchádza so spalinami. Výnimkou sú tzv. kondenzačné kotle používané predovšetkým pre spaľovanie zemného plynu. [18] Výhrevnosť závisí od vlhkosti a tá od doby a spôsobu skladovania paliva.

Spalné teplo Q_s je teplo uvoľnené dokonalým spálením 1 kg paliva na CO_2 , SO_2 , N_2 a H_2O , kedy voda v spalinách je v podobe kvapaliny. Všetky spaliny vzniknuté spaľovaním sú ochladené na počiatočnú teplotu zložiek, ktoré sa zúčastnili spaľovania, okrem vody. [19] Predpokladá sa, že voda uvoľnená spaľovaním skondenzuje a energiu chemickej reakcie nie je potrebné redukovať o jej skupenské teplo. Preto je hodnota spálneho tepla vždy väčšia alebo rovná hodnote výhrevnosti.

$$Q_i^f = Q_s - 2453(W^f + 8,94H^f) \quad (2.1)$$

2453 - výparné teplo vody [kJ/kg]

8,94 - koeficient prepočtu hmotnosti vodíku na vodu

W^f - obsah vody vo vzorke (0÷1) [kg/kg]

H^f - obsah vodíku vo vzorke (0÷1) [kg/kg]

Popoloviny - obsah popola A^r

$$A^r = \frac{M_A}{M_o} \cdot 100 \% \quad (2.2)$$

M_A - hmotnosť popola po spálení a žíhaní [kg]

M_o - konštantná hmotnosť vysušenej vzorky (pri teplote 103 ± 2 °C) [kg]

Popol je tuhým produktom – zvyšok, ktorý zostane z paliva po jeho zhorení (úplnej oxidácii). Tento zvyšok tvoria anorganické prvky (tzv. popoloviny), pôvodne viazané v akcesorických zložkách dreva. [15]

Popoloviny zo spaľovania biomasy pozostávajú z produktov horenia, tzn. oxidu uhličitého a vodnej pary, zo zložiek nespáleného vzduchu (dusíka, kyslíka) a emisií. Priemerná produkcia popola pri spaľovaní drevnej biomasy predstavuje cca 0,4 až 0,7 % popola z hmotnosti spaľovaného dreva a cca 1,5 až 3 % popola z hmotnosti spálenej kôry. Pri spálení drevnej hmoty o objeme 1 m^3 tak vznikne 3 až 5 kg popola. [4]

V procese spaľovania paliva tvoria tuhý zvyšok – popol, ktorý môže byť v nasledovných formách:

- *troska* – minerálne látky nachádzajúce sa v palive, ktoré prešli pri horení paliva procesom tavenia a vytvorili hutnú sklovitú hmotu,
- *škvara* - minerálne látky nachádzajúce sa v palive, ktoré v priebehu horenia zmäkli, spiekli sa a vytvorili pórovitý materiál,
- *popol* - minerálne látky nachádzajúce sa v palive, ktoré v priebehu horenia paliva zostávajú vo forme sypkej hmoty a prepadávajú cez rošt do popolnice,
- *popolček* – jemné častice tuhého zvyšku (popola), ktoré sú v procese spaľovania paliva strhávané z kúreniska, resp. zo spaľovacej komory spalinami.

Zachytávané sú v odlučovačoch popolčeka alebo sú spalinami odvádzané komínom do atmosféry.

Základný obsah popolovín a ich elementárne zloženie v biopalivách môžeme vidieť v tab. 2.3.1.

tab. 2.3.1 Podiel popolovín v biopalivách [19]

Palivo	Obsah popolovín (%)	Elementárne zloženie				
		C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)
<i>obilná slama</i>	3,5-6,5	43,9-48	5,4-6,4	38-43,3	0,3-0,7	0,05-0,2
<i>obilniny</i>	3	45	6	39,5	1	0,09
<i>slama so zrnom</i>	5,6	46,6	6,9	42,6	1,8	0,2
<i>slonia tráva</i>	8	49	6,4	41,3	1,7	0,3
<i>seno</i>	4,2-5,8	45-48,6	6-6,6	38,8-44,3	0,8-1,1	0,08-1,12
<i>drevo</i>	0,2-3	45-52	5,3-6,5	41,4-46	0,1-1,7	0,02-0,3

Vlhkosť paliva W^r je hmotnostný podiel vody obsiahnutý v palive. Delíme ju na *absolútnu vlhkosť* ktorá sa používa v drevospracujúcom priemysle a *relatívnu vlhkosť paliva* používanú v energetike, obe uvedené v percentách.

Relatívna vlhkosť

$$W^r = \frac{m_w - m_o}{m_o} \cdot 100 \quad (2.3)$$

m_w - hmotnosť vlhkého paliva [kg]

m_o - hmotnosť sušiny paliva [kg]

Voda je hlavnou časťou živých buniek drevín aj rastlín. Vypĺňa medzibunkové priestory, bunkové lúmeny (dutiny vnútri buniek) a mikroskopické dutinky vnútri bunkovej steny. Podľa toho, na ktorých miestach vnútri dreva sa voda vyskytuje, rozlišujeme vodu na:

- *voľnú (kapilárnu)* - vyskytuje sa väčšinou v lúmenoch vodivých buniek. V rastúcom strome je jej úlohou privádzať živé látky do asimilačných orgánov (listov). Po zoťatí stromu táto voda z dreva uniká najskôr, najmä z čelných koncov. Jej únikom sa drevo objemovo ani inak nemení, nešúverí sa ani netrhá.

- *viazanú (hygroskopickú)* - vypĺňa mikroskopické dutinky v bunkových stenách. Jej príjem alebo únik spôsobuje rozmerové zmeny, drevo napúča alebo zosychá. Niekedy je spracovanie dreva spojené s neprijemnými sprievodnými javmi, so šúverením a trhlinami.

- *chemicky viazanú (konštitučnú)* - je súčasťou chemického zloženia drevnej hmoty.

Bežnými spôsobmi sa z dreva odstrániť nedá. Uvoľňuje sa len pri chemickom spracovaní dreva, napr. destilácii. [19]

Vlhkosť je zároveň jedna z najdôležitejších vlastností ktorou sa biomasa líši od bežne využívaných palív pre jej premenný a často vysoký obsah vody. Biomasu je potrebné pri skladovaní vysušiť, inak spotrebuje pri spaľovaní veľký podiel spalného tepla – znižuje výhrevnosť a efektívne spálenie paliva (malý spaľovací priestor, nedostatočná tepelná kapacita stien spaľovacej komory, obmedzený rozsah regulácie prívodu spaľovacieho vzduchu), čo má za následok vyššie náklady pri spaľovaní. Alebo väčším výmenníkom využiť aj teplo obsiahnuté v odparenej vode a spaliny priviesť až ku kondenzácii. Pri spalinách z dreva by pri kondenzácii nemali nastať väčšie problémy. Vyššia vlhkosť tiež nepriaznivo pôsobí aj na nebezpečenstvo vzniku korózie určitých častí spaľovacieho zariadenia, množstva vodnej pary v spalinách, objem spalín a na nárast rosného bodu spalín. [12] [2] [3]

Pri kotloch menšieho výkonu a nižšej kvality (nižšia cena) je nutné použitie čiastočne, alebo úplne preschnutého paliva s výrazne limitovaným podielom prímiesí. Pyrolytické kotly na spaľovanie palivového dreva vyžadujú použitie paliva s vlhkosťou do 20 % absolútnej vlhkosti. Pelety a brikety sa vyrábajú z pilín s absolútnou vlhkosťou do 10 % bez podielu minerálnych prímiesí. Splynovacie zariadenia malých a stredných výkonov sú určené na použitie dendromasy s maximálnou absolútnou vlhkosťou do 20 %. Kvapalná palivá možno vyrábať z dendromasy ľubovoľnej vlhkosti bez podielu minerálnych prímiesí. [2]

Hustota (merná hmotnosť) ρ definujeme ako podiel hmotnosti k objemu látky. Hustota sa uvádza s jednotkou $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.4)$$

m - hmotnosť [kg]

V - objem [m^3]

Hustota vždy závisí od vlhkosti. Rovnaká drevina má pri rôznej vlhkosti rôznu hustotu. Preto pri jej vyjadrovaní treba poznamenať aj vlhkosť. [19]

U brikiet sa lisovaním dosahuje vysoká hustota až $1200 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, čo je dôležité pre objemovú minimalizáciu paliva. Relatívne vysokou hustotou sa vyznačujú aj pelety s hodnotou minimálne $650 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. [14]

tab. 2.3.2 Príklady hustoty a vlhkosti jednotlivých druhov [16]

Typ biomasy	Vlhkosť (%)	Hustota ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
Surové drevo		
<i>guľatina</i>	40-50	510-720
<i>štiepka</i>	40-50	280-410
<i>špalky</i>	40-50	350-530
<i>piliny</i>	40-50	420-640
Drevo sušené na vzduchu		
<i>guľatina</i>	20-25	350-530
<i>štiepka</i>	20-25	190-290
<i>špalky</i>	20-25	240-370
Technologicky sušené drevo		
<i>štiepka</i>	10-15	160-250
<i>špalky</i>	10-15	200-310
<i>piliny</i>	10-15	240-370
<i>brikety</i>	7-14	900-1100
<i>pelety</i>	7-14	500-700
<i>balíky slamy</i>	10-15	200-500
<i>uhlie (pre porovnanie)</i>	6-10	700-800

2.3.4 Porovnanie vlastností dendromasy a fytomasy

Lesná biomasa – dendromasa (drevo, dreviny, kôra, odpad z dreva). Hlavnými zdrojmi dendromasy sú lesné hospodárstva, kde časť vyťaženej suroviny je nevhodná pre použitie v drevospracujúcom priemysle a samotný drevospracujúci priemysel, ktorý vo výrobnom procese produkuje odpady dreva vhodné na energetické využitie. Perspektívnym zdrojom je drevná hmota, ktorú možno produkovať na málo produktívnych poľnohospodárskych pôdach, resp. iných nelesných pozemkoch, napr. formou intenzívnych porastov.

Fytomasa (rastliny, odpad rastlinnej produkcie). Pestovanie fytomasy pre energetické a technické účely má okrem energetického prínosu i veľký ekologický význam prejavujúci sa v obmedzení skleníkového efektu, v úspore fosílnych zdrojov energie, v znížení prašnosti v ovzduší, v obmedzení zaplevelnatosti územia, v oblasti využívania ladom stojacej pôdy, vo zvyšovaní zamestnanosti. [19]

Základné rozdiely medzi palivovou dendromasou a nedrevnou rastlinnou biomasou (fytomasou) sú: [2]

- dendromasa má pri rovnakej vlhkosti väčšiu mernú hmotnosť,
- dendromasa má pri rovnakej vlhkosti väčšiu výhrevnosť,
- dendromasa má v prirodzenom stave menej nespáliteľných zložiek,
- fytomasa má pri ťažbe (zbere) menšiu vlhkosť.

Energetický potenciál poľnohospodárskej biomasy vo forme fytomasy bol stanovený pri obsahu vlhkosti pri zbere 12 – 15 % v priemere 14 MJ.kg^{-1} . Táto hodnota výhrevnosti je relevantná aj pre stanovenie energetického potenciálu drevenej poľnohospodárskej biomasy pri priemernom obsahu vlhkosti 35 % po krátkodobom skladovaní. [7]

Rozdiel vidieť aj pri jednotlivých typoch paliva. Najlepšie porovnateľné sú pelety. Na rozdiel od drevených peliet z dendromasy (vid kapitola 2.3.1) sa z fytomasy vyrábajú alternatívne pelety - agropelety.

Agropelety sa vyrábajú zlisovaním poľnohospodárskych komodít (energetických rastlín, repkovej slamy, obilnej slamy, odpadov po čistení obilnín a olejní, sena apod.). Alternatívne pelety môžeme spaľovať iba v špeciálnych kotloch, ktoré sú k tomu priamo určené. Nie je možné ich spaľovať v kotloch určených iba pre drevené pelety, pretože spaľovaní alternatívnych peliet v kotloch na drevené pelety dochádza k zapekaniu horáku po pár hodinách chodu. [13]

Preto je ich použitie predovšetkým priemyselné - obsah popola je asi desaťkrát väčší a tiež vykazujú vyššiu spekavosť. Proces lisovania sa nelíši od drevených peliet, rovnako ako ich veľkosť. Sú o niečo ľahšie a výhrevnosť záleží na ich kvalite, no sú zdatným konkurentom hnedému uhlíu. Pri kvalitných agropeletách dosahuje toto palivo takmer rovnakú výhrevnosť ako drevené pelety. Spravidla pri výrobe, na rozdiel od drevených peliet odpadá proces sušenia suroviny avšak jej dostupnosť je skôr sezónna. Výhodou je nižšia cena. Vykazujú tiež veľkú saciu a absorpčnú schopnosť, preto je nutné skladovať ich v suchom prostredí. Je to však hlavný dôvod prečo sa agropelety dajú využiť aj ako podstielka pre zvieratá. [20] [13]

Drevené pelety

Merná hmotnosť: 1,0 – 1,4 t/m³

Sypná hmotnosť: 0,6 - 0,8 t/m³

Obsah popola: 0,5 - 2,5 %

Výhrevnosť: 17,5 - 19,5 MJ/kg

Alternatívne pelety

Merná hmotnosť: 0,9 – 1,2 t/m³

Sypná hmotnosť: 0,55 - 0,75 t/m³

Obsah popola: 1,0 - 9,0 %

Výhrevnosť: 15,0 - 18,0 MJ/kg

3 Praktická část

Zvyšok práce, začínajúc kapitolou tri, sa venuje priamo experimentu. Cieľom je výpočet účinnosti spaľovacieho zariadenia pri použití drevných peliet a následne agropeliet ako paliva za rovnakých okolitých podmienok. Ďalšou úlohou je zamerať sa na chemický nedopal, jeho stechiometrické zloženie a teplotu, vznikajúci pri tomto spaľovaní a následné porovnanie podľa emisnej normy v ČSN EN 305-5. Väčšina veličín, vstupujúcich a vystupujúcich do resp. z merania i výpočtu je odrazom súboru vlastností uvažovaného paliva, preto je nutné poznať prvkové zloženie a tiež vlastnosti (výhrevnosť, vlhkosť, obsah popola).

3.1 Norma ČSN EN 303-5

Nasledujúce výpisky sú prevzaté priamo z normy ČSN EN 303-5, uvedenej ako zdroj [37].

3.1.1 Skúšobné palivo

Pre skúšku kotlov pre ústredné vykurovanie sa používa palivo obchodnej akosti, s vlastnosťami pre daný druh paliva stanovenými výrobcom.

3.1.2 Účinnosť

Pre stanovenie tepelného výkonu, účinnosti kotla, doby horenia, zloženia spalín, teploty spalín, ťahu a vlastností emisií sa kotol v priebehu skúšky prevádzkuje v rozsahu tepelného výkonu. Pri menovitom tepelnom výkone sa kotol musí prevádzkovať tak, aby bola možná trvalá prevádzka (s vylúčením vypnutia regulátora teploty). Minimálny tepelný výkon kotlov musí byť regulovaný samočinným riadiacim prístrojom bez ručného zásahu. Pred zahájením akýchkoľvek meraní sa musí dosiahnuť prevádzkovej teploty kotla.

V priebehu skúšok musí byť kotol prevádzkovaný v súlade s pokynmi výrobcu. Teplota okolitého prostredia sa musí pohybovať medzi 15 °C až 30 °C. V priebehu merania nie je prípustný ručný zásah vo forme prehrabovania ohňa, roštovania ani akákoľvek úprava vrstvy paliva.

3.1.3 Chemický nedopal

Aritmetický priemer koncentrácií CO₂ alebo O₂, OGC a NO_x, sa stanovuje v priebehu celej doby skúšania pri menovitom výkone.

Tieto priemerné hodnoty objemových zložiek (ppm) sa používajú pre výpočet hmotnostných hodnôt (mg/m³). Na pre prevod z ppm na mg/m³ sa používajú ďalej uvedené hodnoty:

$$f_{CO}=1,2$$

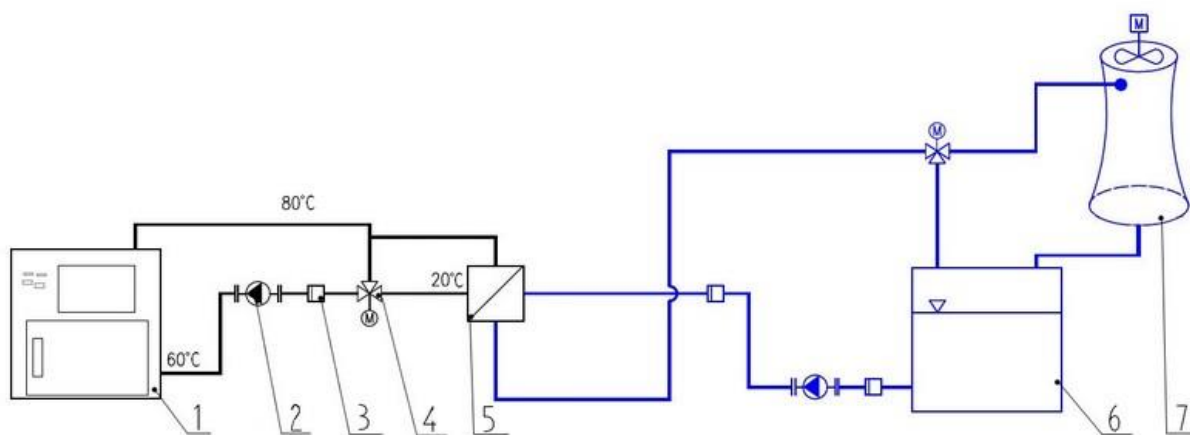
$$f_{NO}=2,05$$

Koncentrácie plynného, organicky viazaného uhlíku (OGC) sa uvádza ako uhlík.

Emisie pri spaľovaní musia byť nízke. Tabuľka, ktorá priamo hodnotí či je nameraná emisia v norme je rozdelená podľa kritérií. Sú to spôsob dodávania paliva – ručné a samočinné, jeho typu – biopalivá a fosílna palivá, menovitý tepelný výkon pri ktorom sa palivo spaľuje a emisnej triedy kotla. Kontroluje medzné hodnoty CO, OCG a prachu pri referenčných hladine kyslíka.

3.2 Popis experimentu

Všetky technické údaje o zariadeniach podieľajúcich sa na experimente sú opísané priamo z technického štítku konkrétneho zariadenia.



obr. 3.2.1 Schéma experimentu

- | | |
|--------------------------------------|--------------------|
| 1. Kotel | 6. Chladiaca nádrž |
| 2. Čerpadlo | 7. Chladiaca veža |
| 3. Filter | |
| 4. Trojcestný ventil so servomotorom | |
| 5. Výmenník tepla | |

Na výpočet účinnosti zariadenia pri použití drevných peliet a agropeliet, ako paliva, sa použilo reálne uskutočnené meranie. Na obr. 3.2.1 je uvedená schéma sústavy použitej v experimente. Sústava sa dá rozdeliť na dva okruhy. Prvý (čierny), ktorý zabezpečuje cyklus kotol-výmenník tepla a druhý (modrý), chladiaci okruh.

V tom prvom je systém uzavretý, napustený vodou, ktorá sa ohrieva v kotly na teplotu 80 °C. Určitý objem takto ohriatej vody putuje potrubím do výmenníka iný, menší, k trojcestnému ventilu. Vo výmenníku, ktorý simuluje ústredné kúrenie, sa predá časť tepla do okolia. Vo väčšej miere však vodu vo výmenníku tepla ochladí voda z okruhu dva, na teplotu 20 °C. Takto schladená smeruje k už spomínanému trojcestnému ventilu. Jednou jeho cestou ide voda z kotla, tou ďalšou ochladená z výmenníka. Výsledkom je voda o teplote 60 °C, ktorá smeruje nazad do kotla, kde sa znova ohreje na požadovanú hodnotu 80 °C. Dôvodom miešania vody je predísť nízkoteplotnej korózii.

Potrubie, ktorým voda prúdi z kotla do systému tiež nazývame *prívod*. Potrubie smerujúce naspäť do kotla zas *spiatočka*.

Druhý okruh pozostáva z chladiacej nádrže a chladiacej veže. Z nádrže sa čerpá studená voda smerom k výmenníku, kde sa medzi nimi uskutoční prenos tepla. Potom má vďaka trojcestnému ventilu, ktorý je súčasťou odtokového potrubia. Ak má správnu teplotu a je dosť chladná vráti sa cez ventil rovno do chladiacej nádrže. Ak má však teplotu vyššiu, prejde do chladiacej veže, kde sa schladí a odtiaľ pretečie do spomínanej nádrže.

3.2.1 Kotel Verner A251.1

Verner A251 je automatický kotel na pelety a uhlie určený na ohrev teplej úžitkovej vody. Zaisťuje úplnú automatickú prevádzku od dopravy paliva a jeho zapálenia až po transport popola. Zapálenie sa uskutočňuje pomocou elektrickej špirály, ktorá ohreje vzduch na vysokú teplotu pričom sa palivo vznieti. Umožňuje tiež reguláciu výkonu od 30 až po 100 %. Výkon 0 až 30 % je zaistené automatickým režimom udržiavania ohniska so samočinným zapalovaním. Výrobca uvádza vysokú účinnosť až 92 %. [24]

tab. 3.2.1 Technické parametre kotla

Teplovodní kotel Verner A251.1	
Rok výroby	2008
Menovitý tepelný výkon	25 kW
Hmotnosť kotla	520 kg
Najvyšší prevádzkový pretlak vody	0,3 MPa
Najvyššia prevádzková teplota vody	95 °C
Vodný objem kotla	60 l
Elektrické napätie / kmitočet	230V / 50 Hz
Elektrický príkon kotla	MAX. 1,5 kW
Druh krytia elektrických častí	IP 41
Emisná trieda kotla	3

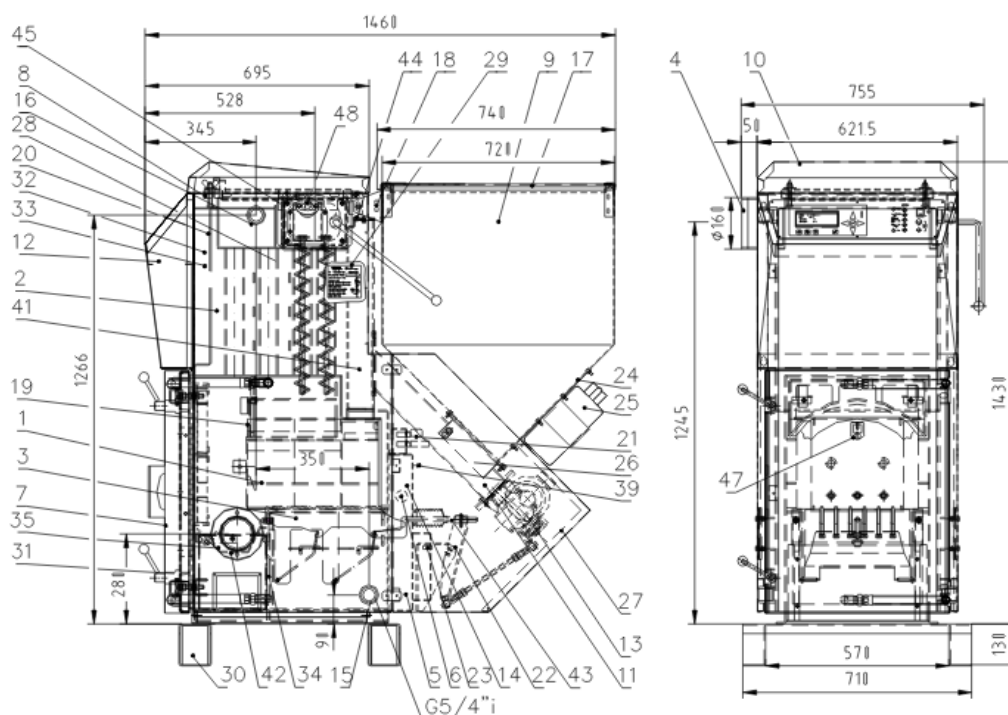


obr. 3.2.2 Kotel Verner [28]

Kotel je vybavený elektronickým regulátorom, ktorý riadi prevádzku kotla, dávkuje palivo a reguluje otáčky ventilátora. Teplotne namáhané časti sú z akostne žiaruvzdornej ocele. Sila telesa v korózne rizikových miestach je až 8 mm a komponenty, kde hrozí mechanické alebo teplotné poškodenie sú meniteľné. Horenie prebieha v špeciálnom horáku s automatickým roštovaním, čo umožňuje spálenie aj palív s vyšším podielom spekavého popola. Toto robí kotel vhodný na spaľovanie drevených a rastlinných peliet o priemere 6-14 mm a obilných zvyškov (zrna) – pšenice, jačmeňa, ovsa a kukurice. Pamäť regulátoru obsahuje parametre pre desať rôznych druhov palív. Špeciálne kalibračné funkcie regulátoru uľahčuje nastavenie kotla na iné typy palív a možnosť zapojenia lambda sondy zaisťuje optimálne spaľovanie palív premenlivých vlastností. Prísun paliva z násypky do horáku zaisťuje slimačí podávač. Pôvodná násypka od výrobcu je však nahradená menšou, kvôli limitu váhy na váženie hmotnosti dávky paliva. Prívod spaľovacieho vzduchu zaisťuje pretlakový ventilátor.

Slimačí dopravník dopravuje palivo z násypky do spádu, odkiaľ prepadáva do horáku. Rozptyľovač zaisťuje rovnomernejšie rozmiestnenie paliva po ploche roštu. V horáku sa palivo spaľuje a nespáliteľné zvyšky sú vytlačované roštnicami do popolníku. Roštovanie je poháňané reverzným chodom pohonu plniaceho dopravníku a spaliny prúdia výmenníkom, kde predávajú teplo do vykurovacej vody. Ochudobnené o toto teplo spaliny odchádzajú výstupným hrdlom do komína. Vzduch potrebný pre spaľovanie dodáva pretlakový ventilátor. Primárny vzduch sa

privádza do paliva medzerami v rošte a sekundárny vzduch sa do horáku privádza spádom paliva a otvormi v zadnej stene horáku. [27]



obr. 3.2.3 Zostava jednotlivých častí kotla [27]

- 1 Horák
- 2 Spalinový výmenník
- 3 Roštice
- 4 Odťahové hrdlo spalín
- 5 Vzduchovanie a ventilátor
- 6 Clona primárneho okruhu
- 7 Dvierka dolné – popolové
- 8 Dvierka horné – čistiace
- 9 Násypka
- 10 Kryt čistiacich dvierok
- 11 Slimačí dopravník
- 12 Regulátor kotla
- 13 Prevodovka s elektromotorom
- 14 Vykurovací tyč s el. zapáľovaním
- 15 Nátrubok vstupnej vody
- 16 Nátrubok výstupnej vody
- 17 Vrchnák komory
- 18 Koncový spínač násypky
- 19 Vrchnák komory
- 20 Čidlo teploty spalín a termostat
- 22 Pohon roštice

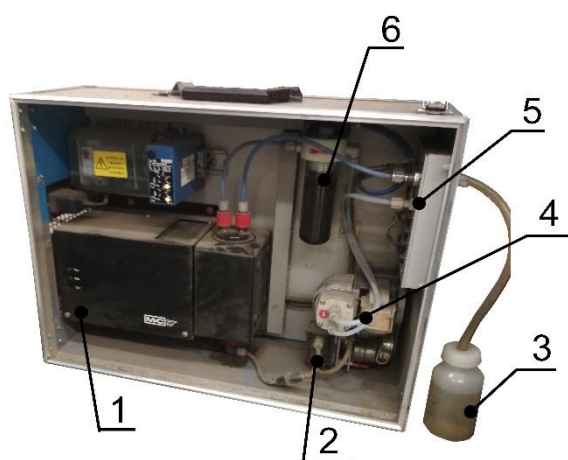
- 23 Koncový spínač pohonu roštice
- 24 Vrchnák násypky
- 25 Nádob havarijného hasiaceho zariadenia
- 26 Tavná poistka – vosková zátka
- 27 Kryty pohonu – 3 kusy
- 28 Turbulátory
- 29 Výrobný štítok
- 30 Prepravné nohy
- 31 Popolník
- 32 Čidlo teplotnej vody
- 33 Havarijný termostat
- 34 Vrchnák priestoru pod roštom
- 35 Hrdlo pre automatické odpopolnenie
- 36 Popolový dopravník
- 37 Pohon
- 38 Popolník
- 39 Clony sekundárneho vzduchu
- 40 Vrchnák roštu
- 41 Spád paliva
- 42 Popolový žľab
- 43 Poistka (2x skrutka M3x16)
- 44 Vrchnák spádu
- 45 Prepážka
- 46 Nástavec popolníka

47 Rozptylovač paliva
48 Lambda sonda

49 Hrdlo zahlcovacieho vzduchu pod
popolníkom
50 Vložka adaptéru

3.2.2 Komplex mraziaci box na spaliny

Mraziaci box obsahuje niekoľko častí. Spaliny z komína prechádzajú cez externú ohrievanú hadicu do súčasti „mraziaci box“. Hadica je ohrievaná aby sa zabránilo kondenzácii vody, v ktorej sa rozpúšťajú oxidy a do analyzátoru by sa tak nedostala vierohodná vzorka. Úlohou mraziaceho boxu je ochladiť spaliny z komína ktoré dosahujú vysoké teploty. V mraziacom boxe sa ďalej oddelí kvapalný kondenzát, ktorý sa odčerpá cez čerpadlo do externej nádoby. Kondenzát výrazne zapácha. Zvyšok ochladených plynných spalín prejde ďalej cez filter do vývevy a až do analyzátoru spalín.



1. Mraziaci box
2. Čerpadlo kondenzátu
3. Kondenzát zo spalín
4. Výveva
5. Hadička na odvod spalín do analyzátoru
6. Filter spalín

obr. 3.2.4 Časti mraziaceho boxu

3.2.3 Analyzátory spalín Siemens Ultramat 21/O₂ a 22

Ultramat 22 slúži na procesnú analýzu koncentrácie SO₂ a NO v spalínach energetických zdrojov. Ultramat 21/O₂ analyzuje koncentráciu O₂ a CO.

tab. 3.2.2 Technické parametre Ultramat 21

Ultramat 21/O ₂	
Elektrické napätie / kmitočet	230V / 50 Hz / 60VA
Vstupná teplota spalín	0-45 °C
Druh krytia elektrických častí	IP 31 DIN 40050
Rozsah merania	0-10 % / 25 O ₂ 0-5000 ppm CO

obr. 3.2.5 Analyzátory spalín



tab. 3.2.3 Technické parametre Ultramat 22

Ultramat 22	
Elektrické napätie / kmitočet	230V / 50 Hz / 70 VA
Vstupná teplota spalín	0-45 °C
Druh krytia elektrických častí	IP 31 DIN 40050
Rozsah merania	0-5000 mg/m ³ SO ₂
	0-1500 m ³ NO

3.2.4 Indukčný prietokomer Flomag 3000

Indukčný prietokomer je meradlo objemového prietoku vodivých kvapalín v uzatvorenom potrubí. Umožňuje obojsmerné meranie prietoku s vysokou presnosťou v širokom pásme rýchlostí prúdenia (0,1-12 m/s). Mikroprocesorom riadená elektronická jednotka ponúka množstvo binárnych, analógových a číslicových vstupov a výstupov. [25]

tab. 3.2.4 Tech. parametre Flomag 3000

Flomag 3000	
Rok výroby	2012
Typ	S1 – A6 V1
Napájacie napätie	85-265 VAC / 10 VA
Príkon	5-8 VA
Druh krytia elektrických častí	IP 66



obr. 3.2.6 Prietokomer [29]

3.2.5 Tepelný výmenník

Med'ou spájkovaný doskový tepelný výmenník, ktorý je vyrobený z lisovaných teplovýmenných dosiek, ktoré majú prietokové kanáliky. Výsledkom turbulentného prúdu a protiprúdu je efektívny prenos tepla. Cez jednu vetvu tečie ohriata voda z kotla skrz trojcestný ventil, pomocou druhej vetvy sa voda ochladzuje, vďaka vode z chladiacemu okruhu II. [26]

tab. 3.2.5 Technické parametre výmenník

Tepelný výmenník SWEP		
Typ	B12Lx50/1P-SC-S	
Rok výroby	2012	
	prim	sec
Max. prevádzková teplota	155 (255) °C	155 (225) °C
Max. prevádzkový tlak	31 (27) bar	28 (25) bar
Test pressure	50 bar	45 bar
Hlasitosť	1,512 L	1,575 L
Min. pracovná teplota	-196 °C	
Skupiny tekutín 1 a 2		

obr. 3.2.7 Výmenník [30]



3.2.6 Trojcestný ventil

Ventil je určený na reguláciu uzatvoreného okruhu I. Má za úlohu miešať vodu z kotla o teplote cca 80 °C s ochladenou vodou z výmenníku o teplote cca 20 °C. Následne sa zmiešaná voda (60 °C) čerpá spiatočkou nazad do kotla. Na reguláciu ventilu je použitý elektrický servopohon Belimo LRQA-SZ.



obr. 3.2.8 Ventil so servom [31]

tab. 3.2.6 Technické parametre servo

Nominálne napätie	AC/DC 24 V
Príkion	23 VA
Krútiaci moment motora	4 Nm
Druh krytia elektrických častí	IP 54
Váha	0,92 kg

3.2.7 Čerpadlo Grundfos

Obehové mokrobežné čerpadlo pre použitie k cirkulácii vody vo vykurovacích a klimatizačných systémoch. Dosahuje nízku hladinu hluku a nastavenie výkonu čerpadla je možné regulovať pomocou trojrychlostného prepínača otáčok.

tab. 3.2.7 Technické parametre čerpadlo

Grundfos UPS 25-60	
Napájanie	230 V
Max. dopravná výška	6 m
Stavebná dĺžka	180 mm
Energetická trieda	B
Teplota čerpaného média	-25÷110 °C
Max. tlak	10 bar
Druh krytia elektrických častí	IP 44



obr. 3.2.9 Čerpadlo [32]

3.3 Chemický nedopal v procese spaľovania

Experiment bol z veľkej časti zameraný na spaliny. Sledovala sa teplota spalín a ich zloženie. Ďalšie veličiny ako objem suchých spalín, či vlhkých spalín alebo dokonca reálny objem spalín vzniknutých pri procese spaľovania sa dopočítal zo známych vzťahov. Je teda vhodné podrobnejšie uviesť, čo to spaliny sú a akú úlohu zohrávajú.

Spaliny sú plynným produktom spaľovania. Obsahujú veľké množstvo chemických zlúčenín, ktoré vznikajú v priebehu spaľovania a tiež „nevyužitý“ spaľovací vzduch.

Pokiaľ je odvod spalín nedostatočný, postupne zaplňujú spaľovaciu komoru a nezostáva miesto pre spaľovací vzduch. Proces spaľovania sa začne narúšať. Je teda dôležité poznať objem spalín, ktorý v danom zariadení pri spaľovaní vzniká.

Pri teoretickom výpočte sa vychádza z prvkového zloženia paliva. Ak je známe, dá sa stanoviť minimálny objem suchých spalín, čo je objem suchých spalín vzniknutý dokonalým spálením 1 kilogramu paliva s teoretickým objemom suchého spaľovacieho vzduchu. V reálnych podmienkach je však nutné spaľovať tuhé palivá za prebytku vzduchu. Vzniknuté spaliny navyše obsahujú určité množstvo vodnej pary z paliva, vzduchu a paru vzniknutú spálením palivového vodíku, čo zväčšuje ich objem. Ten je samozrejme tiež závislý na teplote uvažovaných spalín.

Za ideálnych podmienok by sa v spaliniach nachádzali iba plynné produkty horenia a dusík zo spaľovacieho vzduchu, ktorý sa horenia neúčastní. Avšak v bežnom reálnom procese horenia sa do spalín dostáva nevyužitý kyslík, pochádzajúci z prebytku vzduchu s ktorým spaľujeme. Uhlík dokonale nevyhorí na CO₂, ale časť ho zreaguje na CO.

Koncentrácia oxidu uhoľnatého vypúšťaného do ovzdušia má prísne hranice, keďže ide o jedovatý plyn. Jeho obsah v spaliniach zároveň udáva mieru nedokonalosti spaľovania, preto je sledovanie množstva, ktoré zaujíma v celom objeme spalín, ešte dôležitejšie. U peletových kotlov je koncentrácia CO v spaliniach hlavným kritériom pri stanovení straty chemickým nedopalom.

Veľkosť objemov kyslíku a oxidu uhličitého v spaliniach je spolu úzko súvisí. Spaľovací vzduch obsahuje 21 % kyslíku. Ak by sa všetok kyslík spotreboval na dokonalé spálenie všetkého uhlíku v horľavine, v spaliniach by sa objavilo 21 % CO₂. Časť kyslíka však spotrebujú na svoju oxidáciu aj ostatné spáliteľné zložky paliva (síra, vodík) a preto je maximálne teoreticky dosiahnuteľná koncentrácia CO_{2max} nižšia. Čím je koncentrácia nižšia, tým nižšia je účinnosť spaľovania. A so znižujúcim podielom CO₂ sa v spaliniach zvyšuje podiel kyslíku. Ich vzájomný vzťah sa dá vyjadriť rovnicou

$$\alpha = \frac{CO_{2max}}{CO_2} = \frac{21}{21 - O_2} \quad (3.1)$$

čo využíva väčšina analyzátorov spalín. [33] Tento vzťah zároveň vyjadruje súčiniteľ prebytku vzduchu, čo je dôležitou veličinou pre prevádzku kotla. Čím vyšší súčiniteľ je, tým zhoršuje komínovú stratu a znižuje účinnosť. Nižší zasa môže viesť k miestnemu nedokonalému spaľovaniu, čo zvyšuje straty chemickým nedopalom a znižuje uvoľnené teplo v ohnisku. [35]

Zmes oxidu dusnatého NO a oxidu dusičitého NO₂, označená ako NO_x, je ďalšou sledovanou znečisťujúcou látkou. Dusík je inertný plyn a za obvyklých podmienok v ohnisku v peletovom kotle reaguje s kyslíkom iba nepatrne. Na druhú stranu, rastlinné pelety majú vysoký podiel palivového dusíka, a aj vďaka horšej stabilite horenia, vzniká podstatne viac palivových oxidov dusíka a celkový podiel NO_x je až 1000 ppm. [33]

4 Výpočet tepelnej účinnosti

Účinnosť je ukazovateľom miery dokonalosti transformácie energie v zariadení. Jedná sa o technologicko-ekonomický parameter. Nasledujúca kapitola, ak nie je uvedené inak, bola spracovaná zo zdroja [35].

4.1 Metódy výpočtu

Tepelnú účinnosť zariadení môžeme vypočítať dvoma spôsobmi:

- priama metóda – výpočet z energie dodanej a vyrobenej
- nepriama metóda – výpočet pomocou tepelných strát kotla.

4.2 Priama metóda

Účinnosť kotla je všeobecne daná pomerom medzi energiou vyrobenou (v podobe pary, horúcej vody alebo inému médiu) k energii privedenej palivom.

U teplovodných kotlov (bez príkonu vzduchu ohriateho iným zdrojom) vypočítame účinnosť získanú priamou metódou ako:

$$\eta_k = \frac{M_w \cdot (i_{w2} - i_{w1})}{Q_i^T \cdot M_{pv}} [-], \quad (3.2)$$

kde člen v menovateli nazývame menovitý výkon kotla.

4.3 Nepriama metóda

Nepriama metóda určuje účinnosť kotla zo sumy strát kotla. Metodika výpočtu je daná ČSN 070302. Účinnosť je počítaná podľa rovnice:

$$\eta_k = 1 - \sum \xi_i = 1 - \xi_{mn} - \xi_f - \xi_{cn} - \xi_k - \xi_{sv} [-] \quad (3.3)$$

Jednotlivé ξ členy značia rôzne druhy tepelných strát kotla. Konkrétne ich poznáme päť a podrobnejšie budú rozobraté v ďalšej podkapitole.

4.3.1 Straty

Strata horľavinou v tuhých zvyškoch ξ_{mn} :

Nazývame ju tiež strata mechanickým nedopalom a je spôsobená obsahom nevyhoreného uhlíku v tuhých zvyškoch (popolček v spalinách (p), struska (s), roštový prepád (r)), ktoré odchádzajú zo spaľovacej komory.

$$\xi_{mn} = \frac{Q_c \cdot A^r}{Q_r^i} \cdot \frac{C_i}{1 - C_i} \cdot X_i \quad (3.4)$$

Dolný index i sa vzťahuje k uvažovanému druhu tuhých zvyškov.

Strata fyzickým teplom tuhých zvyškov ξ_f

Jedná sa o stratu, ktorú spôsobuje nevyužitie teplo v odchádzajúcich tuhých zvyškoch.

Vypočítame ju ako:

$$\xi_f = \frac{A^r}{Q_r^i} \cdot \frac{X_i \cdot i_i}{1 - C_i} \quad (3.5)$$

kde člen i_i predstavuje entalpiu tuhých zvyškov a vypočíta sa ako $i_i = c_i \cdot t_i$ [kJ.kg⁻¹] (14).

Strata horľavinou v spalinách ξ_{cn}

Strata chemickým nedopalom je daná chemickou nedokonalosťou spaľovania, prejavujúcou sa obsahom nespálených plynov CO, H₂, CH_x, poprípade ďalšími, v spalinách. Ich obsahy je však nutné merať v prevádzke.

$$\xi_{cn} = (1 - \xi_{mn}) \cdot \frac{V_{sp} \cdot (\omega_{CO} \cdot Q_{CO}^r + \omega_{H_2} \cdot Q_{H_2}^r + \omega_{C_xH_y} \cdot Q_{C_xH_y}^r)}{Q_i^r} \cdot 100 \quad (3.6)$$

Strata fyzickým teplom spalín ξ_k

Alebo inak komínová strata je daná tepelnou energiou odchádzajúcich plyných spalín. Rozhodujúci vplyv má teplota spalín za kotlom t_s a súčiniteľ prebytku vzduchu za kotlom a_k , ktorý súvisí s netesnosťou kotla a prisávaním falošného vzduchu.

$$\xi_k = (1 - \xi_{mn}) \cdot \frac{I_{sp} - I_{vz}}{Q_i^r} \quad (3.7)$$

Strata zdieľaním tepla do okolia sálaním a vedením ξ_{sv}

Jedná sa o stratu závislú na veľkosti kotla, kvalite izolácie stien, spôsobe oplechovaní a na druhu spaľovaného paliva. Dá sa určiť výpočtom zo Stefan-Boltzmannového vzťahu. Avšak aj v laboratórnych podmienkach je určovanie tejto straty diskutabilné a výpočet veľmi zdĺhavý preto sa volí z praxe strata rovná 0,01.

4.4 Tepelná účinnost' kotla pri spaľovaní drevených peliet

tab. 4.4.1 Nastavenie kotla - drevo

Palivo pelety – palivo A1 Ø6mm drevo				
čas násypu	interval	plnenie	ventilátor	rošt
9:38	16	3	3	20

Ide o cyklus slimáka. Interval sa uvádza v minútach a rozdeľuje sa na čas kedy slimák stojí a kedy podáva palivo.

Stupeň otáčok x zo 7.

Rošt vybícha dopredu a posúva popol, ktorý padá do spodného popolníku. Čím menej popola, tým je interval posunu väčší.

Značí dobu z intervalu po ktorú slimák podáva palivo.

	Hodnota	Jednotka
Vybraný časový úsek experimentu	10:30-11:25	hh:mm
Priemerný prietok vody	1,2131	m ³ .h ⁻¹
Priemerná teplota prívodu vody	84,303	°C
Priemerná teplota spätočnej vody	60,196	°C
Priemerná teplota spalín	239,887	°C
Priemerná hodnota NO	586,84	mg/m ³
Priemerná hodnota CO	323,72	mg/m ³
Priemerná hodnota O ₂	7,11	%
Priemerná hodnota SO ₂	439,59	mg/m ³

tab. 4.4.2 Charakteristika – drevo

Vodík H	6,04 hm %
Uhlík C	47,18 hm %
Síra S	0,01 hm %
Kyslík O	38,47 hm %
Dusík N	0,2 hm %

Výhrevnosť	18,5 MJ/kg
Obsah vody	4,66 %
Obsah popola	0,4 %

tab. 4.4.3 Špecifikácie meranie – drevo

4.4.1 Nepriama metóda výpočtu účinnosti

Na výpočet jednotlivých strát je potrebné vypočítať niekoľko pomocných výpočtov, ktoré ovplyvňuje hlavne prvkové zloženie paliva.

Minimálny objem kyslíku potrebný pre dokonalé spálenie 1 kg paliva

$$V_{O_2min} = 22,39 \cdot \left(\frac{C^r}{12,01} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,06} - \frac{O^r}{32} \right) \quad (3.8)$$

$$V_{O_2min} = 22,39 \cdot \left(\frac{0,4718}{12,01} + \frac{0,0604}{4,032} + \frac{0,0001}{32,06} - \frac{0,3847}{32} \right)$$

$$V_{O_2min} = 0,9459 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Minimálny objem suchého vzduchu potrebný pre dokonalé spálenie 1 kg paliva

$$V_{vzmin}^s = \frac{100 \cdot V_{O_2min}}{21} \quad (3.9)$$

$$V_{vzmin}^S = \frac{100 \cdot 0,9459}{21}$$

$$V_{vzmin}^S = 4,5043 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Objem vodnej pary v minimálnom objeme vlhkého vzduchu, ktorá zväčšuje objem vzduchu. Uvažujeme bežné atmosférické podmienky a teda relatívnu vlhkosť vzduchu 70 %, atmosférický tlak 101,305 kPa a teplotu vzduchu 20 °C.

$$V_{H_2O} = \frac{\varphi}{100} \cdot \frac{p''}{p_c - \frac{\varphi}{100} \cdot p''} \quad (3.10)$$

$$V_{H_2O} = \frac{70}{100} \cdot \frac{0,004246}{0,101 - \frac{70}{100} \cdot 0,004246}$$

$$V_{H_2O} = 0,01619 [-]$$

Súčiniteľ f vyjadrujúci pomerné zväčšenie objemu suchého vzduchu o objem vodnej pary

$$f = 1 + V_{H_2O} = 1 + 0,01619 = 1,01619 \quad (3.11)$$

Minimálny objem vlhkého vzduchu potrebný pre dokonalé spálenie 1 kg paliva

$$V_{Vzmin} = f \cdot V_{Vzmin}^S \quad (3.12)$$

$$V_{Vzmin} = 1,01619 \cdot 4,5043$$

$$V_{Vzmin} = 4,5772 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Objem spalín vzniknutých pri dokonalom spálení 1 kg paliva

$$V_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot C + \frac{1}{100} \cdot 0,03 \cdot V_{vzmin}^S \quad (3.13)$$

$$V_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot 0,4718 + \frac{1}{100} \cdot 0,03 \cdot 4,5043$$

$$V_{CO_2} = 0,8758 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$V_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot S \quad (3.14)$$

$$V_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot 0,0001$$

$$V_{SO_2} = 0,000068278 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$V_{N_2} = \frac{22,40}{28,013} \cdot N_2 + \frac{1}{100} \cdot 78,05 \cdot V_{vz_{min}}^S \quad (3.15)$$

$$V_{N_2} = \frac{22,40}{28,013} \cdot 0,002 + \frac{1}{100} \cdot 78,05 \cdot 4,5043$$

$$V_{N_2} = 3,5172 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$V_{Ar} = \frac{1}{100} \cdot 0,92 \cdot V_{vz_{min}}^S \quad (3.16)$$

$$V_{Ar} = \frac{1}{100} \cdot 0,92 \cdot 4,5043$$

$$V_{Ar} = 0,0414 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$V_{sp_{min}}^S = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{Ar} \quad (3.17)$$

$$V_{sp_{min}}^S = 0,8758 + 0,000068278 + 3,5172 + 0,0414$$

$$V_{sp_{min}}^S = 4,4345 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Vodná para z horľaviny paliva – vodíku, z vlhkosti paliva a z vlhkosti spaľovacieho vzduchu

$$V_{H_2O}^h = \frac{44,81}{4,032} \cdot H_2 + \frac{22,41}{18,015} \cdot W^r + (f - 1) \cdot V_{vz_{min}}^S \quad (3.18)$$

$$V_{H_2O}^h = \frac{44,81}{4,032} \cdot 0,0604 + \frac{22,41}{18,015} \cdot 0,0466 + (1,01619 - 1) \cdot 4,5043$$

$$V_{H_2O}^h = 0,8022 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Minimálny objem vlhkých spalín

$$V_{sp_{min}} = V_{sp_{min}}^S + V_{H_2O}^h \quad (3.19)$$

$$V_{sp_{min}} = 4,4345 + 0,8022$$

$$V_{sp_{min}} = 5,2367 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Súčiniteľ prebytku vzduchu

$$\alpha = \frac{21}{21 - O_2}$$

$$\alpha = \frac{21}{21 - 7,11}$$

$$\alpha = 1,5119 [-]$$

Objem suchých spalín za prebytku vzduchu

$$V_{sp}^s = V_{sp_{min}}^s \cdot \alpha \quad (3.20)$$

$$V_{sp}^s = 4,4345 \cdot 1,5119$$

$$V_{sp}^s = 6,7045 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Skutočný objem vzduchu

$$V_{vz} = V_{vz_{min}} \cdot \alpha \quad (3.21)$$

$$V_{vz} = 4,5772 \cdot 1,5119$$

$$V_{vz} = 6,9203 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Skutočný objem vlhkých spalín

$$V_{sp} = V_{sp_{min}} + (\alpha - 1) \cdot V_{vz_{min}} \quad (3.22)$$

$$V_{sp} = 5,2367 + (1,5119 - 1) \cdot 4,5772$$

$$V_{sp} = 7,5798 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$(\alpha - 1) \cdot V_{vz_{min}}$ objem spalín z prebytočného vzduchu.

Tepelný obsah spalín

-merné entalpie spalín [36] boli interpoláciou prepočítané na hodnotu odpovedajúcu teplote spalín.

$$I_{sp} = I_{sp_{min}} + (\alpha - 1) \cdot I_{vz_{min}} + I_p \quad (3.23)$$

$$I_{sp_{min}} = V_{CO_2} \cdot i_{CO_2} + V_{SO_2} \cdot i_{SO_2} + V_{N_2} \cdot i_{N_2} + V_{H_2O} \cdot i_{H_2O} + V_{Ar} \cdot i_{Ar} \quad (3.24)$$

$$I_{sp_{min}} = 0,8758 \cdot 438,02 + 0,000068278 \cdot 480,62 + 3,5172 \cdot 312,78 + 0,8022 \cdot 367,82 + 0,0414 \cdot 223,12$$

$$I_{sp_{min}} = 1788,0629 \text{ kJ/kg}$$

$$I_{vz_{min}} = V_{vz_{min}} \cdot c_{vz} \cdot t_{vz} \quad (3.25)$$

$$I_{vz_{min}} = 4,5772 \cdot 1,3222 \cdot 20$$

$$I_{vz_{min}} = 121,0395 \text{ kJ/kg}$$

Tepelný obsah popolčeka I_p obsiahnutého v spalinách sa uvažuje ak platí podmienka

$$A^r > \frac{6 \cdot Q_i^r}{41,8 \cdot X_p} \rightarrow 0,4 < \frac{6 \cdot 18,5 \cdot 10^3}{41,8 \cdot 30} = 88,5. \quad (3.26)$$

Nerovnosť neplatí a teda, s tepelným obsahom popolčeka nepočítam.

$$I_{sp} = 1788,0629 + (1,5119 - 1) \cdot 121,0395$$

$$I_{sp} = 1850,023 \text{ kJ/kg}$$

Tepelný obsah vzduchu

$$I_{vz} = I_{vz_{min}} \cdot \alpha \quad (3.27)$$

$$I_{vz} = 121,0395 \cdot 1,5119$$

$$I_{vz} = 182,9996 \text{ kJ/kg}$$

Strata horľavinou v tuhých zvyškoch ξ_{mn}

Na výpočet použijeme rovnicu kde, kde Q_c je daná, experimentálne zistená hodnota výhrevnosti uhlíku a činí 32600 kJ.kg^{-1} . Experimentálne zisťovanie hmotnosti popola v tuhých zvyškoch je veľmi komplikované. Na základe konzultácie sa teda pre výpočet volia hodnoty z praxe.

$$\xi_{mn} = \frac{Q_c \cdot A^r}{Q_r^i} \cdot \left(\frac{C_r}{1 - C_r} \cdot X_r + \frac{C_s}{1 - C_s} \cdot X_s + \frac{C_p}{1 - C_p} \cdot X_p \right) \quad (3.28)$$

$$\xi_{mn} = \frac{32600 \cdot 0,004}{18,5 \cdot 10^3} \cdot \left(\frac{0,12}{1 - 0,12} \cdot 0,05 + \frac{0,05}{1 - 0,05} \cdot 0,65 + \frac{0,05}{1 - 0,05} \cdot 0,3 \right)$$

$$\xi = 0,0004005 \text{ [-]}$$

Strata fyzickým teplom tuhých zvyškov ξ_f

$$\xi_f = \frac{A^r}{Q_r^i} \cdot \frac{X_i \cdot i_i}{1 - C_i}$$

$$\xi_f = \frac{A^r}{Q_r^i} \cdot \left(\frac{X_s \cdot c_s \cdot t_s}{1 - C_s} + \frac{X_p \cdot c_p \cdot t_p}{1 - C_p} + \frac{X_r \cdot c_r \cdot t_r}{1 - C_r} \right) = B \cdot \frac{A^r}{Q_r^i} \quad (3.29)$$

tab. 4.4.4 Konštanta strát [38]

Ohnisko	B
S pásovým roštom	0,6
S posuvným roštom	0,5

$$\xi_f = \frac{0,004}{18,5 \cdot 10^3} \cdot 0,5$$

$$\xi_f = 0,0000001081 \text{ [-]}$$

Strata horľavinou v spaliniách ξ_{cn}

$$CO_{m,g/m^3} = 1,2 \cdot CO_{ppm} \quad [33] \quad (3.30)$$

$$\omega_{CO} = 258,976 \quad [-]$$

$$\xi_{cn} = (1 - \xi_{mn}) \cdot \frac{V_{sp}^s \cdot (\omega_{CO} \cdot Q_{CO}^r + \omega_{H_2} \cdot Q_{H_2}^r + \omega_{C_xH_y} \cdot Q_{C_xH_y}^r)}{Q_i^r} \cdot 100$$

$$\xi_{cn} = (1 - 0,0004005) \cdot \frac{6,7045 \cdot 258,976 \cdot 10^{-6} \cdot 12610}{18,5 \cdot 10^3}$$

$$\xi_{cn} = 0,00118 \quad [-]$$

Strata fyzickým teplom spalín ξ_k

$$\xi_k = (1 - \xi_{mn}) \cdot \frac{I_{sp} - I_{vz}}{Q_i^r}$$

$$\xi_k = (1 - 0,0004005) \cdot \frac{1850,023 - 182,9996}{18,5 \cdot 10^3}$$

$$\xi_k = 0,0901 \quad [-]$$

Strata zdieľaním tepla do okolia sálaním a vedením ξ_{sv}

$$\xi_{sv} = 0,01 \quad [-]$$

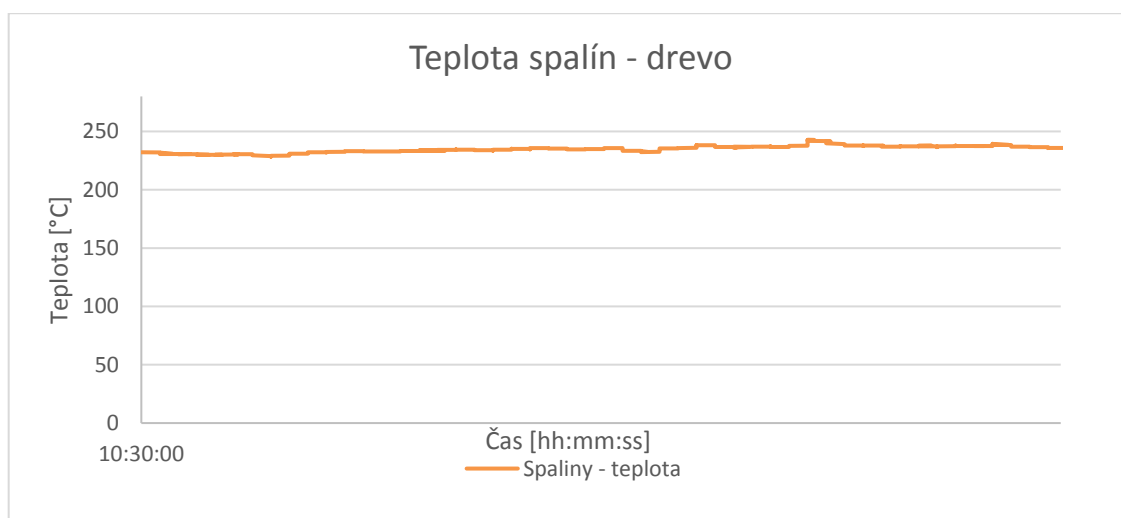
Účinnosť

$$\eta_k = 1 - \sum \xi_i = 1 - \xi_{mn} - \xi_f - \xi_{cn} - \xi_k - \xi_{sv}$$

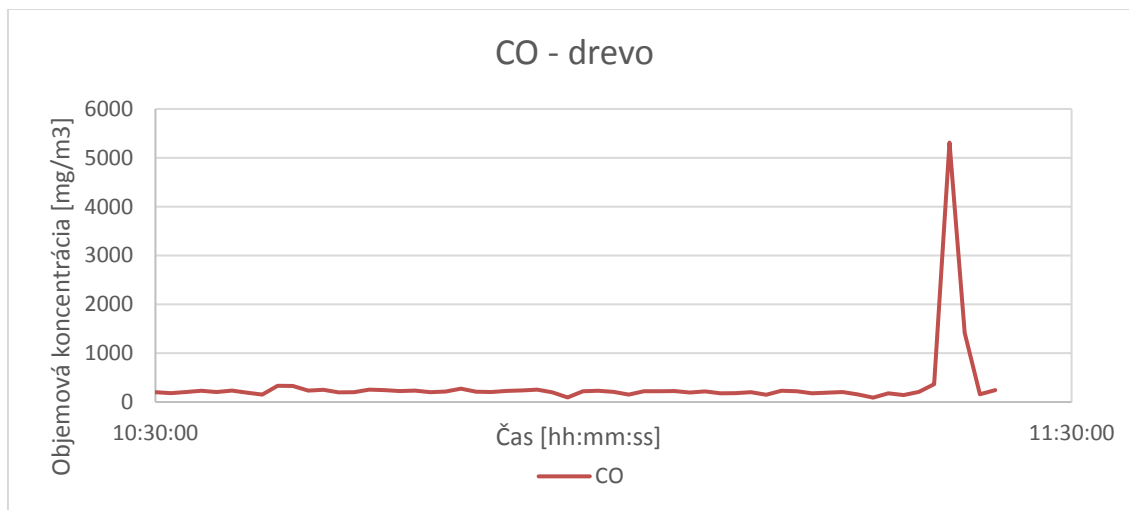
$$\eta_k = 1 - 0,0004005 - 0,0000001081 - 0,00118 - 0,0901 - 0,01$$

$$\eta_k = 0,898$$

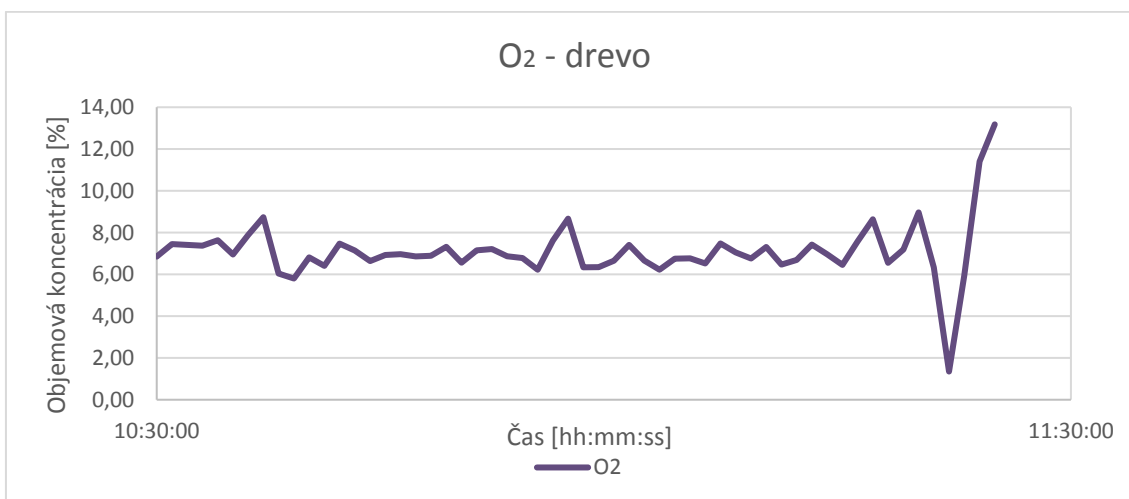
$$\eta_k = 89,8 \%$$



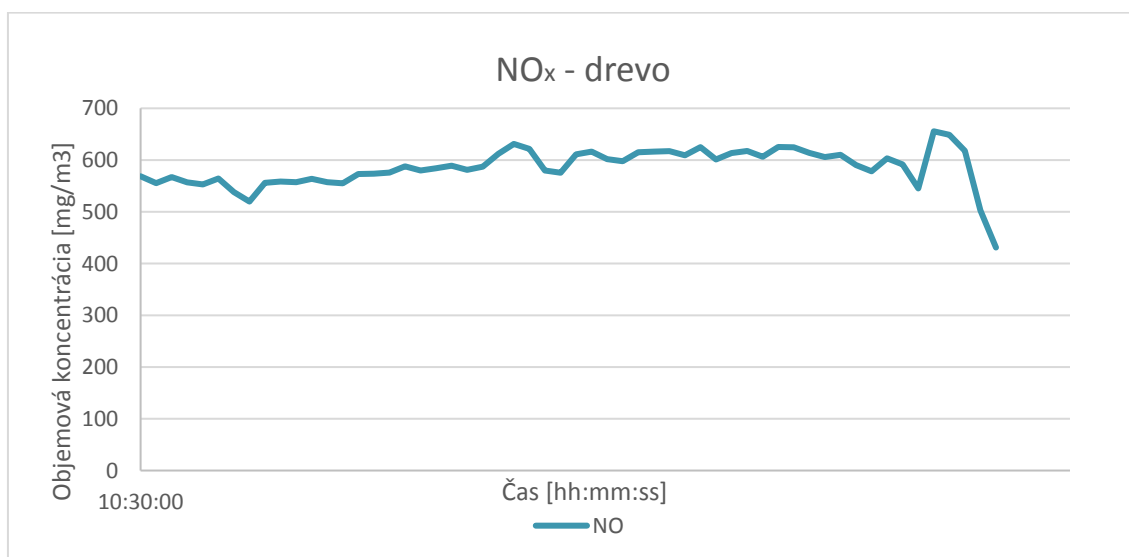
obr. 4.4.1 Teplota spalín – drevo



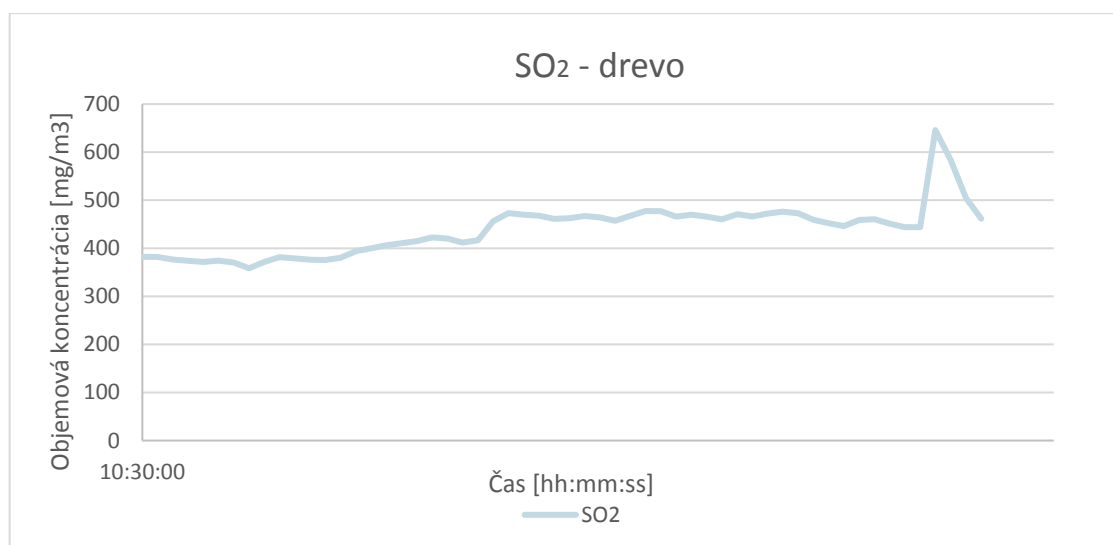
obr. 4.4.2 Objem spalín CO – drevo



obr. 4.4.3 Objem spalín O₂ – drevo



obr. 4.4.4 Objem spalín NO_x – drevo

obr. 4.4.5 Objem spalín SO₂ – drevo

Ako už bolo spomenuté v kapitole 3.3, CO je jedovatý plyn a jeho emisie sa preto kontrolujú veľmi prísne. Medzné hodnoty (tab.4.4.5) závisia podľa normy od emisnej triedy kotla, spôsobu dodávky paliva a jeho menovitého tepelného výkonu. Priemerné koncentrácie spalín sú ďalej uvažované k referenčnej hodnote kyslíka 10 %.

tab. 4.4.5 Medzné hodnoty emisií

Dodávka paliva	Palivo	Menovitý tepelný výkon kW	Medzné hodnoty emisií – CO		
			trieda 3	trieda 4	trieda 5
samočinná	biopalivo	≤ 50 (25)	3000 mg/m ³	1000 mg/m ³	500 mg/m ³

Prepočtový vzťah na prepočet hmotnostných koncentrácií na referenčný obsah O₂

$$C_n^r = \frac{21 - O_{2ref}}{21 - O_{2prev}} \cdot c_p \quad (3.31)$$

$$C_n^r = \frac{21 - 0,1}{21 - 0,0711} \cdot 323,72$$

$$C_n^r = 323,273 \text{ mg/m}^3$$

Keďže hodnota platí nerovnosť $323,273 \text{ mg/m}^3 \leq 3000 \text{ mg/m}^3$, nameraná hmotnostná koncentrácia oxidu uhoľnatého je teda vzhľadom k emisnej triede kotla v poriadku. Podľa normy ČSN EN 305-5 spĺňa koncentrácia CO emisnú triedu 5.

4.5 Tepelná účinnost' kotla pri spaľovaní agropeliet

Palivo agropelie – prosyp Ø10mm, trieda E (nedrewná biomasa)				
čas násypu	interval	plnenie	ventilátor	rošt
11:55	20	3	4	5

tab. 4.5.1 Nastavenie kotla – agropelie

	Hodnota	Jednotka
Vybraný časový úsek experimentu	11:55-12:50	hh:mm
Priemerný prietok vody	1,2119	m ³ .h ⁻¹
Priemerná teplota prívodu vody	83,309	°C
Priemerná teplota spiatočnej vody	59,497	°C
Priemerná teplota spalín	265,388	°C
Priemerná hodnota NO	995,723	mg/m ³
Priemerná hodnota CO	188,81	mg/m ³
Priemerná hodnota O ₂	10,36	%
Priemerná hodnota SO ₂	790,09	mg/m ³

Spalné teplo	18,76 MJ/kg
Výhrevnosť	17,5 MJ/kg
Obsah vody	8,60 hm %
Obsah popola	11,66 hm %
Zloženie: repka, slnečnica, horčica, plevel	

Uhlík C	49,79 hm %
Vodík H	5,74 hm %
Dusík N	2,01 hm %
Síra S	0,10 hm %
Kyslík O	42,36 hm %

tab. 4.5.2 Špecifikácie meranie – agropelie

tab. 4.5.3 Charakteristika paliva – agropelie

Výpočet prebieha rovnakým postupom ako pri predchádzajúcej kapitole, s tými istými rovnicami.

4.5.1 Nepriama metóda výpočtu

Minimálny objem kyslíku potrebný pre dokonalé spálenie 1 kg paliva

$$V_{O_2min} = 22,39 \cdot \left(\frac{C^r}{12,01} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,06} - \frac{O^r}{32} \right)$$

$$V_{O_2min} = 22,39 \cdot \left(\frac{0,4979}{12,01} + \frac{0,0574}{4,032} + \frac{0,0010}{32,06} - \frac{0,4236}{32} \right)$$

$$V_{O_2min} = 0,9513 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Minimálny objem suchého vzduchu potrebný pre dokonalé spálenie 1 kg paliva

$$V_{vzmin}^S = \frac{100 \cdot V_{O_2min}}{21}$$

$$V_{vzmin}^S = \frac{100 \cdot V_{O_2min}}{21}$$

$$V_{vzmin}^S = 4,5299 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Objem vodnej pary v minimálnom objeme vlhkého vzduchu

$$V_{H_2O} = \frac{\varphi}{100} \cdot \frac{p''}{p_c - \frac{\varphi}{100} \cdot p''}$$

$$V_{H_2O} = \frac{70}{100} \cdot \frac{0,002300}{0,101 - \frac{70}{100} \cdot 0,002300}$$

$$V_{H_2O} = 0,01619 [-]$$

Súčiniteľ f

$$f = 1 + V_{H_2O} = 1 + 0,01619 = 1,01619$$

Minimálny objem vlhkého vzduchu potrebný pre dokonalé spálenie 1 kg paliva

$$V_{Vz\ min} = f \cdot V_{Vz\ min}^S$$

$$V_{Vz\ min} = 1,01619 \cdot 4,5299$$

$$V_{Vz\ min} = 4,6032\ m^3/kg$$

Spaliny

$$V_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot C^r + \frac{1}{100} \cdot 0,03 \cdot V_{Vz\ min}^S$$

$$V_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot 0,4979 + \frac{1}{100} \cdot 0,03 \cdot 4,5299$$

$$V_{CO_2} = 0,9242\ m^3/kg$$

$$V_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot S^r$$

$$V_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot 0,001$$

$$V_{SO_2} = 0,0006828\ m^3/kg$$

$$V_{N_2} = \frac{22,40}{28,013} \cdot N_2^r + \frac{1}{100} \cdot 78,05 \cdot V_{Vz\ min}^S$$

$$V_{N_2} = \frac{22,40}{28,013} \cdot 0,0201 + \frac{1}{100} \cdot 78,05 \cdot 4,5299$$

$$V_{N_2} = 3,5517\ m^3/kg$$

$$V_{Ar} = \frac{1}{100} \cdot 0,92 \cdot V_{Vz\ min}^S$$

$$V_{Ar} = \frac{1}{100} \cdot 0,92 \cdot 4,5299$$

$$V_{Ar} = 0,0417 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Objem vodnej pary z horľaviny paliva

$$V_{H_2O}^h = \frac{44,81}{4,032} \cdot H_2^r + \frac{22,41}{18,015} \cdot W^r + (f - 1) \cdot V_{vz_{min}}^s$$

$$V_{H_2O}^h = \frac{44,81}{4,032} \cdot 0,0574 + \frac{22,41}{18,015} \cdot 0,0860 + (1,01619 - 1) \cdot 4,5299$$

$$V_{H_2O}^h = 0,8182 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Minimálny objem suchých spalín

$$V_{sp_{min}}^s = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{Ar}$$

$$V_{sp_{min}}^s = 0,9242 + 0,0006828 + 3,5517 + 0,0417$$

$$V_{sp_{min}}^s = 4,5183 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Minimálny objem vlhkých spalín

$$V_{sp_{min}} = V_{sp_{min}}^s + V_{H_2O}^h$$

$$V_{sp_{min}} = 4,5183 + 0,8182$$

$$V_{sp_{min}} = 5,3365 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Súčiniteľ prebytku vzduchu

$$\alpha = \frac{21}{21 - O_2}$$

$$\alpha = \frac{21}{21 - 10,36}$$

$$\alpha = 1,9737$$

Objem suchých spalín za prebytku vzduchu

$$V_{sp}^s = V_{sp_{min}}^s \cdot \alpha$$

$$V_{sp}^s = 4,5183 \cdot 1,9737$$

$$V_{sp}^s = 8,9178 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Skutočný objem vzduchu

$$V_{vz} = V_{vz_{min}} \cdot \alpha$$

$$V_{vz} = 4,6032 \cdot 1,9737$$

$$V_{vz} = 9,0853 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Skutočný objem spalín

$$V_{sp} = V_{sp_{min}} + (\alpha - 1) \cdot V_{vz_{min}}$$

$$V_{sp} = 5,3365 + (1,9737 - 1) \cdot 4,6032$$

$$V_{sp} = 9,8186 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$(\alpha - 1) \cdot V_{vz_{min}}$ objem spalín z prebytočného vzduchu.

Tepelný obsah spalín

$$I_{sp} = I_{sp_{min}} + (\alpha - 1) \cdot I_{vz_{min}} + I_p$$

$$I_{sp_{min}} = V_{CO_2} \cdot i_{CO_2} + V_{SO_2} \cdot i_{SO_2} + V_{N_2} \cdot i_{N_2} + V_{H_2O} \cdot i_{H_2O} + V_{Ar} \cdot i_{Ar}$$

$$I_{sp_{min}} = 0,9242 \cdot 488,35 + 0,00006828 \cdot 534,7 + 3,517 \cdot 345,83 + 0,8182 \cdot 407,395 + 0,0417 \cdot 246,32$$

$$I_{sp_{min}} = 2011,2558 \text{ kJ/kg}$$

$$I_{vz_{min}} = V_{vz_{min}} \cdot c_{vz} \cdot t_{vz}$$

$$I_{vz_{min}} = 4,6032 \cdot 1,3222 \cdot 20$$

$$I_{vz_{min}} = 121,727$$

$$A^r > \frac{6 \cdot Q_i^r}{41,8 \cdot X_p} \rightarrow 11,66 < \frac{6 \cdot 17,5 \cdot 10^3}{41,8 \cdot 20} = 125,6.$$

Nerovnosť neplatí a teda s tepelným obsahom popolčeka nepočítam.

$$I_{sp} = 2011,2558 + (1,9737 - 1) \cdot 121,727$$

$$I_{sp} = 2129,7814 \text{ kJ/kg}$$

Tepelný obsah vzduchu

$$I_{vz} = I_{vz_{min}} \cdot \alpha$$

$$I_{vz} = 121,727 \cdot 1,9737$$

$$I_{vz} = 240,2526 \text{ kJ/kg}$$

Strata horľavinou v tuhých zvyškoch ξ_{mn}

-zvolené hodnoty popolčeka, strusky a roštového prepadu sú zvolené v inom pomere, kvôli rozdielnym vlastnostiam a rozličnému chovaniu paliva pri spaľovaní

$$\xi_{mn} = \frac{Q_c \cdot A^r}{Q_r^i} \cdot \left(\frac{C_r}{1 - C_r} \cdot X_r + \frac{C_s}{1 - C_s} \cdot X_s + \frac{C_p}{1 - C_p} \cdot X_p \right)$$

$$\xi_{mn} = \frac{32600 \cdot 0,1166}{17,5 \cdot 10^3} \cdot \left(\frac{0,12}{1 - 0,12} \cdot 0,05 + \frac{0,05}{1 - 0,05} \cdot 0,75 + \frac{0,05}{1 - 0,05} \cdot 0,2 \right)$$

$$\xi = 0,01234 [-]$$

Strata fyzickým teplem tuhých zvyškov ξ_f

$$\xi_f = \frac{A^r}{Q_r^i} \cdot \frac{X_i \cdot i_i}{1 - C_i} = \frac{A^r}{Q_r^i} \cdot B$$

$$\xi_f = \frac{0,1166}{17,5 \cdot 10^3} \cdot 0,5$$

$$\xi_f = 0,00333 [-]$$

Strata horľavinou v spalínách ξ_{cn}

$$\omega_{CO} = 146,04 [-]$$

$$\xi_{cn} = (1 - \xi_{mn}) \cdot \frac{V_{sp}^s \cdot (\omega_{CO} \cdot Q_{CO}^r + \omega_{H_2} \cdot Q_{H_2}^r + \omega_{C_xH_y} \cdot Q_{C_xH_y}^r)}{Q_i^r} \cdot 100$$

$$\xi_{cn} = (1 - 0,01234) \cdot \frac{8,9178 \cdot 146,04 \cdot 10^{-6} \cdot 12610}{17,5 \cdot 10^3}$$

$$\xi_{cn} = 0,0009267 [-]$$

Strata fyzickým teplem spalín ξ_k

$$\xi_k = (1 - \xi_{mn}) \cdot \frac{I_{sp} - I_{vz}}{Q_i^r}$$

$$\xi_k = (1 - 0,01234) \cdot \frac{2129,7814 - 240,2526}{17,5 \cdot 10^3}$$

$$\xi_k = 0,1066 [-]$$

Strata zdieľaním tepla do okolia sálaním a vedením ξ_{sv}

$$\xi_{sv} = 0,01$$

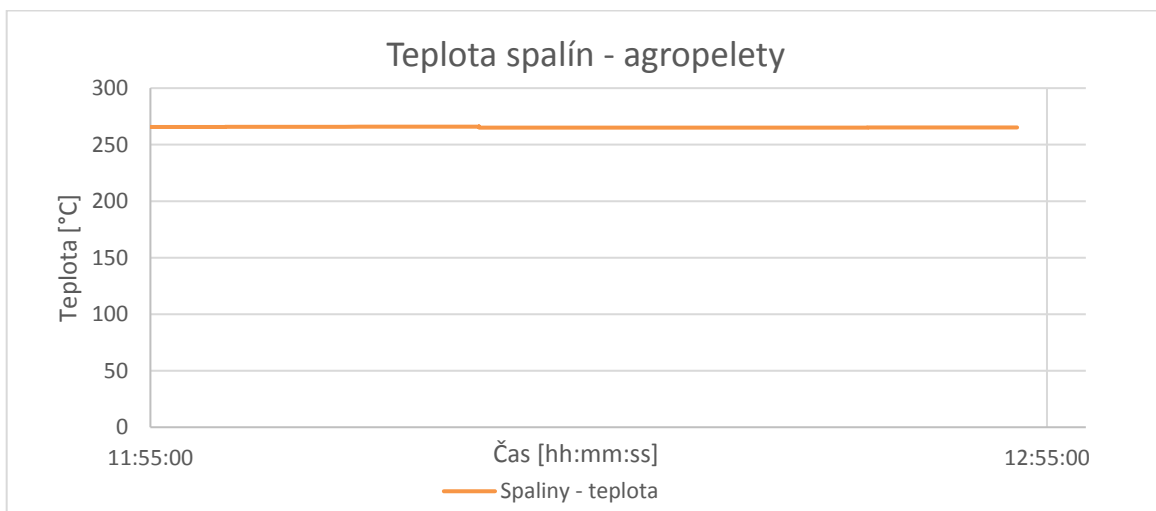
Účinnosť

$$\eta_k = 1 - \sum \xi_i = 1 - \xi_{mn} - \xi_f - \xi_{cn} - \xi_k - \xi_{sv}$$

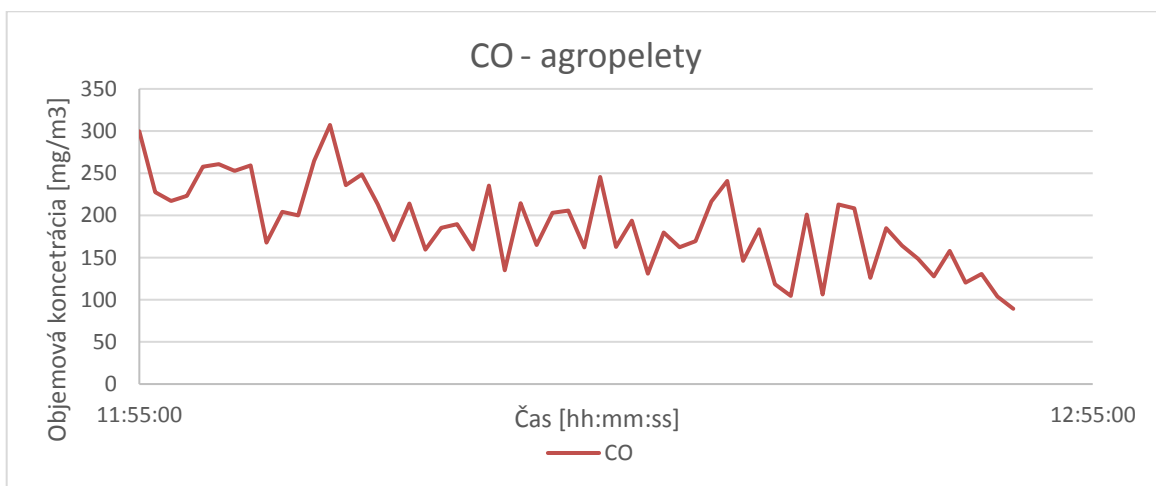
$$\eta_k = 1 - 0,01234 - 0,00333 - 0,0009267 - 0,1066 - 0,01$$

$$\eta_k = 0,868$$

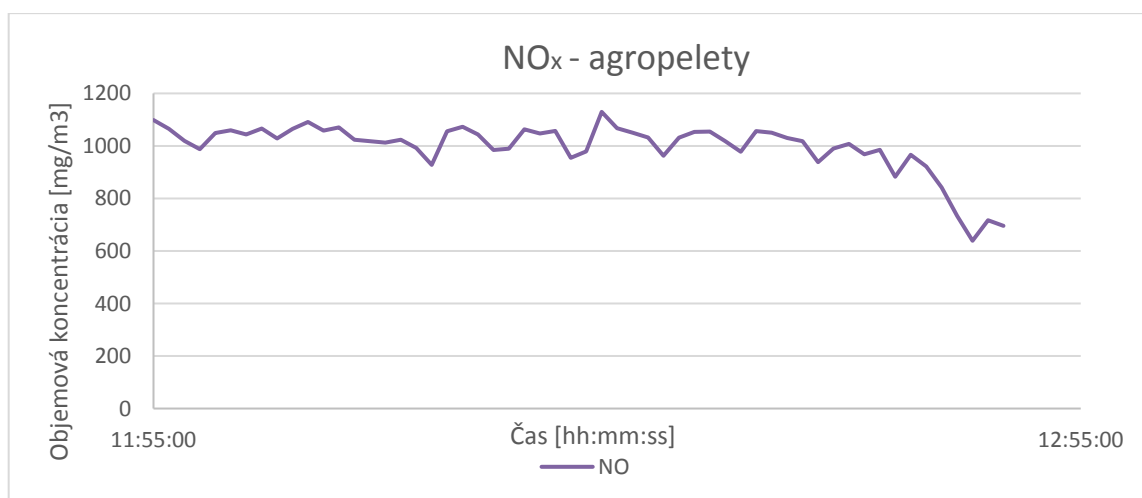
$$\eta_k = 86,8 \%$$



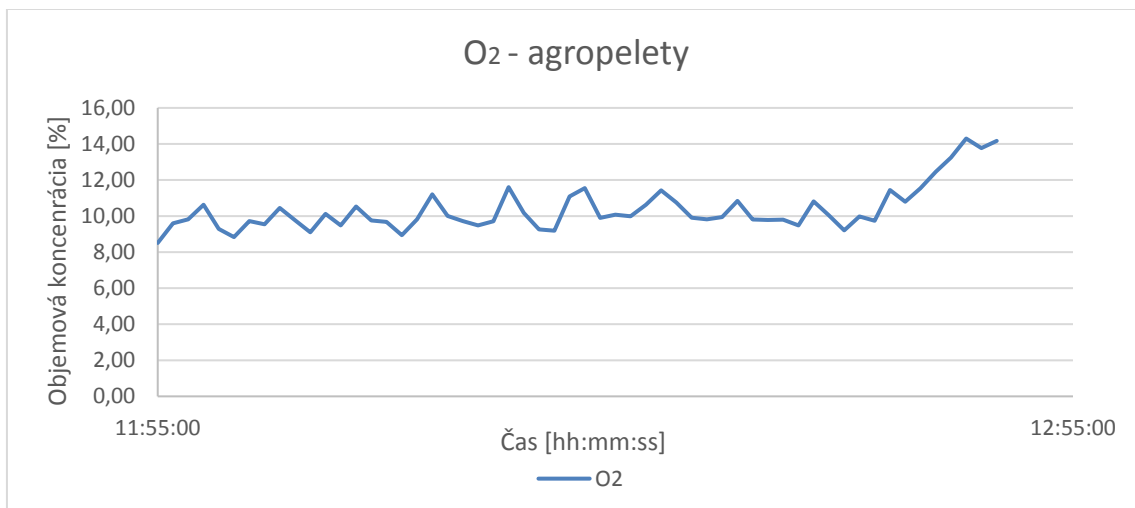
obr. 4.5.1 Teplota spalín – agropelety



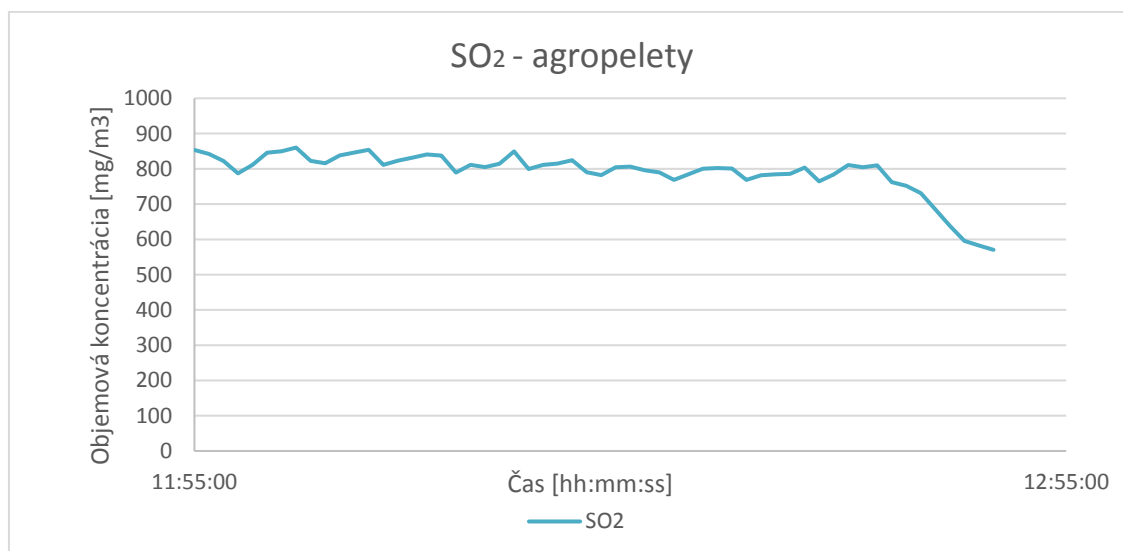
obr. 4.5.2 Objem spalín CO – agropelety



obr. 4.5.3 Objem spalín NO_x – agropelety



obr. 4.5.4 Objem spalín O₂ – agropelety



obr. 4.5.5 Objem spalín SO₂ – agropelety

$$C_n^r = \frac{21 - O_{2ref}}{21 - O_{2prev}} \cdot c_p$$

$$C_n^r = \frac{21 - 0,1}{21 - 0,1036} \cdot 188,81$$

$$C_n^r = 188,84 \text{ mg/m}^3$$

Medzná hodnota oxidu uhoľnatého pre kotol s menovitým tepelným výkonom 25 kW, emisnej triedy 3 a samočinnou dodávkou paliva pri spaľovaní biomasy činí 3000 mg/m³.

Keďže hodnota platí nerovnosť 188,84 mg/m³ ≤ 3000 mg/m³, nameraná hmotnostná koncentrácia CO je teda podľa normy ČSN EN 305-5 v poriadku, dokonca spĺňa triedu 5.

4.6 Vyhodnotenie experimentu

Ako prvý a voľným okom pozorovateľný najväčší rozdiel sa ukázal hneď po skončení experimentu. Pri spaľovaní drevených peliet bol odpad v ohnisku kotla minimálny, keďže išlo o kvalitné pelety triedy A1 s nízkym obsahom popola. Bolo možné pozorovať len zbytky akéhosi prášku, ktorý bez problémov prepadal do zásobníka pod ohniskom. Pri spaľovaní agropeliet, však odpad zostával spečený do veľkého kusu (vid obr. 4.6.1), ktorý sa dal v celku vybrať a pri dlhšej prevádzke kotla by mohol predstavovať vážny problém. Je pravdepodobné, že odpad by narastal, až by mohol upchať otvor pre prívod spaľovacieho vzduchu, alebo otvor kadiaľ prepadáva palivo do ohniska. Spôsob akým tento negatívny dopad zmierniť bolo nastavenie roštu kotla na častejší pohyb, než bol potrebný pri drevených peletách. Spečenie agropeliet mal za následok vyšší obsah popolovín a všeobecne spekavejší popol, ktorý vykazujú hlavne agropelety zo slamy olejovín.

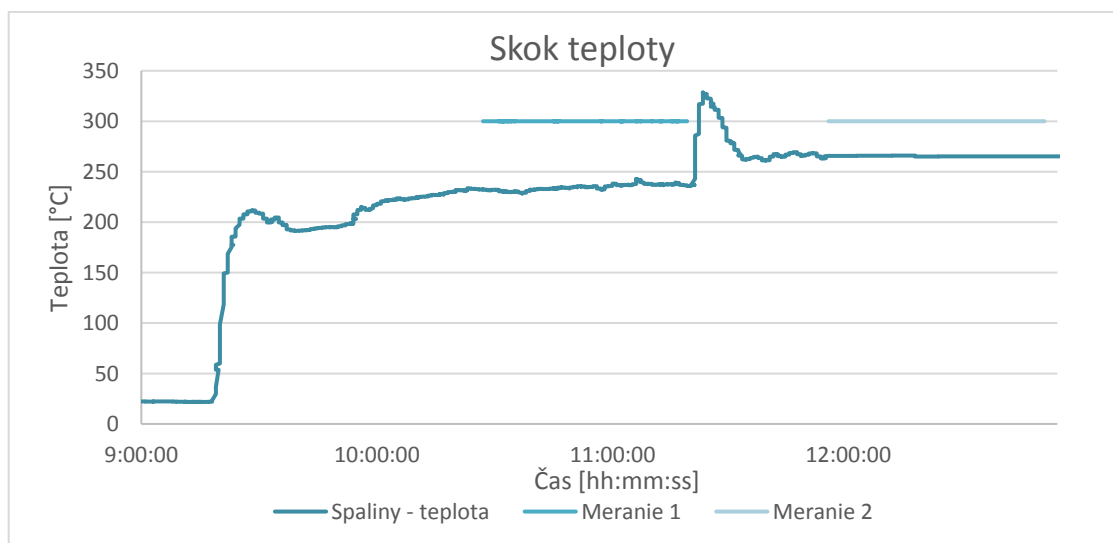


obr. 4.6.1 Spekavosť agropeliet

Interval agropeliet bol nastavený na dlhší čas o štyri minúty, kvôli ich väčšiemu priemeru. Na jedno plnenie sa teda do kotla dostalo viac paliva ako pri drevených peletách a horeli dlhšie. Otáčky sú vyššie o jeden stupeň, pretože hodnota teploty spalín vyskočila príliš vysoko pri rovnakom nastavení ventilátoru ako za predošlého merania (vid obr. 4.6.2).

tab. 4.6.1 Porovnanie nastavenia kotla

	interval [min]	plnenie [min]	ventilátor [ot]	rošt [min^{-1}]
Drevené pelety - $\varnothing 6$ mm	16	3	3	20
Agropelety - $\varnothing 10$ mm	20	3	4	5



obr. 4.6.2 Výstup teploty

Namerané hodnoty NO_x a SO₂ narástli pri agropeletách skoro na dvojnásobok, avšak emisie CO klesli takmer na polovicu. Pokles hodnoty CO je logický, pri tomto spaľovaní bol prítomný vyšší podiel kyslíka o tri percentá. Z hľadiska emisií, ktoré kontroluje norma ČSN EN 305-5, sú pre životné prostredie vhodnejšie agropelety.

tab. 4.6.2 Porovnanie merania spalín

Drevné pelety					Agropelety				
NO	CO	SO ₂	O ₂	Teplota	NO	CO	SO ₂	O ₂	Teplota
mg/m ³			%	°C	mg/m ³			%	°C
586,03	323,27	438,98	7,11	239,89	995,89	188,84	790,23	10,36	265,39

Ďalší rozdiel sa ukázal vo výsledkoch merania teploty spalín, kde sa u drevených peliet pohybuje teplota spalín okolo 240 °C. Pri agropeletách hodnota narástla na teplotu okolo 265 °C, čomu odpovedá aj primeraný nárast najväčšej zo strát – komínovej. Straty celkovo boli vyššie, čo sa podpísalo na účinnosti. V druhom meraní, s „alternatívnou“ verziou peliet, je účinnosť 86,8 %, čo by približne, odpovedalo praxi. Na druhú stranu, pri „klasicknej“ verzii, je výsledok 89,8 % trochu vyšší, než by sa dalo očakávať. Môže to byť následkom toho, že nie všetky potrebné veličiny, boli priamo zmerané pri tomto laboratórnom experimente. Vo výpočte účinnosti rozhodujú naozaj aj malé odchýlky vstupných hodnôt. Zvolené parametre teda mohli byť príliš „ideálne“. Otázkou je, ako moc by sa výsledok líšil, keby výpočty zahŕňali skutočnosť. Predpoklad, že drevené pelety by na tom boli, čo sa týka účinnosti kotla pri ich spaľovaní, naďalej lepšie zostáva. Aj vďaka nižšiemu podielu kyslíka pri spaľovaní, ktorý zmeraný bol a tiež vyššej výhrevnosti, menšiemu obsahu vody i popolovín.

tab. 4.6.3 Porovnanie výsledkov

Straty	Drevné pelety	Agropelety	
horľavinou v tuhých zvyškoch ξ_{mn}	0,0004005	0,01234	[-]
fyzickým teplom tuhých zvyškov ξ_f	0,0000001081	0,00333	
horľavinou v spalínach ξ_{cn}	0,00118	0,0009267	
fyzickým teplom spalín ξ_k	0,0901	0,1066	
zdieľaním tepla do okolia sálaním ξ_{sv}	0,01	0,01	
Účinnosť			
η_k	0,898	0,868	

Vyplýva teda, že agropelety nie sú príliš vhodné na „klasické“ domáce spaľovanie. Sú problémové vzhľadom na samotný spaľovací proces, pri ktorom sa nedokážu spáliť na prach ale pelety zostávajú spečené. A teda sú naozaj vhodné len do kotla navrhnutého pre rastlinnú biomasu. Taktiež dosahujú menšiu účinnosť. Účinnosť je dôležitá aj ako ekonomický parameter a za predpokladu, že rozdiel tri percentá je správny, najviac by sa mohol ukázať v cene využitého paliva za rok. Avšak bez rešerši o cenách oboch palív a kotlov, či zmeranej spotreby resp. hmotnostného toku paliva za hodinu a následného výpočtu ide skôr o nepodložené tvrdenie.

5 Záver

Cieľom tejto práce bola rešerš o dostupných druhoch biomasy a porovnanie účinnosti spaľovacieho zariadenia pri spaľovaní rastlinnej a drevnej biomasy.

- Rešeršná časť sa nachádza v kapitole druhej. Obsahuje stručný popis ako, a z čoho biomasa vzniká. Rozdelenie podľa troch kritérií – pôvod, energetické využitie a vlastnosti. Nasleduje priblíženie palív – charakteristika, typy paliva na ktoré sa môže biomasa spracovať a popis jednotlivých vlastností významných z energetického hľadiska. Rešerš zakončuje porovnanie fytomasy a dendromasy.
- V kapitole tretej sa nachádza popis sústavy, pomocou ktorej sa experiment meral, spolu s popisom jednotlivých zariadení a ich technických parametrov. Táto kapitola sa venuje i výberu z normy ČSN EN 305-5 – zhrnutiu podmienok správneho uskutočnenia pokusu. Tiež zaberá charakteristiku spalín a prečo sa uvažovaná zložka sleduje.
- Štvrtá kapitola je zameraná konkrétne na experiment. Prvé prebehlo spaľovanie drevných peliet, druhé agropeliet. Výsledkom boli dva súbory hodnôt z každého merania. V jednom sa nachádzali údaje o chemickom zložení spalín (koncentrácie jednotlivých zložiek – CO, O₂, NO_x, SO₂, v závislosti na čase). Druhý obsahoval údaje o sústave (taktiež v závislosti na čase), teplotu spalín, teploty v komorách kotla, prietok vody alebo teploty vody v spiatočke a prívide. Pre rovnocennosť prvého i druhého merania sa vybral rovnako dlhý časový úsek a hodnoty sa spriemerovali. Ďalším krokom bolo pristúpiť k výpočtom. Zvolila sa nepriama metóda výpočtu účinnosti. V tejto metóde sa straty odpočítavajú od dokonalej verzie spaľovania – celku, teda 100 %. Vo výsledku sa ukázali straty agropeliet ako o niečo vyššie, okrem tej sálaním tepla do okolia, ktorá bola pre zložitosť a zdĺhavosť výpočtu zvolená rovnako pre oba výpočty a straty horľavinou v spalinách.

- $\Delta\xi_{mn} = 1,194 \%$
- $\Delta\xi_f = 0,333 \%$
- $\Delta\xi_{cn} = -0,025 \%$
- $\Delta\xi_k = 1,650 \%$
- $\Delta\xi_{sv} = 0,000 \%$

Avšak pri pohľade na veľkosť rozdielu pri tejto strate oproti tým zostávajúcim, je logické, že odpoveďou na otázku, ktorá verzia biomasy je účinnejšia, sa stali drevené pelety. Dosiahli hodnotu 89,8 %, čo je hodnota o presne 3 % vyššia ako pri ich súperevi.

Naopak, pri skúmaní chemického nedopalú vyšli ako víťaz pre životné prostredie, z porovnávaní, agropelety. Spaliny obsahovali o 134,43 mg/m³ vyššiu koncentráciu oxidu uhoľnatého, jedovatého a prísne limitovaného plynu. Obe koncentrácie 323,27 mg/m³ pri drevených peletách i 188,84 mg/m³ pri alternatívnej verzii však spĺňajú emisnú triedu normy 5. Z čoho vyplýva, že v očiach zákona sú prakticky rovnocenné.

6 Zoznam použitej literatúry

- [1] Smernica 2003/30/ES Európskeho parlamentu a rady, [online] [cit. 2018-02-20]. Dostupné z: ec.europa.eu/assets/near/neighbourhood-enlargement/ccvista/sk/3200310030-sk.doc
- [2] TRENČIANSKY, M., LIESKOVSKÝ, M., ORAVEC, M.: *Energetické zhodnotenie biomasy*. Zvolen, 2007, ISBN 978-80-80-93-050-9.
- [3] MULLEROVÁ, J., HLOCH, S., VALÍČEK, J., *Zníženie emisií pri spaľovaní biomasy v teplovodnom kotle*. Chemické listy 104, 2010, 876-879 s.
- [4] DZURENDA L.: *Spaľovanie dreva a kôry*. Vydavateľstvo Technickej univerzity vo Zvolene, Zvolen 2005. 124 s. ISBN 80-228-1555-1.
- [5] AGROINŠTITÚT NITRA.: *Ekologické palivo z trávnych porastov*. [online] [cit. 2018-03-10]. Dostupné z: <http://www.agroporadenstvo.sk/index.php?start&t=rastlinna-vyroba-energeticke-rastliny&t2=&article=360>
- [6] STUBA OBNOVITEĽNÉ ZDROJE ENRGIE.: *Energia z biomasy*. [online] [cit. 2018-03-10]. Dostupné z: <http://www.oze.stuba.sk/oze/energia-z-biomasy/>
- [7] JANDAČKA, J., NOSEK, R., KADUCHOVÁ, K., KOLKOVÁ, Z.: *Využitie rastlinnej biomasy v energetike*. Vydavateľstvo Žilina: Juraj Štefuň – GEORG, 2011. 120 s. ISBN XXX-XX-XXXXXX-X-X. Dostupné z: http://www.biomasa-info.sk/docs/Vyuzitie_rastlinnej_biomasy_v_energetike.pdf
- [8] MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU ČR, *Obnovitelné zdroje energie v roce 2016*, [online] [cit. 2018-03-10]. Dostupné z.: <https://www.mpo.cz/cz/energetika/statistika/obnovitelne-zdroje-energie/obnovitelne-zdroje-energie-v-roce-2016--233480/>
- [9] ČESKÁ PELETA, *Normy pre pelety a brikety*. [online] [cit. 2018-03-11]. Dostupné z: <http://www.ceska-peleta.cz/pelety-brikety-drevo/normy-pro-pelety-a-brikety/>
- [10] BIOMASA, *Pelety*. [online] [cit. 2018-03-11]. Dostupné z: <https://biomasa.sk/index.php/pelety>
- [11] ČESKÁ PELETA, *Brikety*. [online] [cit. 2018-03-11]. Dostupné z: <http://www.ceska-peleta.cz/pelety-brikety-drevo/brikety/>
- [12] OCHODEK, T., KOLONIČNÝ, J., JANÁSEK, P., *Potenciál biomasy, druhy, bilance a vlastnosti paliv z biomasy*. Výzkumní energetické centrum, Ostrava 2006. ISBN 80-248-1207-X.

- [13] VERNER, V., *Alternativní pelety*. *Biom.cz* [online]. 2007-12-31 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/alternativni-pelety>. ISSN: 1801-2655.
- [14] TAUŠ, P., *Technológie využívania biomasy*. *OZE* [online] [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://centrum-oze.webnode.sk/nas-tim/doc-ing-peter-taus-phd/technologie-vyuzivania-biomasy/podklady-k-prednaskam/>
- [15] DZURENDA, L., SLOVÁK, J. *Energetické vlastnosti peliet vyrobených zo smrekovej piliny*. *Acta Mechanica Slovaca*, 3, 2001, s. 201 – 206.
- [16] SIMS, R., *The Brilliance of Bioenergy: In business and in practice*. Vydavateľstvo Routledge, 2002. 328 s. ISBN 978-1849710695.
- [17] ETA, *Biomasa*. [online] [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <http://www.etaenergy.eu/sk/biomasa/>
- [18] PETROLEUM, *Výhrevnosť* [online] [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/slovník.aspx?pid=117>
- [19] JANDAČKA, J., MALCHO, J., MIKULÍK, M., *Biomasa ako zdroj energie. Potenciál, druhy, bilancia a vlastnosti palív. (Štúdia)*, Vydavateľstvo Juraj Štefúň-GEORG, Žilina, 2007. ISBN 978-80-969161-3-9.
- [20] ZELENÁ BIOMASA, *Pelety a brikety*. [online] [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <http://www.zelenabiomasa.cz/produkty/pelety-brikety>
- [21] CONTECHIN s.r.o., *Linky na výrobu pelet/briket*. [online] [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <http://www.contechin.eu/13621/linky-na-vyrobu-pelet-briket/>
- [22] RURALKING, *Hardwood wood pellet fuel*. [online] [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <https://www.ruralking.com/hardwood-wood-pellet-fuel-40lb.html>
- [23] ETA, *Energie*. [online] [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <http://www.etaenergy.eu/public/data/novinky/vyber/415.jpg>
- [24] VERNER, *Kotel VERNER A251*. [online] [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <http://www.kotle-verner.cz/produkty/automaticke-kotle/verner-a251>
- [25] FLOMAG, *Flomag 3000*. [online] [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <http://www.flomag.cz/en/prutokomery/prevodniky/flomag-3000>
- [26] DANFOSS, *Spájkované tepelné výmenníky*. [online] [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <http://products.danfoss.sk/productrange/heatingsolutions/rozsah-doskovych-tepelnych-vymennikov/spajkovane-tepelne-vymenniky-1-prechodove/#/>
- [27] VERNER, *Projekční podklady pro automatické kotle Verner*. [online] [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/9183618-Projekcni-podklady-pro-automaticke-kotle-verner-a251-a-a501.html>

- [28] TZB, *Automatické kotle pro pelety*. [online] [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/docu/clanky/0109/010975o1.jpg>
- [29] A-MATRIX, *Magentic flowmeter*. [online] [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: http://www.a-matrix.com/index.php?id_product=487&controller=product
- [30] SWEP, *Products*. [online] [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <https://www.swep.net/products/>
- [31] VALVE ACTUATOR WAREHOUSE, *Belimo*. [online] [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: http://www.valve-actuator-warehouse.com/Belimo_B317LRB24-SR.aspx
- [32] BAHAMA-MARKET, *Grundfos UPS 25-60 180mm obehové čerpadlo*. [online] [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <https://im9.cz/iR/importprodukt-orig/567/567cafb6ff34078d86fa1dc39c64262b--mmf250x250.jpg>
- [33] LYČKA, Z., *Dřevní peleta II spalování v malých zdrojích tepla*. Vydavatelství LING, Krnov, 2011, 71 s. ISBN 978-80-904914-1-0.
- [34] PAVELEK, M., a kol., *Termomechanika*, Akademické vydavatelství CERM, 2011, 192 s. ISBN 978-80-214-4300-6.
- [35] BALÁŠ, M. *Kotle a výměníky tepla*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 203, 119 s. ISBN 978-80-214-4770-7 (brož.).
- [36] DLOUHÝ, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. Vyd. 2. přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002, 212 s. ISBN 80-01-02591-8.
- [37] ČSN 303-05. *Kotle pro ústřední vytápění*. Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [38] BALÁŠ, M., *Spalovací zařízení a výměníky tepla: 07. Tepelná účinnost a ztráty kotle*. [online]. Brno: FSI VUT v Brně, Energetický ústav Odbor termomechaniky a techniky prostředí.

7 Zoznam symbolov a použitých skratiek

A^f	(-)	obsah popolovín v palive
B	(-)	konštanta strát
C_i	(-)	obsah uhlíku v uvažovanom druhu tuhých zvyškov
C^f	(kg.kg ⁻¹)	obsah uhlíku vo vzorke
c	(kJ.kg ⁻¹ .°C ⁻¹)	Merná tepelná kapacita
c_{vz}	(kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	Merná tepelná kapacita vzduchu pri teplote vzduchu
c_{w1}, c_{w2}	(kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	merná tepelná kapacita vody na vstupe a výstupe kotla
f	(-)	Súčiniteľ pomerného zväčšenia objemu suchého vzduchu o objem vodnej pary pri danej relatívnej vlhkosti
f_i	(-)	súčiniteľ na prevod jednotiek uvažovaného druhu spalín
H^f	(kg.kg ⁻¹)	obsah vodíku vo vzorke
i_i	(kJ.kg ⁻¹)	merná entalpia tuhých zvyškov
I_p	(kJ.kg ⁻¹)	tepelný obsah (entalpia) popolčeka
I_{sp}	(kJ.kg ⁻¹)	tepelný obsah (entalpia) spalín
$I_{sp\ min}$	(kJ.kg ⁻¹)	tepelný obsah (entalpia) spalín bez prebytku vzduchu
I_{vz}	(kJ.kg ⁻¹)	tepelný obsah (entalpia) vzduchu
$I_{vz\ min}$	(kJ.kg ⁻¹)	tepelný obsah (entalpia) vzduchu bez prebytku vzduchu
i_{w1}, i_{w2}	(kJ.kg ⁻¹)	merná entalpia vody na vstupe a výstupe kotla
m	(kg)	hmotnosť
M_A	(kg)	hmotnosť popola po spálení a žíhaní
M_o	(kg)	konštantná hmotnosť vysušenej vzorky
m_o	(kg)	hmotnosť sušiny paliva
M_{pv}	(kg.s ⁻¹)	hmotnostný tok paliva
M_w	(kg.s ⁻¹)	hmotnostný tok vody
m_w	(kg)	hmotnosť vlhkého paliva
N^f	(kg.kg ⁻¹)	obsah dusíku vo vzorke
OGC		organicky viazaný uhlík
p''	(MPa)	parciálny tlak vodnej pary na hranici sýtosti
p_c	(MPa)	celkový absolútny tlak vlhkého vzduchu
Q_c	(kJ.kg ⁻¹)	výhrevnosť uhlíku
Q_i^f	(kJ.kg ⁻¹)	výhrevnosť paliva
Q_s	(kJ.kg ⁻¹)	spalné teplo
S^f	(kg.kg ⁻¹)	obsah síry vo vzorke
t_i	(°C)	teplota uvažovaného druhu spalín
t_{sp}	(°C)	teplota spalín opúšťajúcich kotol
t_{vz}	(°C)	teplota okolitého vzduchu
t_{w1}, t_{w2}	(°C)	teplota vody na vstupe a výstupe kotla
V	(m ³)	objem
V_i	(m ³ .kg ⁻¹)	objem i-té zložky v spalínach
$V_{H_2O}^h$	(m ³ .kg ⁻¹)	vodná para z horľaviny paliva
$V_{O_2\ min}$	(m ³ .kg ⁻¹)	minimálny objem kyslíka
V_{sp}^s	(m ³ .kg ⁻¹)	skutočný objem suchých spalín
V_{sp}	(m ³ .kg ⁻¹)	skutočný objem vlhkých spalín
$V_{sp\ min}^s$	(m ³ .kg ⁻¹)	minimálny teoretický objem suchých spalín
$V_{sp\ min}$	(m ³ .kg ⁻¹)	minimálny teoretický objem vlhkých spalín
V_{vz}	(m ³ .kg ⁻¹)	skutočný objem vlhkého vzduchu

V_{vzmin}^S	$(m^3.kg^{-1})$	minimálna objemová potreba suchého vzduchu
V_{vzmin}	$(m^3.kg^{-1})$	minimálna objemová potreba vlhkého vzduchu
\dot{V}_w	$(m^3.h^{-1})$	objemový tok vody kotlom
W^r	(-)	obsah vody v palive
X_i	(-)	podiel popola
α	(-)	súčiniteľ prebytku vzduchu
η_k	(-)	účinnosť kotla
ξ_{mn}	(-)	strata mechanickým nedopalom
ξ_f	(-)	strata fyzickým teplom tuhých zvyškov
ξ_{cn}	(-)	strata chemickým nedopalom
ξ_k	(-)	komínová strata
ξ_{sv}	(-)	strata zdieľaním tepla do okolia
ρ_w	$(kg.m^{-3})$	hustota vody
ω_i	(m^3/m^3)	objemové koncentrácie plynu na 1 m ³ suchého vzduchu

8 Zoznam obrázkov

obr. 2.2.1 Zdroje biomasy [7].....	17
obr. 2.3.1 Pelety [21]	19
obr. 2.3.2 Brikety [22]	19
obr. 2.3.3 Štiepka [23]	19
obr. 2.3.4 Kusové drevo [23].....	19
obr. 2.3.5 Vyrobená elektrina z biomasy v Českej republike za rok 2016 [8].....	20
obr. 2.3.6 Tepelná energia z biomasy v Českej republike za rok 2016 [8]	20
obr. 3.2.1 Schéma experimentu.....	27
obr. 3.2.2 Kotel Verner [28].....	28
obr. 3.2.3 Zostava jednotlivých častí kotla [27]	29
obr. 3.2.4 Časti mraziaceho boxu	30
obr. 3.2.5 Analyzátory spalín	30
obr. 3.2.6 Prietokomer [29]	31
obr. 3.2.7 Výmenník [30]	31
obr. 3.2.8 Ventil so servom [31].....	32
obr. 3.2.9 Čerpadlo [32]	32
obr. 4.4.1 Teplota spalín – drevo.....	41
obr. 4.4.2 Objem spalín CO - drevo	42
obr. 4.4.3 Objem spalín O ₂ – drevo.....	42
obr. 4.4.4 Objem spalín NO _x – drevo	42
obr. 4.4.5 Objem spalín SO ₂ – drevo.....	43
obr. 4.5.1 Teplota spalín – agropelety	49
obr. 4.5.2 Objem spalín CO - agropelety	49
obr. 4.5.3 Objem spalín NO _x - agropelety	49
obr. 4.5.4 Objem spalín O ₂ – agropelety	50
obr. 4.5.5 Objem spalín SO ₂ – agropelety.....	50
obr. 4.6.1 Spékavosť agropeliet.....	51
obr. 4.6.2 Výstup teloty.....	51

9 Zoznam tabuliek

tab. 2.3.1 Podiel popolovín v biopalivách [19]	22
tab. 2.3.2 Príklady hustoty a vlhkosti jednotlivých druhov [16].....	24
tab. 3.2.1 Technické parametre kotla	28
tab. 3.2.2 Technické parametre Ultramat 21	30
tab. 3.2.3 Technické parametre Ultramat 22	31
tab. 3.2.4 Tech. parametre Flomag 3000.....	31
tab. 3.2.5 Technické parametre výmenník	31
tab. 3.2.6 Technické parametre servo	32
tab. 3.2.7 Technické parametre čerpadlo	32
tab. 4.4.1 Nastavenie kotla - drevo.....	36
tab. 4.4.2 Charakteristika – drevo	36
tab. 4.4.3 Špecifikácie meranie – drevo	36
tab. 4.4.4 Konštanta strát [38]	40
tab. 4.5.1 Nastavenie kotla - agropelety	44
tab. 4.5.2 Špecifikácie meranie – agropelety	44
tab. 4.5.3 Charakteristika paliva - agropelety	44
tab. 4.6.1 Porovnanie nastavenia kotla.....	51
tab. 4.6.2 Porovnanie merania spalín	52
tab. 4.6.3 Porovnanie výsledkov	52