



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**POROVNÁNÍ METOD URČOVÁNÍ VÝHŘEVNOSTI A
SPALNÉHO TEPLA**

COMPARISON OF METHODS OF DETERMINATION OF LHV AND HHV

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Jahn

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Jiří Jahn
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.
Akademický rok:	2018/19

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

Porovnání metod určování výhřevnosti a spalného tepla

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Spalné teplo a výhřevnost patří mezi základní vlastnosti tuhých paliv, které jasně určují energetickou kvalitu paliva. Současně jsou spalné teplo a výhřevnost závislé na vlhkosti a prvkovém složení paliva. Práce se zabývá hledáním možností určování spalného tepla a výhřevnosti. Práce je experimentální a výpočetní, kdy budou v laboratoři určeny spalná tepla kalorimetrickou metodou, dopočítána výhřevnost. Následně budou spalné teplo a výhřevnost určeny z prvkového složení analyzovaných paliv.

Cíle bakalářské práce:

- souhrn metodiky určování spalného tepla a výhřevnosti tuhých paliv
- rešerše možností určení výhřevnosti z prvkového rozboru
- laboratorní určení spalného tepla a výhřevnosti vybraných tuhých paliv

Seznam doporučené literatury:

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

ČSN EN ISO 18125. Tuhá biopaliva - Stanovení spalného tepla a výhřevnosti. Praha: český normalizační institut, 2017.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřená na porovnání přesnosti určování spalného tepla a výhřevnosti za pomoci rovnic. Výpočet vychází z obsahů vzorků v palivu, tedy z dat získaných prvkovým rozbořem. Hodnota spalného tepla a výhřevnosti jednotlivých druhů paliv byla získána měřením na kalorimetru a považována za přesnou hodnotu u daného paliva. Výstupem práce je vyhodnocení vhodnosti a přesnosti prověřovaných rovnic a uvedení rovnic vhodných pro biomasu.

Klíčová slova

Spalné teplo
Výhřevnost
Prvkový rozbor
Hrubý rozbor
Biomasa

ABSTRACT

This bachelor thesis is focused on the comparison of the accuracy of the determine of the higher heating value and lower heating value using the equations. The calculation is based on the contents of samples in the fuel, ie from the data obtained by ultimate analysis. Higher heating value and lower heating value of each fuel type was obtained by calorimeter measurement and considered to be the exact value of the fuel. The output of the work is the evaluation of suitability and accuracy of the examined equations and introduction equations appropriate for biomass.

Key words

Higher heating value
Lower heating value
Ultimate analysis
Proximate analysis
Biomass

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JAHN, Jiří. Porovnání metod určování výhřevnosti a spalného tepla [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116608>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Porovnání metod určování výhřevnosti a spalného tepla vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce.

OBSAH

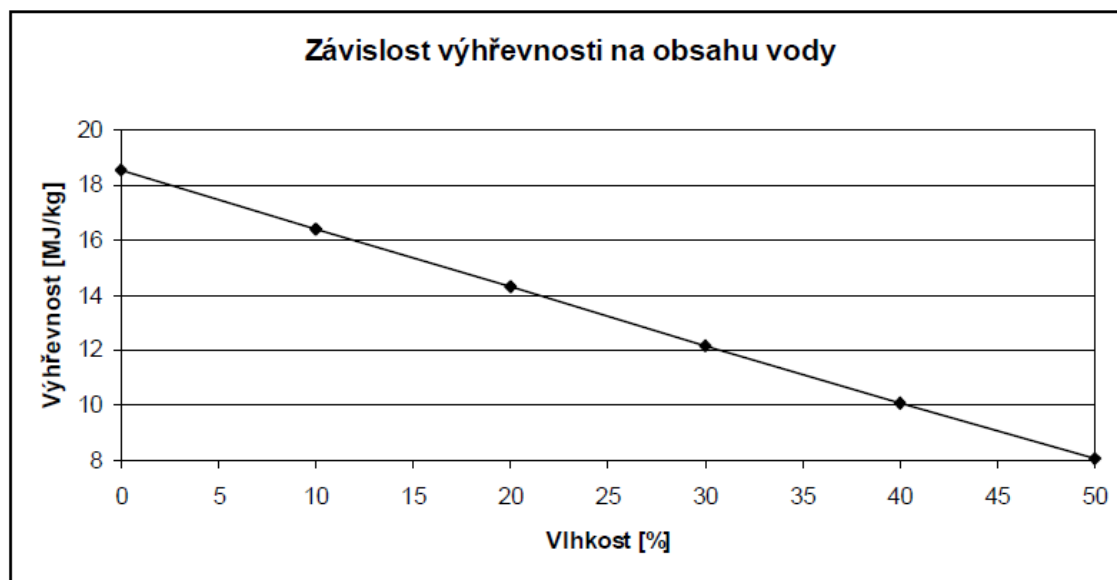
ÚVOD.....	11
1 DĚLENÍ PALIV A VYUŽITÍ BIOMASY	13
1.1 Rozdělení tuhých paliv	13
1.2 Využití biomasy	13
2 KALORIMETRICKÁ METODA	15
2.1 Definice metody	15
2.2 Rozdělení kalorimetrů.....	15
2.3 Popis částí kalorimetru.....	16
3 PRVKOVÝ ROZBOR.....	18
3.1 Definice prvkového rozboru	18
3.2 Stanovení vodíku, uhlíku a dusíku.....	18
3.3 Stanovení dusíku.....	19
3.4 Stanovení síry	19
3.5 Stanovení veškeré síry	20
3.6 Stanovení kyslíku.....	20
4 VÝPOČET SPALNÉHO TEPLA A VÝHŘEVNOSTI Z PRVKOVÉHO ROZBORU ..	21
4.1 Vzorce – česká literatura.....	21
4.2 Vzorce – celosvětová literatura.....	23
5 HRUBÝ ROZBOR.....	24
5.1 Obsah vody	24
5.2 Obsah popelovin	25
5.3 Obsah hořlaviny	26
5.4 Vzorce pro výpočet spalného tepla z hrubého rozboru.....	27
6 PRAKTICKÁ ČÁST	28
6.1 Postup měření	28
6.2 Výsledky měření	31
6.3 Vyhodnocení výsledků z prvkového rozboru	33
6.3.1 Četnost přesných výsledků.....	33
6.3.2 Vyhodnocení pomocí přímky lineární regrese.....	34
6.3.3 Úprava dalších rovnic	37
6.3.4 Sloupcové grafy	39
6.4 Vyhodnocení hrubého rozboru	40
ZÁVĚR.....	41
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	42
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	44
SEZNAM OBRÁZKŮ	45
SEZNAM TABULEK	46
SEZNAM PŘÍLOH	47

ÚVOD

Jedním z největších globálních problémů dnešní doby je celosvětová energetická krize, která je převážně přisuzována rychlému světovému čerpání fosilních paliv. Se snahou vyřešení této situace mnoho států podporuje využívání alternativních obnovitelných zdrojů energie, jako je zemědělský odpad a další druhy biomasy, pro výrobu tepla a elektrické energie. Hlavní výhodou takovýchto paliv, jako je zemědělský odpad, je především obnovitelnost zdroje a také téměř nulové náklady na jejich získání. Pro spalovny biomasy nebo odpadních paliv je velmi důležité znát základní vlastnosti použitého paliva, jako jsou obsah vlhkosti, výhřevnost, obsah popele, elementární rozbor aj. Jednou z nejdůležitějších vlastností paliv je spalné teplo, resp. výhřevnost. Hodnoty těchto vlastností lze určit různými metodami. Základní metodou pro určení spalného tepla je kalorimetrická metoda, která se řídí normou ČSN ISO 1928. Použití kalorimetru je relativně jednoduché a přesné, ale ne pro všechny dostupné. Proto je snaha o vytvoření empirických vztahů pro výpočet spalného tepla a výhřevnosti s použitím hodnot známých z prvkového, nebo hrubého rozboru. [1]

Tato práce se tedy zabývá porovnáním výsledků hodnot získaných kalorimetrickou metodou a metodou výpočtu výhřevnosti z prvkového rozboru. Měřeno bylo 14 vzorků biologického původu. Při vyhledávání informací jsem narazil na problematiku určování výhřevnosti z hrubého rozboru, a tak jsem se rozhodl tuto metodu zahrnout také do mé bakalářské práce. Výhodou metody určování z hrubého rozboru může být, že získání hodnot z prvkového rozboru je složitější a náročnější na vybavení s porovnáním s hrubým rozbořem, který je jednodušší na provedení, a tak je tato metoda praktičtější z hlediska dostupnosti.

Jak už bylo výše uvedeno, spalné teplo a výhřevnost jsou nejdůležitějšími vlastnostmi z pohledu energetického. Výhřevnost je úzce spjata s obsahem vody v palivu, což znázorňuje obr. 0.1, kde je tato závislost vyjádřena grafem. Cílem je tedy dosáhnout co nejmenšího obsahu vody v palivu. Z grafu je vidět, že palivo s 50% obsahem vlhkosti má poloviční výhřevnost oproti palivu zcela vysušeném. Proto je velmi neekonomické spalovat paliva s vyšším obsahem vlhkosti.[2]



Obr. 0.1: Závislost výhřevnosti na obsahu vody [3].

Je tedy snaha o co nejdokonalejší vysušení biomasy před spálením. Některé bioplynové stanice tedy dosušují biomasu uměle za pomoci zbytkového tepla z kogenerace. Vlhký materiál je navezen na určené místo, kde jsou v podlaze rošty pro přívod teplého vzduchu. Takto vysušený materiál má mnohem vyšší výhřevnost a to s téměř nulovými náklady. [2]

Vlhkost je tedy důležitou veličinou paliva a určuje nám kvalitu procesu hoření. Jak bylo již výše uvedeno, vlhkost v palivu nám negativně ovlivňuje výhřevnost, ale ovlivňuje i další vlastnosti, například schopnost hoření. S velmi nízkou vlhkostí zase vzniká riziko samovznícení.

Při určování vlhkosti se v různých odvětvích průmyslu může lišit vzorec pro výpočet.

- V dřevozpracujícím průmyslu se obsah vody vztahuje k suchému vzorku.

$$w_d = \frac{m_p - m_o}{m_o} * 100 \quad [\%] \quad (1)$$

m_p – původní váha vzorku

m_o – váha vysušeného vzorku

- V energetické praxi se obsah vody vztahuje k hmotnosti původního vzorku.

$$w_e = \frac{m_p - m_o}{m_p} * 100 \quad [\%] \quad (2)$$

V konkrétním případě, kdy váha původního vzorku jsou 2 kg a po vysušení jeho hmotnost klesne na 1 kg, je vlhkost podle vzorce z dřevařského průmyslu 100 %, zatímco pro stejný příklad vzorku je vlhkost podle vzorce z energetického odvětví 50 %. [3]

Spalné teplo Q_s je teplo uvolněné dokonalým spálením vzorku paliva a zchlazením vzniklých spalin na původní teplotu; přitom veškerá voda obsažená v analytickém vzorku zůstane v kapalně fázi a zároveň zkondenzuje vodní pára vzniklá spálením vodíku obsaženého v hořlavině. [4]

Výhřevnost Q_i je teplo uvolněné dokonalým spálením vzorku paliva a zchlazením vzniklých spalin na původní teplotu, přičemž se však předpokládá, že voda z paliva i spáleného vodíku zůstane v plynné fázi; výhřevnost je tedy rovna spalnému teplu bez výparného tepla vody z paliva a spáleného vodíku. [4]

Zde je uveden vzorec pro výpočet výhřevnosti ze známé hodnoty spalného tepla [5]:

$$Q_i^r = Q_s - r * (W^r + 8,94 * H_2) \quad (3)$$

Q_i^r - hodnota výhřevnosti paliva [MJ/kg]

Q_s - hodnota spalného tepla [MJ/kg]

r - hodnota výparného tepla vody [MJ/kg]

W^r - obsah vody v palivu [%]

H_2 - obsah vodíku v surovém palivu [%]

1 DĚLENÍ PALIV A VYUŽITÍ BIOMASY

1.1 Rozdělení tuhých paliv

Paliva lze rozdělit např. podle skupenství na plynná, kapalná a tuhá. Základním tuhým palivem je uhlí (černé, hnědé) a jeho upravené formy (brikety, koks), dalšími předními tuhými palivy v dnešní době jsou dřevní i bylinná biomasa. [5]

Tuhá paliva lze rozdělit takto:

- Uhlí - uhlí lze rozdělit podle geologického stáří, platí také čím starší uhlí je, tím vyšší podíl uhlíku obsahuje a obvykle má vyšší výhřevnost
- Umělá uhelná paliva – paliva vyrobená z uhlí (koks – karbonizací, brikety – lisováním rozemletého uhlí)
- Biomasa – Je to veškerá hmota organického původu, patří mezi obnovitelné zdroje energie. Základní rozdělení biomasy je na rostlinného a živočišného původu. Dále se dá dělit dle způsobu získávání na odpadní a záměrně získávanou biomasu.
Pokud hovoříme u biomasy o výhřevnosti, spalném teple, složení atd., je velmi důležité vztáhnout tyto hodnoty k množství vlhkosti, neboť obsah vlhkosti v biomase velmi kolísá v závislosti na druhu, ale také způsobu uskladnění, stáří atd.
- Odpadní paliva – Tato paliva se spalují buď samostatně, nebo jako přídatná paliva k základním palivům. Dělí se na komunální (domovní a živnostenské) a na průmyslové odpady (odpad z textilního, papírenského a dalších průmyslů, odpad čistíren a odpadních vod). Tyto paliva mají často vyšší výhřevnost než hnědá uhlí, ovšem při jejich špatném režimu spalování mohou vznikat toxické látky. [5]

1.2 Využití biomasy

Mezi obnovitelnými zdroji energie (dále OZE) má biomasa v České Republice největší zastoupení, co se týče výroby energie. Více než 80 % energií získaných z OZE je zásluhou spalování různých druhů biomasy. Bioenergetika zahrnuje především výrobu elektřiny, tepla nebo pohonných hmot ve formě pevné biomasy, bioplynu nebo kapalných biopaliv. Součástí bioenergetiky je také zpracování bioodpadů a jejich využití pro výrobu energie nebo hnojiv. [6]

- Pevná biomasa se uplatňuje ve formě ušlechtilých paliv (pelety, brikety) převážně ve vytápění domů, nebo ve formě průmyslových paliv (dřevní štěpka, sláma, zemědělské zbytky) v elektroenergetice nebo kombinované výrobě elektřiny a tepla.

- Bioplyn je produkován v bioplynových stanicích (BSP) a slouží k výrobě elektřiny, tepla nebo výrobě biometanu. Nejrozšířenějšími typy v ČR jsou BPS komunální instalované na čistírnách odpadních vod a BPS zemědělské, které využívají kukuřičnou siláž, travní senáž nebo zemědělské zbytky.
- Kapalná biopaliva se v ČR přimíchávají k běžným motorovým palivům. Bioetanol v max. 5 % do automobilových benzinů a bionafta v max. 7 % do nafty. Také je možné využít vysokoprocentní biopaliva na bázi etanolu (E85) nebo bionafty (SMN30, B100).

Z pohledu zdrojů lze energetickou biomasu primárně získávat na zemědělské půdě z rostlin (fytomasa) a rychle rostoucích dřevin nebo ze stromů na lesní půdě (dendromasa). Obrovský potenciál biomasy vzniká ze sekundárních zdrojů (zbytky z dřevozpracujícího nebo papírenského průmyslu, zbytky z výroby kapalných biopaliv, biologicky rozložitelné odpady, zvířecí exkrementy, kaly z ČOV, apod.). To všechno je biomasa, kterou lze různými způsoby využívat, a to nejen v energetice. [6]

2 KALORIMETRICKÁ METODA

2.1 Definice metody

Kalorimetrickou metodou nazýváme experimentální určování spalného tepla vzorku materiálu. Provedení měření se řídí normou ČSN ISO 1928 (norma pro určování spalného tepla tuhých paliv) a ČSN EN ISO 18125 (pro biopaliva).

Metoda je založena na spálení připraveného a naváženého vzorku materiálu v kalorimetru. Vzorek je spalován v tlakové nádobě naplněné kyslíkem do tlaku okolo 3 MPa. Kalorimetr průběžně během procesu spalování měří teplotu vody v kalorimetru. Nejprve je však potřeba určit tzv. efektivní tepelnou kapacitu kalorimetru. Ta se stanovuje kalibrační zkouškou, spálením certifikované kyseliny benzoové. Kyselina benzoová je k dostání ve formě tablet. Tabletů je nutné před zkouškou zvážit s co nejlepší přesností. Výsledná hodnota spalného tepla měřeného vzorku se určuje na základě naměřených teplot během procesu, efektivní tepelné kapacity kalorimetru a dalších energetických přídavek ze spálení např. zapalovacího bavlněného vlákna a tepelných účinků z chemických reakcí, jako je vznik kyseliny dusičné. [7]

První ledové kalorimetry byly postaveny na základě konceptu Josefa Blacka o latentním teple, který byl představen v roce 1761. Antoine Lavoisier vytvořil termín kalorimetr v roce 1780, aby popsal přístroj, který používal k měření tepla ze vzduchu z dýchání morčat, který rozpouštěl sněh. V roce 1782 Lavoisier a Pierre-Simon Laplace experimentovali s kalorimetry na bázi ledu, ve kterých by bylo možné použít teplo potřebné k roztavení ledu pro měření tepla z chemických reakcí. [8]

2.2 Rozdělení kalorimetrů

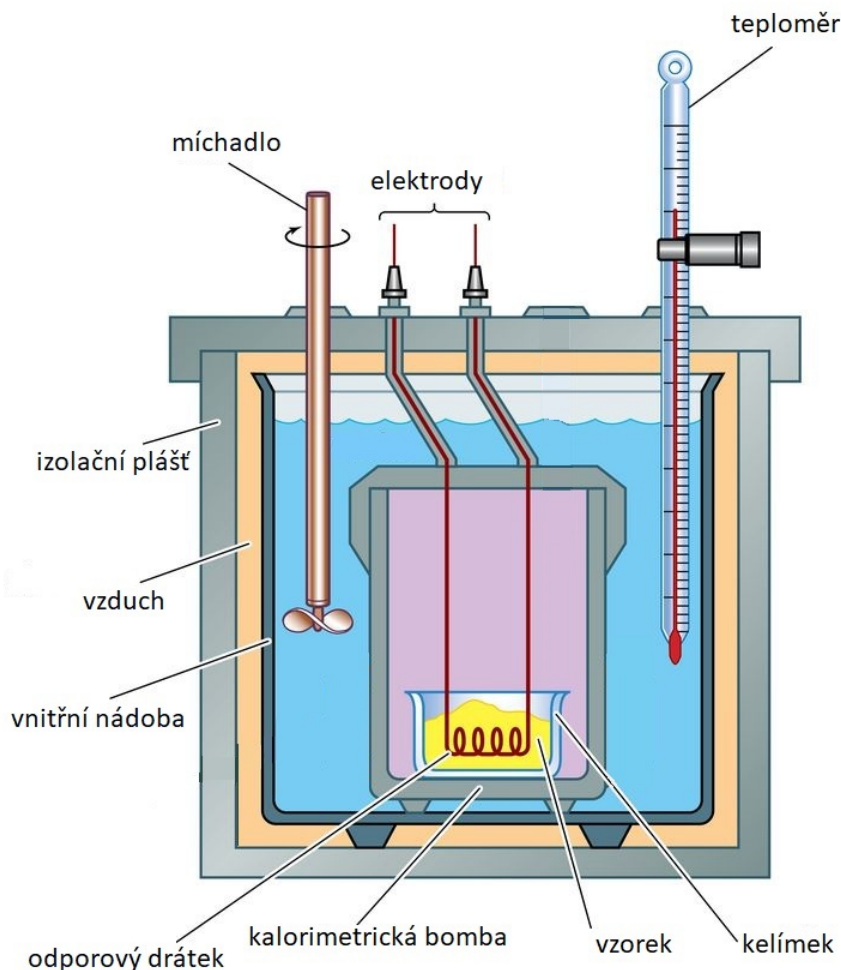
V dnešní době může být měření prováděno na různých typech kalorimetrů. Jejich rozdělení můžeme uvést takto:

Adiabatický kalorimetr – veškeré teplo se spotřebovává k ohřátí, popřípadě ochlazení kalorimetru a jeho obsahu, měří se změna teplot, teplota jeho pláště se rychle mění – mezi vnitřní komorou kalorimetru a jeho pláště nenastává žádná výměna energie, neboť teplota pláště se udržuje stále identická teplotě vody uvnitř kalorimetru, plášť je tedy stále ohříván nebo ochlazován [7, 9]

Izotermický kalorimetr – teplota pláště zůstává stále stejná a je udržována konstantní po celou dobu měření, veškeré uvolněné nebo spotřebované teplo působí buď fázovou přeměnu čisté látky, nebo je kompenzováno elektricky (dotápením Jouleovým teplem nebo chlazením pomocí Peltierova efektu apod.) [7, 9]

Automatický kalorimetr – jde o kalorimetrický systém, který je tvořen kovovým blokem, ten nahrazuje vodu s míchadlem a kalorimetr je sám o sobě spalovací bomba, tyto kalorimetry mají velmi vysoké změny teploty (mají malou tepelnou kapacitu), je tedy možné spalovat menší vzorky paliva[7, 9]

2.3 Popis částí kalorimetru



Obr. 2.3.1 – Kalorimetr [8]

- Tlaková nádoba - Jde o tzv. kalorimetrickou bombu, která je schopná vydržet vysoké tlaky při spalování. Bývá vyrobena z nerezové oceli. Materiál musí být odolný vůči kyselinám vzniklým při spalování. Horní víko bomby je opatřeno pryžovým těsněním, matici stačí utáhnout pouze ručně. Víko bomby je dále opatřeno jehlovým ventilem, který funguje jako zpětný ventil. Vypouštění tlaku z bomby po provedené zkoušce se provádí také tímto ventilem za pomoci vypouštěcí jehly.
- Zapalovací drátek – Jde o vodivý drátek s charakterizovaným tepelným chováním při spalování, většinou se jedná o nikl-chromový nebo platinový drátek. Na zapalovací drátek se připevňuje bavlněná nit, která je umístěna tak,

aby vzorek materiálu byl v co nejlepším kontaktu s nití. U bavlněné nitě je třeba znát její energetickou hodnotu (obvykle 50 J).

- Kelímek – Kelímek určený pro umístění a spálení vzorku. Většinou se jedná o křemenný, nikl-chromový, platinový, nebo z jiného nereaktivního materiálu. Velikost kelímku se řídí normou.
- Kalorimetrická nádoba – Je zhotovena z kovu, s vysoce leštěným vnitřním povrchem. Je třeba, aby byla dostatečně naplněná vodou až nad horní víko kalorimetrické bomby. Při spalování je totiž hlava tlakové nádoby teplejší než jiné části.
- Míchadlo – Točí se konstantní rychlostí a je důležité, aby jeho části byly vyrobeny z materiálů s malou tepelnou vodivostí. Rychlost míchání musí být dostatečně vysoká, aby nedocházelo k místnímu přehřátí vody v důsledku rychlé změny teploty v tlakové nádobě, a zároveň, aby doba trvání hlavního úseku byla méně než 10 minut.
- Kyslík – Kyslík je potřeba v dostatečném tlaku pro plnění nádob na 3 MPa, požadovaná čistota je 99,5 % bez jakýchkoli spalitelných látek.
- Kyselina benzoová – Kyselina benzoová je jedinou doporučenou látkou pro kalibraci kalorimetru s tlakovou nádobou s kyslíkem. Spaluje se ve formě tablet bez předchozího sušení ani dalších úprav.

Pro popis jednotlivých částí kalorimetru byly použity tyto zdroje: [7, 9, 10]

V tabulce níže jsou uvedeny hodnoty spalného tepla několika různých druhů biomasy získané experimentálně (kalorimetrickou metodou). Hodnoty byly převzaty z internetové databáze phillis.nl.

Druh vzorku	Spalné teplo [MJ/kg]	Druh vzorku	Spalné teplo [MJ/kg]
Skořápky z lískových ořechů	19,56	Pšeničný prach	16,2
Len	18,75	Kůra dubu	19,47
Slupky slunečnicových semínek	18	Javorové listí	18,86
Dubové dřevo	23,05	Třešňové pecky	21,75
Pomerančová slupka	26,72	Bambusové listí	17,6

Tab. 2.3.1 – Ukázka spalných tepel některých druhů biomasy [17]

3 PRVKOVÝ ROZBOR

3.1 Definice prvkového rozboru

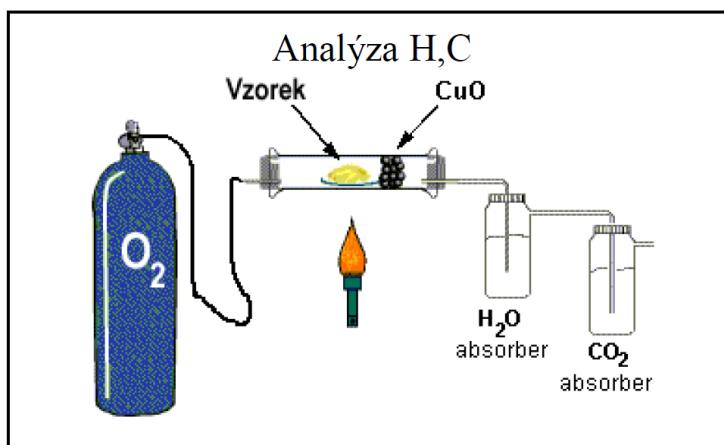
Prvkový rozbor je poměrně náročný proces, co se týče vybavení laboratoře (náročnější vzhledem k hrubému rozboru). Určuje procentuální množství prvků (uhlíku, vodíku, dusíku, kyslíku, síry aj.) ve vzorku. Výsledkem prvkového rozboru jsou hodnoty prvků v původním vzorku, v hořlavině a v bezvodém vzorku. Hodnoty vzorků v hořlavině se označují takto: X_{daf} kde X je libovolný prvek a spodní index daf označuje hořlavinu. Podobně je to u bezvodého vzorku: X_{dr} kde X představuje taktéž libovolný prvek a dolní index dr označuje, že jde o bezvodý vzorek. U většiny prověřovaných rovnic se spalné teplo nebo výhřevnost počítá právě pomocí hodnot obsahů prvků v bezvodém vzorku. Pro některé uvedené vztahy je často potřeba znát pouze množství uhlíku, vodíku a kyslíku, nebo dokonce jen uhlíku. [11]

Princip prvkového rozboru (elementární analýzy) spočívá v oxidaci vzorku a převedení prvků na plynné produkty. Dále následuje čištění, separace a určení vybraných komponent plynné směsi.

Nejdříve je potřeba vzorek vysušit, to se děje v sušárně při zhruba 150°C po dobu asi 30 minut, kdy hmotnost vzorku přestane klesat a stává se konstantní. Vysušený vzorek se rozemele na určitou zrnitost (většinou pod 1 mm), takto připravený materiál můžeme navážít, a poté podrobit zkoušce.[12]

3.2 Stanovení vodíku, uhlíku a dusíku

Vzorek umístěný na lodičce se vkládá do trubice, kde je spalován v proudu vysušeného kyslíku, ohřev probíhá z vnější strany trubice. Aby byla zajištěna dokonalá oxidace uvolněných prvků, jsou jejich plynné produkty vedeny skrz vrstvu katalyzátoru, který je také ohříván na potřebnou pracovní teplotu. Jako oxidační katalyzátory se používají: manganistan stříbrný, oxid manganičitý, nebo oxid kobaltnatokobaltný.



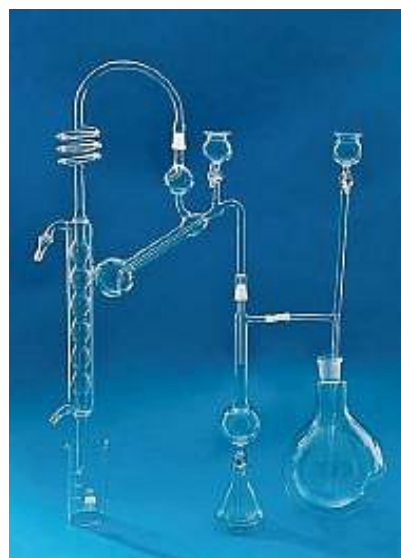
Obr. 3.2.1 – Analýza vodíku a uhlíku [13]

Aby byla zajištěna správná funkce manganistanu stříbrného, je prováděn ohřev na teplotu 500 °C. V další fázi procesu se z proudu plynů odstraňují oxidy síry a halogeny absorpcí na stříbrné vatě, granulovaném oxidu olovičitém, chromanu olovnatém nebo oxidu manganicitém. Oxidy dusíku je možno redukovat na dusík za působení kovové mědi.

Takto připravenou směs H₂O, CO₂ a N₂ můžeme analyzovat chromatograficky nebo vážkově pomocí absorpce v absorpčních kolonkách. Pro absorpci H₂O se nejčastěji používá chloristan hořečnatý a následně pro absorpci CO₂ hydroxid sodný nebo hydroxid draselný ukotvený na vhodném inertním nosiči. [13]

3.3 Stanovení dusíku

Pokud nemáme k dispozici chromatografickou metodu, je možné stanovit množství dusíku metodou podle Kjeldahla. Princip této metody spočívá v mineralizaci vzorku varem s kyselinou sírovou s přidáním síranu draselného, síranu měďnatého a oxidu seleničitého. Dusík se přemění na amoniak vázaný jako síran amonný. V následující fázi se amoniak ve speciálním přístroji Parnas Wagner vytěsňuje silnější zásadou, většinou jde o hydroxid sodný, a destiluje se do předlohy, kde dochází k jeho neutralizaci kyselinou sírovou, u které známe koncentraci a množství. Z množství nespotřebované kyseliny sírové jednoduše zjistíme množství předestilovaného amoniaku, které souhlasí s množstvím dusíku ve vzorku. [13]



Obr. 3.3.1 – Přístroj Parnas Wagner [18]

3.4 Stanovení síry

Síra v palivech se rozděluje na organicky a anorganicky vázanou. Anorganicky vázaná bývá ve formě síranů, pyritu nebo sulfidů. Vzácně se v palivech vyskytuje i síra elementární. Síra vázaná v síranovém aniontu se nachází ve svém nejvyšším oxidačním stavu a představuje takzvanou nespalitelnou síru. Naopak síra organicky vázaná v pyritech a sulfidech může být oxidována – spálena na oxid siřičitý a sírový, je to tedy tzv. spalitelná síra. V jaké formě bude síra vystupovat z technologického procesu, bude záviset na její formě při vstupu do procesu, ale také na podmínkách, za kterých bude proces probíhat. Při oxidačních podmínkách (spalování) je pravděpodobné, že síra vystoupí v tuhé síranové fázi a také v plynné fázi jako oxidy síry. Za redukčních podmínek (karbonizace, koksování) můžeme v tuhých produktech očekávat síru sulfidickou, případně sírany, které byly obsaženy již ve výchozím palivu. V plynných produktech bude síra převážně ve formě sulfanu. [13]

3.5 Stanovení veškeré síry

Pro stanovení veškeré síry ve vzorku paliva se nejčastěji používá metoda podle Eschka, která je jednou z nejjednodušších metod. Spočívá v oxidačním alkalickém tavení vzorku s takzvanou Eschkovou směsí. Směs je možné přímo koupit, nebo připravit smísením bezvodého uhličitanu sodného a oxidu hořečnatého, nebo manganičitého v hmotnostním poměru 1:2. Analytický vzorek o hmotnosti asi 1 g se smísí s dvojnásobkem Eschkovy směsi, vloží se do nepopelavého porcelánového kelímku a znovu převrství Eschkovou směsí. Tavení takto připraveného vzorku probíhá při teplotě až 850 °C. Náběh na tuto teplotu trvá zhruba hodinu a další hodinu a půl trvá výdrž na této teplotě. Žiháním se veškerá síra přemění na síranovou formu a poté se vyloučí destilovanou vodou s přidavkem peroxidu vodíku nebo kyseliny chlorovodíkové. Po zfiltrování je možné sírany v roztoku stanovit převedením na síran barnatý.[13]

Jiná metoda spočívá ve spálení vzorku v proud kyslíku při teplotě až 1250 °C, veškerá síra se spálí na oxid siřičitý a ten se poté převede na kyselinu sírovou pomocí peroxidu vodíku. Kyselinu sírovou je poté možno stanovit buď titračně, nebo vážkově vysrážením barnatým kationtem. [13]

3.6 Stanovení kyslíku

V praxi se většinou množství kyslíku v palivu stanovuje nepřímou a to dopočtem do 100 %, kdy známe množství vody, popela, uhlíku, síry a dusíku v palivu. Tato hodnota je však s velkou chybou, neboť se zde kumulují chyby z určení ostatních komponent paliva. Proto byly vyvinuty i metody přímého stanovení kyslíku používané v případech vyšších nároků na přesnost a správnost výsledku. Nejrozšířenější metodou je metoda, kdy se vzorek zahřívá v proudu dusíku a uvolněné plyny a páry obsahující kyslík se na vrstvě sazí při teplotě 1125 °C přemění na oxid uhelnatý. Ten se dále oxiduje oxidem jodičným na oxid uhličitý za současného uvolnění jodu. Vzniklý oxid uhličitý je možno stanovit způsobem absorpce na hydroxid draselný nebo sodný. Alternativou je stanovení vzniklého jodu.[13]

	C _{dr} [%]	H _{dr} [%]	N _{dr} [%]	O _{dr} [%]	S _{dr} [%]	HHV [MJ/kg]
Slupky ze slunečnicového semínka	51,7	6,2	1	41,1	-	17,6
Lískový oříšek – skořápka	50,9	5,9	0,4	42,8	-	19,9
Vrbové dřevo	49,9	5,9	0,61	41,8	-	19,59
Dubové dřevo (malý špalek)	48,76	6,35	2,81	42,08	-	19,2
Kukuřičná sláma	44,73	5,87	0,6	40,44	0,07	17,68

Tab. 3.6.1 – Ukázka hodnot z prvkového rozboru několika druhů biomasy [1]

4 VÝPOČET SPALNÉHO TEPLA A VÝHŘEVNOSTI Z PRVKOVÉHO ROZBORU

4.1 Vzorce – česká literatura

V roce 1843 francouzský chemik P. Dulong, zabývající se stanovením spalného tepla paliv uvedl první vztahy. Řešení bylo prováděno za těchto předpokladů:

1. Kyslík nacházející se v hořlavině paliva je zcela ve vazbě s vodíkem.
2. Při hoření vodíku, který není svázán s kyslíkem (volného vodíku), se uvolňuje takové množství tepla jako při hoření plynného molekulárního vodíku.
3. Palivo se chová jako mechanická směs uhlíku, volného vodíku, spalitelné síry a nespalitelné vody.

Tyto vztahy jsou běžně uváděny jako Dulongovy rovnice. (4),(5) Z těchto rovnic byly pak navrženy zjednodušené svazové rovnice (6), (7). Chyby svazových rovnic jsou při výpočtu spalných tepel černých a hnědých uhlí a topných olejů zanedbatelné.

D. I. Mendělejev při studiu těchto a dalších obdobných rovnic dospěl k závěru, že nejsou příliš vhodné k výpočtu spalných tepel a výhřevností pro paliva s vyšším obsahem kyslíku jako jsou dřevo, rašelina aj.

Nepřesnost těchto vztahů vyvodil z rozboru předpokladů, za kterých byly odvozeny. Za chybné předpoklady považoval především tyto:

1. Pro teplo uvolněné spálením vodíku, který je v tuhém a kapalném palivu vázán ve formě složitých organických sloučenin, byla vzata hodnota 144 MJ/kg. Toto je hodnota odpovídající spalování plynného molekulárního vodíku. Vzhledem k vazbě vodíku v tuhém a kapalném palivu lze uvažovat pouze hodnotu 125,6 MJ/kg.
2. Kyslík se nachází v chemické vazbě nejen s vodíkem, ale i uhlíkem, což ovlivní konečnou hodnotu spalného tepla.
3. Palivo se uvažuje jako mechanická směs spalitelného uhlíku, vodíku, síry a nespalitelné vody. Tento předpoklad nepřihlíží k tomu, že se při vzniku každé chemické vazby uvolňuje nebo pohlcuje teplo, takže při hoření chemických sloučenin se nemůže uvolňovat takové množství tepla jako při samostatném hoření jejich počátečních složkových komponent.

Na základě vlastního rozboru a provedení četných srovnání mezi hodnotami spalných tepel (výhřevností) stanovených výpočtem a kalorimetrickou metodou, navrhl D. I. Mendělejev v roce 1897 tyto vztahy: (8), (9).

Dále bylo postupně navrženo mnoho dalších rovnic, z nichž nejdůležitější jsou rovnice těchto autorů: G. Strache a R. Lant (10), W. Steuer (11), E. Grummel aj. Daveies (12), R. Michel (13), V. Gumz (14), V. Boie (15), (16), F. Schuster (17). [11]

Vzorec vypracovaný z rozboru československých paliv, verze vyhovující většině tuhých paliv od koksu po dřevo, Vondráčkův vzorec (18). [4]

Většinou jsou tyto vztahy tvořené metodou postupné lineární regrese, na základě dat ze vzorků biomasy získaných kalorimetrickou metodou, a také dat z prvkového rozboru. V rovnicích se jedná o obsahy prvků v suchém vzorku. [1]

Tyto rovnice (4)-(18) jsou nejběžnější, co se týče české literatury, jsou však primárně určeny pro výpočet spalného tepla černých a hnědých uhlí. Výsledné hodnoty těchto vzorců jsou v jednotkách kJ/kg, pokud není uvedeno jinak.[11]

$$HHV = 339C + 1444 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 92S \quad (4)$$

$$LHV = 339C + 1235 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 92S - 25,4(W + \frac{9}{8}O) \quad (5)$$

$$HHV = 339C + 1440 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 105S \quad (6)$$

$$LHV = 339C + 1214 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 105S - 25W \quad (7)$$

$$HHV = 339C + 1254H - 109(O - S) \quad (8)$$

$$LHV = 339C + 1030H - 109(O - S) - 25,1W \quad (9)$$

$$HHV = 340,6C + 1432,4H - 153,2O + 104,6S \quad (10)$$

$$HHV = 339 \left(C - \frac{3}{8}O \right) + 239 \left(\frac{3}{8}O \right) + 1444 \left(H - \frac{O}{16} \right) + 105S \quad (11)$$

$$HHV = (15,2H + 957) * \left(\frac{C}{3} + H - \frac{O-S}{8} \right) \quad (12)$$

$$HHV = 340,3C + 1243,2H + 62,8N + 190,9S - 98,4O \quad (13)$$

$$LHV = 340,3S + 1017,1H + 62,8N + 190,9S - 98,4O - 25,1W \quad (14)$$

$$HHV = 351,6C + 1162,2H - 104,6O + 96,3S \quad (15)$$

$$HHV = 351,6C + 1162H - 110,9O + 104,6S \quad (16)$$

$$HHV = 339C + 1423 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 92S \quad (17)$$

$$LHV = 347,5C + 953H - 109(O - S) - 25W \quad (18)$$

4.2 Vzorce – celosvětová literatura

Následující uvedené vztahy pocházejí především z odborných článků mimo českou literaturu. Výsledné jednotky uvedených vztahů jsou MJ/kg, pokud není uvedeno jinak.

$$HHV = 0,3259C + 3,4597 \quad (19)$$

$$HHV = -1,3675 + 0,3137C + 0,7009H + 0,0318O^b \quad (20)$$

$$HHV = 3,55C^2 - 232C - 2230H + 51,2C * H + 131N + 20600 \text{ [kJ/kg]} \quad (21)$$

$$HHV = 0,3491C + 1,1783H + 0,1005S - 0,1034O - 0,0151N - 0,0211 * Ash \quad (22)$$

$$HHV = -0,763 + 0,301C + 0,525H + 0,064O \quad (23)$$

$$HHV = 0,4373C - 1,6701 \quad (24)$$

$$HHV = 0,2949C + 0,8250H \quad (25)$$

Vztahy (19) – (25). [1]

$$HHV = 1,87C^2 - 144C - 2820H + 63,8C * H + 129N + 20147 \text{ [kJ/kg]} \quad (26)$$

$$HHV = 5,22C^2 - 319C - 1647H + 38,6C * H + 133N + 21028 \text{ [kJ/kg]} \quad (27)$$

$$HHV = 357,77C + 917,58H - 84,51O - 59,38N + 111,87S \text{ [kJ/kg]} \quad (28)$$

$$HHV = 140,96C + 602,14 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 39,82S + \frac{89,29 \left(H - \frac{O}{8} \right)}{2} + 42,74 * \frac{O}{2} - 10,4N \text{ [kJ/kg]} \quad (29)$$

Vztahy (26) – (29). [14]

$$HHV = -3,147 + 0,468C \quad (30)$$

$$HHV = -1,642 - 0,024Ash + 0,475(C + N) - 0,376(H + N) \quad (31)$$

$$HHV = 23,668 - 7,032H - 0,002Ash^2 + 0,005C^2 + 0,771H^2 + 0,019N^2 \quad (32)$$

$$HHV = 0,335C + 1,423H - 0,154O - 0,145N \quad (33)$$

$$HHV = 0,879C + 0,3214H + 0,056O - 24,826 \quad (34)$$

$$HHV = 0,924C - 22,403 \quad (35)$$

Vztahy (30)-(35). [15]

5 HRUBÝ ROZBOR

Hrubým rozбором paliva se určuje množství obsahu vody (W^r), popeloviny (A^r) a hořlaviny (h) v daném palivu, kde horní index r značí, že se jedná o hmotnostní obsahy v surovém palivu. Pro hrubý rozbor platí vztah:

$$W^r + A^r + h = 100\% \quad (36)$$

Pro názornější vyjádření můžeme hrubý rozbor vyjádřit tabulkou:

Přimísená voda	Surové palivo		
	Voda (W^r)	Popelovina (A^r)	Hořlavina (h)
	Balast		Prchavá Tuhá
Voda odstraněná z paliva	Bezvodé palivo (sušina)		
Produkty vzniklé spálením paliva			
Vodní pára	Tuhé zbytky – struska, popílek	Spaliny (bez vodní páry)	

Tab. 5.0.1 – Hrubý rozbor [5]

Palivo je látka, ze které se při procesu spalování snažíme získat co největší množství energie. Je složena z hořlaviny a balastu. Pro nás prospěšná část, hořlavina, je hlavním nositelem energie v palivu. Nežádoucí část paliva tvoří balast. Ten se skládá z vody (W^r) a popeloviny (A^r). Na konci procesu spalování se balast mění na vodní páru a tuhé nespalitelné zbytky. Z toho plyne, že se snižujícím se obsahem balastu roste kvalita paliva. [5,16]

5.1 Obsah vody

Obsahem vody rozumíme obsah vlhkosti v palivu, v našem případě v biomase. Obsah vlhkosti snižuje efektivitu spalovacího procesu, vytváří problémy při zpracování a zdražuje dopravu. Snižuje nám výhřevnost paliva a ve formě vodní páry zvyšuje objem spalin. Voda je obsažena ve většině paliv, především v tuhých palivech.

Snahou je získat biomasu s co nejmenším obsahem vody. Poměrný obsah vody závisí na tom, z jakých zdrojů biomasu získáváme. Je také závislý na místě těžby biomasy a na její následné úpravě. Palivo ze zemědělského průmyslu má menší obsah vlhkosti oproti palivu z dřevozpracujícího průmyslu. Paradoxně ani spalování absolutně suché biomasy není z hlediska průběhu procesu hoření optimální. Příliš suchá hmota hoří explozivně a velká část energie uniká v kouřových plynech.

Množství vody v biomase je velmi proměnlivé, velice záleží na čerstvosti biomasy a také na způsobu uskladnění. U čerstvě vytěženého dřeva dosahuje relativní vlhkost až 60 %, dobře proschlé dřevo na vzduchu má relativní vlhkost kolem 20 %. U dřevěných briket se relativní vlhkost pohybuje v rozmezí 3 a 10 % podle kvality lisování. Pro spalování štěpek je optimální vlhkost 30-35 %. Pro spalování dřeva se doporučuje vlhkost kolem 20 %. [5,16]

Veškerá voda je v palivu vázána různými způsoby:

- veškerá – součet veškeré vody přítomné v palivu a vody do paliva přimíšené
- přimíšená – voda přimíšená do paliva při těžbě nebo dopravě, možno odstranit odkapáváním nebo odstředěním
- hrubá – voda, kterou je možné odstranit volným sušením při pokojové teplotě
- zbytková – voda, která zůstane po volném sušení
- chemicky vázaná voda – nelze ji vysušit, uvolní se až při spalování
 - hydrátová – voda, která je vázaná na popeloviny v palivu
 - odlukovaná – voda, která je vázaná na hořlavinu, při rozboru se zahrnuje do prchavé hořlaviny
- kapilárně vázaná – voda, která vyplňuje v palivu mezibuněčné prostory, nedá se odstranit volným sušením, je zjišťována z úbytku hmotnosti po vysušení (sušení při 105 °C až 110 °C). [5,16]

5.2 Obsah popelovin

Popeloviny jsou nespalitelné tuhé složky paliva a vznikají z minerálních složek obsažených v palivu. Z hlediska chemického složení se jedná o oxidy křemíku, hliníku, železa, vápníku aj. Spálením těchto složek vzniká tuhý zbytek, kterému říkáme popel. Popel je tedy podíl paliva, který získáme dokonalým spálením paliva. Dokonalým spalováním nazýváme proces, kdy hodnota nespálených tuhých zbytků je menší než 5% a zároveň je vyhořelá veškerá hořlavina. Během procesu spalování se popeloviny teplem rozkládají v oxidační atmosféře a jejich těkavé podíly přecházejí do spalin. Kromě popelovin jsou zdrojem popelu i nečistoty, které se do paliva dostaly během těžby nebo transportu. Popel je nežádoucí složkou paliva z hlediska výhřevnosti, a také z hlediska chování paliva. Během spalování totiž popel ztěžuje přístup kyslíku k hořlavině a také částičky popelu se usazují na teplosměnných plochách a vytvářejí nánosy. Nánosy izolují teplosměnné plochy a zhoršují přenos tepla v kotli, což má za následek menší ochlazování spalin a vyšší komínovou ztrátu. [5,16]

Obsah popelu se určuje na základě úbytku hmotnosti paliva a hmotnosti vzniklého popelu během spalování vztahem:

$$A = \frac{m_{pop}}{m_{sv}} * 100 \text{ [%]} \quad (37)$$

Obsah popelu v biomase je v porovnání s ostatními pevnými palivy velmi nízký. Pohybuje se v rozmezí od 0,5 % do 8 %. Ve dřevě se obsah popelu pohybuje od 0,5 % do 2 %, v kůře může dosáhnout 3 %, ale to může být často zapříčiněno nečistotami, které se dostanou do kůry při přepravě nebo těžbě. Díky nízkému obsahu popelu odpadá kontinuální odvod tuhých zbytků po spalování, což znamená výhodu v podobě finanční úspory. Výhodou nízkého obsahu popelu jsou také nižší emise tuhých látek (prach) a tak se zmenšuje náročnost na údržbu spalovacího zařízení. [5,16]

Důležitou charakteristikou popelu jsou jeho charakteristické teploty, které popisují jeho chování při těchto teplotách. V závislosti na teplotě dochází k deformaci až k úplnému roztavení částic popelu. Mezi charakteristické teploty popelu patří:

- teplota spékání částic – spékání částic na povrchu tělíska
- teplota měknutí – počátek deformace, nalepování popelu na výtavné plochy
- teplota tavení – tělísko se roztaví do polokruhovitěho tvaru
- teplota tečení – tělísko se roztéká, tvoří se struska

Teplota tavení je velmi důležitým parametrem. Při spalování biomasy, která má teplotu tavení popelu nižší než je teplota plamene při hoření, dochází k zalepování roštů ohniště případně i šamotové vyzdívky. To brání přístupu vzduchu a pak vznikají problémy při spalování. Účinnost kotle klesá, neboť palivo dobře neprohoří a také roste obsah škodlivých látek ve spalinách. Usazené nánosy popelu na stěnách topeniště difundují do vyzdívky, která se následně po vrstvách odlupuje. Tomuto problému můžeme nejlépe předejít tak, že nenecháme teplotu na roštu přesáhnout teplotu tavení spalované biomasy. Mezi paliva s nízkými teplotami tavení popelu patří především stébelniny a celé rostliny obilovin. [5,16]

5.3 Obsah hořlaviny

Obsah hořlaviny v palivu je hlavním ukazatelem výhřevnosti paliva. Hořlavina se skládá z pěti základních prvků: uhlík, vodík, kyslík, dusík a síra. Tyto tři prvky, uhlík, vodík, kyslík, významně ovlivňují proces hoření, kdežto dusík a síra ovlivňují především tvorbu znečišťujících látek jako jsou oxidy dusíku a oxid siřičitý. Hořlavinu dělíme na neprchavou a prchavou. Neprchavá hořlavina je tvořena tuhým uhlíkem. K neprchavé hořlavině řadíme také kyslík a dusík, neboť nepřináší do procesu žádnou energetickou hodnotu. Na začátku procesu se nejdříve uvolňuje prchavá hořlavina, která napomáhá vznícení tuhé hořlaviny a také stabilizuje proces hoření. Prchavá hořlavina je tvořena uhlíkem, vodíkem a sírou. Tyto prvky jsou nositelem chemicky vázané energie, která se uvolňuje při jejich hoření. [5,16]

Pro biomasu je typické hoření dlouhým plamenem. Dlouhý plamen je zapříčiněn hořením plynných látek uvolňovaných pyrolýzou, které nehoří na roštu, ale v prostoru nad roštěm. Tyto látky pak dohořívají ve speciální dohořívající komoře. Spalování biomasy v klasických kotlích dosahuje nízké účinnosti a zároveň při tomto spalování vznikají vysoké emise. Pro dokonalé spálení paliva musí být zajištěno promísení prchavé hořlaviny a vzduchu. Pokud tomu tak není, dojde k nedokonalému spálení, což vede k vysokým tepelným ztrátám vlivem chemické nedokonalosti spalování (tzv. chemický nedopal). [5,16]

Složení hořlaviny v palivu je poměrně proměnlivé. V porovnání s fosilními palivy obsahuje biomasa méně uhlíku, více kyslíku a více dusíku. [5,16]

Tento fakt může být příčinou chyb při výpočtu spalného tepla a výhřevnosti ze vzorců pomocí prvkového rozboru. Jeden vzorec nemusí být vhodný pro paliva různého složení.

5.4 Vzorce pro výpočet spalného tepla z hrubého rozboru

Zde jsou uvedeny příklady vzorců pro výpočet spalného tepla z dat získaných hrubým rozbořem. Výsledné hodnoty spalného tepla ze vzorců jsou v jednotkách MJ/kg.

$$HHV = 19,914 - 0,2324Ash \quad (38)$$

$$HHV = -3,0368 + 0,2218VM + 0,2601FC \quad (39)$$

$$HHV = 0,3536FC + 0,1559VM - 0,0078Ash \quad (40)$$

$$HHV = 354,3FC + 170,8VM \text{ [kJ/kg]} \quad (41)$$

$$HHV = 35430 - 183,5VM - 354,3Ash \quad (42)$$

$$HHV = -10,8141 + 0,3133(VM + FC) \quad (43)$$

Uvedené vztahy (38)-(43). [1]

6 PRAKTICKÁ ČÁST

Celý postup při měření je dán normou ČSN ISO 1928, podle které bylo měření prováděno.

K měření byl používán poloautomatický kalorimetr. U takovýchto přístrojů není potřeba měření času od přesného okamžiku zapalování nebo odečítání teploty. Celý proces je automatizován, tudíž je obsluha přístroje velmi jednoduchá.

Před začátkem vlastního měření bylo potřeba kalorimetr zkalibrovat. Pro kalibraci byla použita tableta kyseliny benzoové. V ochranných rukavicích byla tableta navážena, a připravena ke spálení. Postup při kalibraci je stejný jako při spalování vzorků, což je popsáno dále. Po dokončení měření byla naměřená hodnota zapsána do programu kalorimetru. Takto kalibrovaný přístroj byl připraven pro měření a po celou dobu měření nebylo nutné přístroj znovu kalibrovat.

6.1 Postup měření

Před zahájením měření je potřeba mít připravené vzorky paliv. Velmi důležitý je také odběr vzorku. Snažíme se, aby součástí odebraného vzorku byly všechny různé komponenty daného druhu biomasy. Špatně odebraný vzorek může zkreslit výslednou naměřenou hodnotu spalného tepla. Některé částice biomasy můžou mít rozdílnou hodnotu spalného tepla, v našem případě např. odpad ze lnu, který obsahoval semínka lnu, jejich slupky, ale také stonky a listy.

Pokud chceme dále dopočítat výhřevnost ze získaného spalného tepla, je potřeba také znát obsah vlhkosti a obsah vodíku v palivu. Vzorec (2) pro dopočet výhřevnosti z naměřené hodnoty spalného tepla je uveden v úvodu práce.

Nejprve je potřeba zvážit hmotnost vzorku s co nejlepší přesností. Hmotnost vzorku byla zvážena na analytických váhách s přesností 0,0002 g. Hmotnost připraveného vzorku ke spálení v kalorimetru by se měla u biomasy pohybovat okolo 0,7 – 1,5 g, aby došlo k ohřátí vody v kalorimetru přibližně o 2 -3 °C.

Se vzorkem po celou dobu manipulujeme ideálně pinzetou, pokud bychom na vzorek sahalí holou rukou, vzorek by na sebe navázal více vlhkosti, což by mohlo zkreslovat výsledky.



Obr. 6.1.1 – Analytické váhy

Dále bylo připraveno bavlněné vlákno, které má definovanou energetickou hodnotu. Bylo připevněno na zapalovací drátek, opět pomocí pinzety se snahou o nejmenší kontakt bavlněného vlákna s kůží. Zvážený vzorek byl umístěn do spalovacího kelímku tak, aby byl v co nejlepším kontaktu s bavlněným vláknem, neboť při nedostatečném kontaktu může dojít k nezapálení vzorku a poté se musí opakovat všechny předešlé činnosti.



Obr. 6.1.2 - Tlaková nádoba

Takto připravená sestava byla uzavřena do tlakové nádoby (bomby) a utažena maticí. Ještě před utažením maticí je potřeba do tlakové nádoby nalít přibližně 10 ml vody, aby v případě vylétnutí částic vzorku při spalování nedošlo k poškození dna tlakové nádoby. Uzavřená bomba byla napuštěna na připravené napouštěcí stanici kyslíkem do tlaku 3 MPa a vložena do hlavní nádoby kalorimetru. Do nádržky kalorimetru bylo nalito požadované množství vody (přibližně 2 litry) o teplotě 21 °C (teplota místnosti a vody by se měly sobě blížit). Dále bylo uzavřeno horní víko kalorimetru tak, aby správně dosedaly kontakty elektrod. Před spuštěním je ještě potřeba zadat hmotnost vzorku a také energetickou hodnotu bavlněného vlákna.



Obr. 6.1.3 – Napouštěcí stanice

Po spuštění procesu se nejdříve voda v kalorimetru přemístí z nádržky do kalorimetrické nádoby s míchadlem a tlakovou nádobou. Na displeji se zobrazí teplota vody, která se po celou dobu procesu aktualizuje. Po přetečení veškeré vody z nádržky se spustí zapalování, kdy dojde k zapálení bavlněného vlákna a poté vzorku. Po zapálení vzorku teplota na displeji prudce stoupá a je aktualizována a měřena v pravidelných intervalech. Po několika málo minutách se naměřené rozdíly teplot začínají blížit nule. Doba měření od začátku hoření po ustálení teplot je asi okolo 8 minut. Po skončení měření kalorimetr vyhodnotí naměřená data a na displeji se ukáže hodnota spalného tepla materiálu.

Po otevření horního víka kalorimetru se spustí vypouštění vody. Dále je vyjmuta tlaková nádoba a je nutno osušit elektrody na spodní straně víka kalorimetru (při neosušení elektrod docházelo k nezapálení vzorku a měření tak bylo zbytečně prodlužováno). Z tlakové

nádoby je nutno odpustit tlak a spaliny. Toto se provádí v gumových rukavicích a pod spuštěnou digestoří za pomoci přípravku k tomuto určenému. Při hoření za vysokého tlaku může vzniknout kyselina siřičitá a dusičná, které mohou způsobit nepříjemnou vyrážku na kůži. Po otevření tlakové nádoby je nutné zkontrolovat, zda palivo správně vyhořelo a nevylétno ze spalovacího kelímku. Pokud se tak stalo, a část spalovaného vzorku byla na dně tlakové nádoby, jednalo se o neplatný pokus.

U některých druhů paliv, v našem případě šlo o amarant, len, lničku, digestát a odpad z quinoy, je potřeba vzorek peletovat. Je to z důvodu, kdy materiál má tendenci při hoření vylétnout ze spalovacího kelímku na dno tlakové nádoby. První pokus byl vždy proveden s volným materiálem bez peletování, ale u těchto vzorků došlo k vylétnutí jeho částic při spalování mimo spalovací kelímek. Proto se tedy přistoupilo k peletování. Peletování se neprovádí, pokud není nutné, neboť může ovlivňovat výsledky spalného tepla.

Při peletování byl materiál nadrcen pomocí mixéru na jemné částice. Takto nadrcený materiál vsypeme do pěchovacího válečku, dále do otvoru zastrčíme pěchovací kolík a tento celek vložíme do ručního lisu. Díra ve válečku s kolíkem jsou vyrobeny velmi přesně, aby nedocházelo k protlačování drobných částíček ve formě prachu okolo pěchovacího kolíku. Stlačujeme pouze na takový tlak, aby byla peleta soudržná a nerozpadala se. V našem případě šlo o tlaky okolo 2-2,5 MPa. Po stlačení je váleček vyjmut z lisu a pomocí kladiva nebo jiného předmětu je z válečku vytlučena peleta a pěchovací kolík. Peletu je nutno zvážit a dále probíhá postup jako u jiných vzorků.



Obr. 6.1.4 – Lis na peletky

Někdy je potřeba s peletami manipulovat velmi opatrně. Například lnička patřila mezi nejproblémovější vzorek, u kterého docházelo k protlačování materiálu okolo pěchovacího kolíku a na spodní straně válečku už při tlacích okolo 1 MPa. Hotové pelety byly velmi křehké a i při jemné manipulaci pinzetou se peleta rozpadla. Takové pelety nejsou použitelné při pokusu a je potřeba vyrobit nové.

6.2 Výsledky měření

1. Dřevní peleta A1 - BIOMAC	hmotnost navážky [g]	0,5212	0,5642	0,5128	
	spalné teplo [MJ/kg]	18,210	18,244	18,252	
2. Hořčice – zrno	hmotnost navážky [g]	0,9303	1,0967	1,0822	
	spalné teplo [MJ/kg]	24,084	23,974	24,335	
3. Žito – zrno	hmotnost navážky [g]	0,9843	0,9422	1,0282	
	spalné teplo [MJ/kg]	16,834	16,840	16,832	
4. Svetlice barvířská - zrno	hmotnost navážky [g]	1,1992	1,1270	1,0995	
	spalné teplo [MJ/kg]	23,246	23,195	22,733	
5. Dřevní štěpka – měkké dřevo (smrk)	hmotnost navážky [g]	0,5985	0,5238	0,5216	
	spalné teplo [MJ/kg]	18,104	18,264	18,252	
6. Dřevní štěpka - tvrdé dřevo (švestka)	hmotnost navážky [g]	0,5846	0,7599	0,5865	
	spalné teplo [MJ/kg]	18,078	18,044	18,009	
7. Amarant	hmotnost navážky [g]	0,4736	0,4884	0,4138	
	spalné teplo [MJ/kg]	16,317	16,300	16,019	
8. Slunečnice – pelety průměr 6mm	hmotnost navážky [g]	0,7185	0,8255	1,0452	
	spalné teplo [MJ/kg]	15,190	14,247	14,263	
9. Seno – pelety průměr 8mm	hmotnost navážky [g]	0,7569	0,8147	0,6395	
	spalné teplo [MJ/kg]	16,557	16,363	16,364	
10. Sláma – pelety průměr 10mm	hmotnost navážky [g]	0,9043	1,0157	1,0982	
	spalné teplo [MJ/kg]	16,727	17,217	17,258	
11. Len - odpad	hmotnost navážky [g]	0,6484	0,8482	0,6747	
	spalné teplo [MJ/kg]	20,467	20,290	20,198	
12. Lnička	hmotnost navážky [g]	0,7111	0,3210	0,4656	0,6235
	spalné teplo [MJ/kg]	25,041	25,714	25,309	25,111

13. Quinoa – odpad	hmotnost navážky [g]	1,1300	0,8648	1,065
	spalné teplo [MJ/kg]	15,328	15,597	15,597
14. Digestát	hmotnost navážky [g]	0,5925	0,5270	0,7546
	spalné teplo [MJ/kg]	15,407	15,429	15,459

Tab. 6.2.1 – Naměřené hodnoty

Červeně zvýrazněné hodnoty byly z průměrování hodnot vynechány. Tyto hodnoty jsou příliš odlišné (rozdíl okolo 0,5 MJ/kg) od ostatních naměřených hodnot, v případě započtení těchto hodnot by mohly být výsledky příliš zkreslené. Chyby mohly být zapříčiněny nevhodným odběrem vzorku, nebo jinou chybou v měření.

Číslo vzorku	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
Spalné teplo [MJ/kg]	18,235	24,131	16,835	23,221	18,207	18,044	16,212
Výhřevnost [MJ/kg]	16,768	22,220	15,153	21,433	16,608	16,493	14,774

Tab. 6.2.2 – Spalné teplo a výhřevnost

Číslo vzorku	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.
Spalné teplo [MJ/kg]	14,255	16,428	17,238	20,318	25,154	15,507	15,432
Výhřevnost [MJ/kg]	12,999	14,907	15,720	18,717	23,150	14,082	13,811

Tab. 6.2.3 – Spalné teplo a výhřevnost

Z naměřených hodnot spalného tepla, a hodnot získaných z prvkového rozboru, byly dopočítány výhřevnosti vzorků měřených druhů paliv. K výpočtu výhřevností měřených paliv byl použit vzorec (2), který je uveden na straně 11.

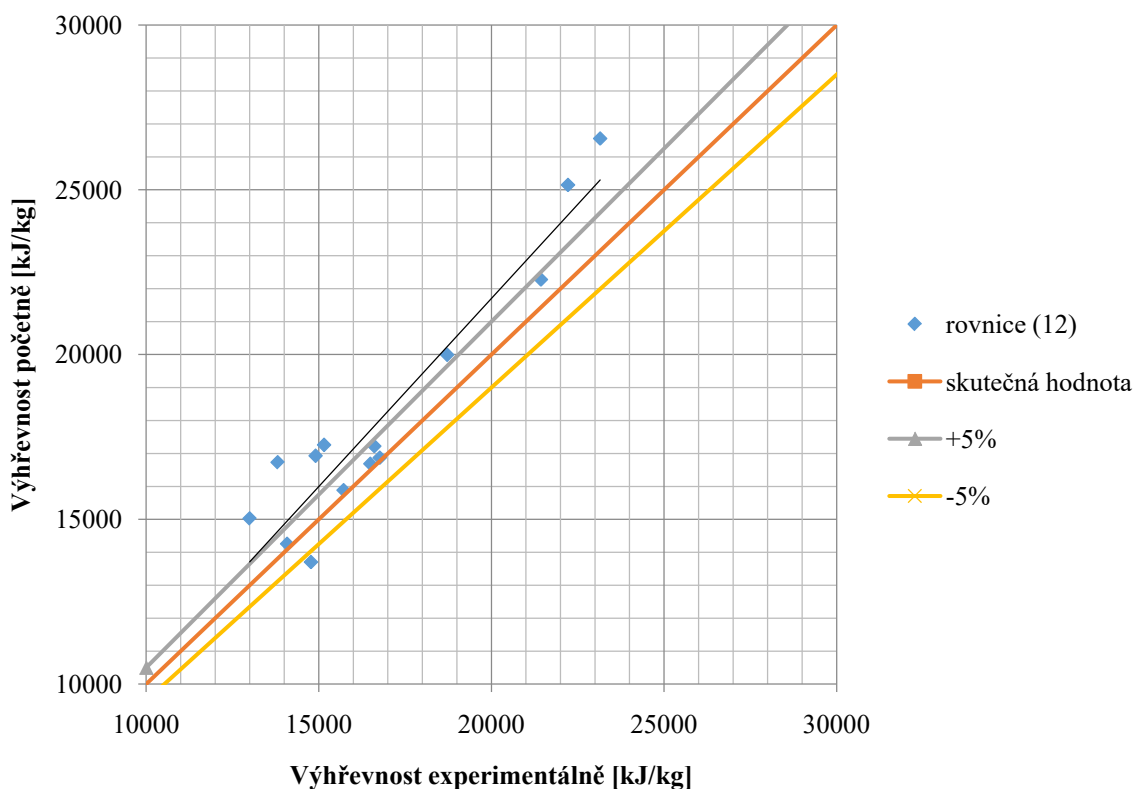
6.3 Vyhodnocení výsledků z prvkového rozboru

Vyhodnocení výsledků získaných z jednotlivých rovnic proběhlo pomocí grafů. Nejdříve byly vytvořeny grafy závislosti vypočtených hodnot a hodnot získaných kalorimetricky pro každou rovnici zvlášť, a také sloupcové grafy zobrazující hodnoty vypočtené (tyto grafy byly vytvořeny pro každý ze vzorků). Všechny grafy jsou obsaženy v příloze této práce. Jako základním kritériem, kdy můžeme považovat výsledek rovnice za přijatelný a správný, byla určena odchylka 5 % od hodnoty získané experimentálně. Dále byla snaha o vyhodnocení použitím lineární regrese a o upravení některého ze vzorců tak, aby vypočtené hodnoty pomocí tohoto vzorce co nejpřesněji odpovídaly hodnotám naměřeným.

6.3.1 Četnost přesných výsledků

Jak bylo již výše zmíněno, kritériem tohoto vyhodnocení je, aby výsledek rovnice odpovídal hodnotám získaným experimentálně a to s maximální odchylkou 5%.

Z vytvořených grafů pro každou rovnici zvlášť je možné tyto údaje vyčíst. Podle tohoto kritéria se jako nejpřesnější rovnice ukázala rovnice (12). Z výsledků této rovnice se vypočtené hodnoty šesti druhů ze čtrnácti druhů testované biomasy přiblížily skutečné hodnotě výhřevnosti s menší odchylkou než 5 %.

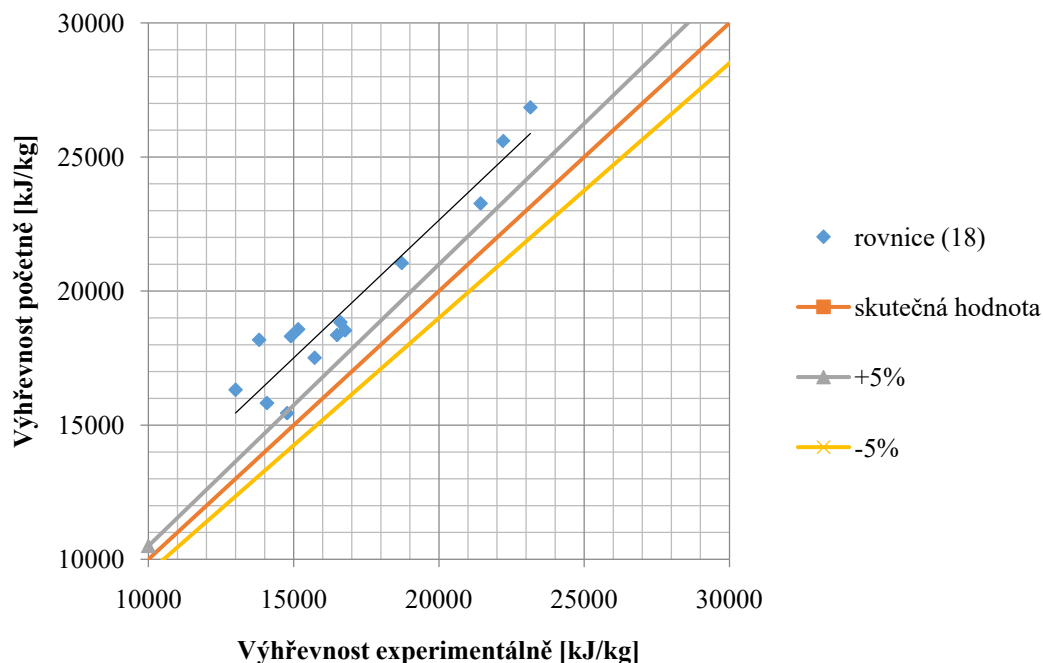


Další o něco méně úspěšné rovnice jsou (4), (5), (17), (33), tyto se přiblížily skutečné hodnotě výhřevnosti u pěti druhů biomasy.

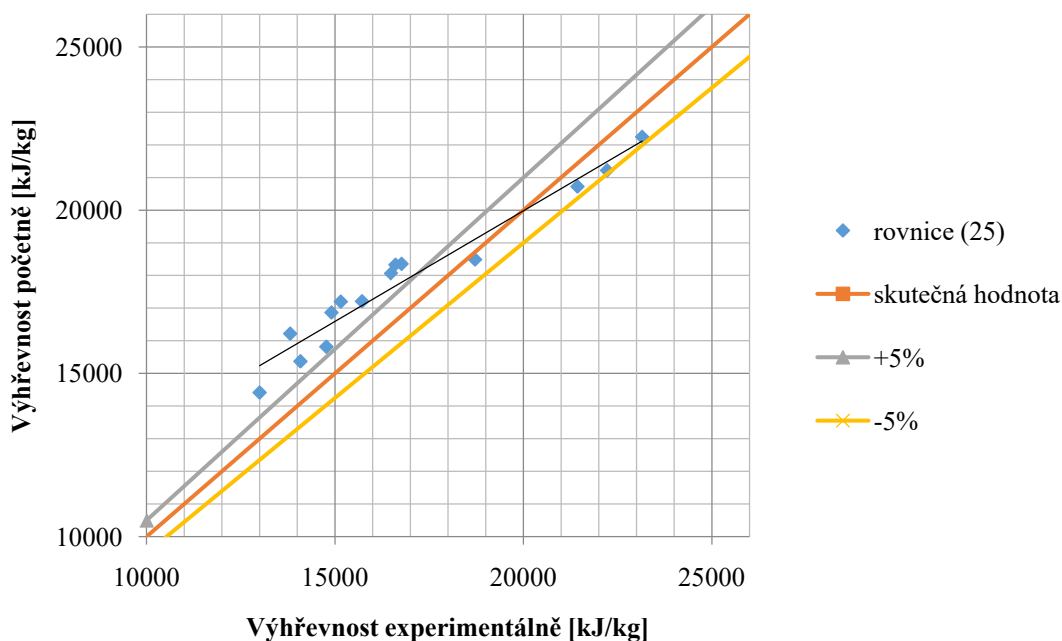
Další rovnice byly ještě méně přesné, některé se přesné hodnotě nepřiblížily ani u jednoho druhu biomasy.

6.3.2 Vyhodnocení pomocí přímky lineární regrese

U tohoto vyhodnocení byly data v grafech závislosti vypočtené výhřevnosti na skutečné výhřevnosti proloženy přímkou lineární regrese. Při tomto vyhodnocování mohly nastat dvě situace. Tou první je, že přímka lineární regrese je téměř rovnoběžná s přímkou udávající skutečnou výhřevnost. Takovou rovnici by bylo možné jednoduše upravit pro větší přesnost. Jako nejlepší pro tuto úpravu se zdála rovnice (18).



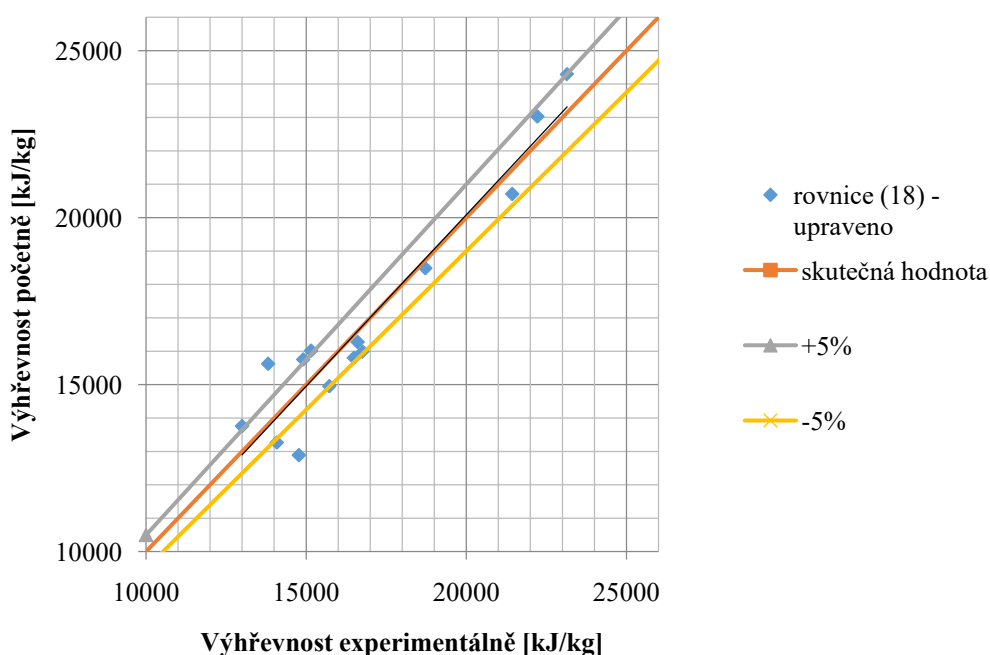
Druhou možností je, že přímka lineární regrese není rovnoběžná, ale s přímkou svírá určitý úhel. V tomto případě úprava rovnice pro lepší přesnost je složitější. Jako příklad je uveden graf rovnice (25).



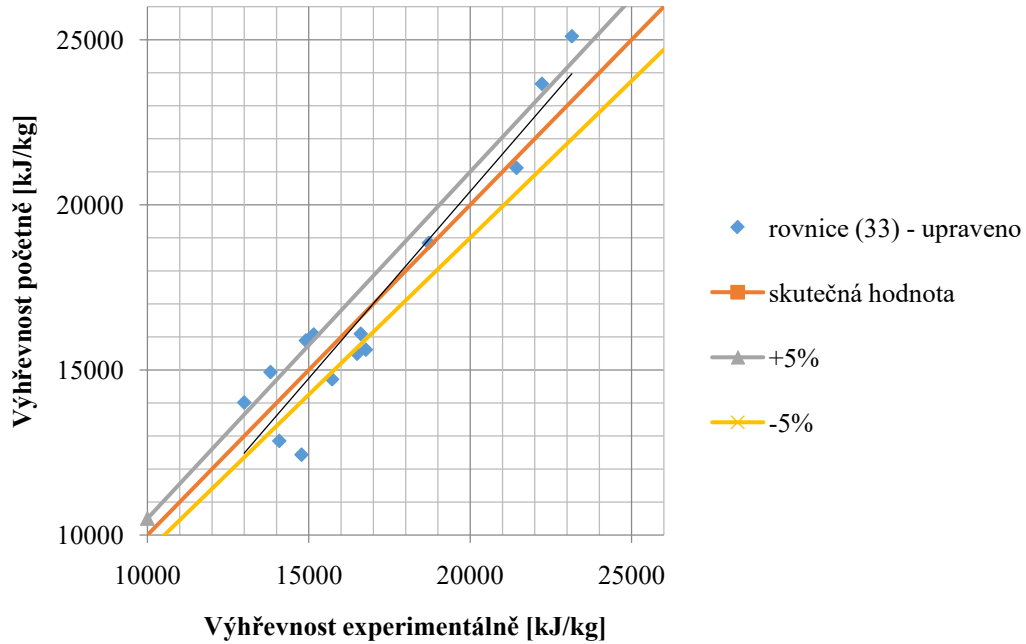
U dvou vybraných rovnic s téměř rovnoběžnou přímkou lineární regrese se skutečnou hodnotou výhřevnosti byla provedena úprava rovnic. Od základní rovnice byla odečtena průměrná hodnota chyby každého ze vzorků. Jde o rovnice (18) a (33).

Po úpravě rovnice (18) byly obdrženy tyto výsledky: do rozmezí 5 % od přesné hodnoty se dostalo sedm druhů biomasy a dalších pět druhů je velmi blízko hranice pěti procent. Touto jednoduchou úpravou bylo docíleno toho, že takto upravená rovnice je mnohem blíže přesným hodnotám než jakákoliv původní rovnice, alespoň pro testované druhy biomasy. Níže je uvedena výsledná upravená rovnice a její výsledky zobrazeny pomocí grafu.

$$LHV = 347,5C + 953H - 109(O - S) - 25W - 2560 \text{ [kJ/kg]} \quad (44)$$



Úprava rovnice (33) už nebyla tak úspěšná. Do určeného rozmezí zasahují výsledky pouze u třech vzorků. Jednoduchou úpravou se přesnost spíše zhoršila, neboť vzorky, které při výpočtu původní rovnice zasahovaly do vymezeného prostoru, po úpravě jsou mimo toto rozmezí pěti procent.

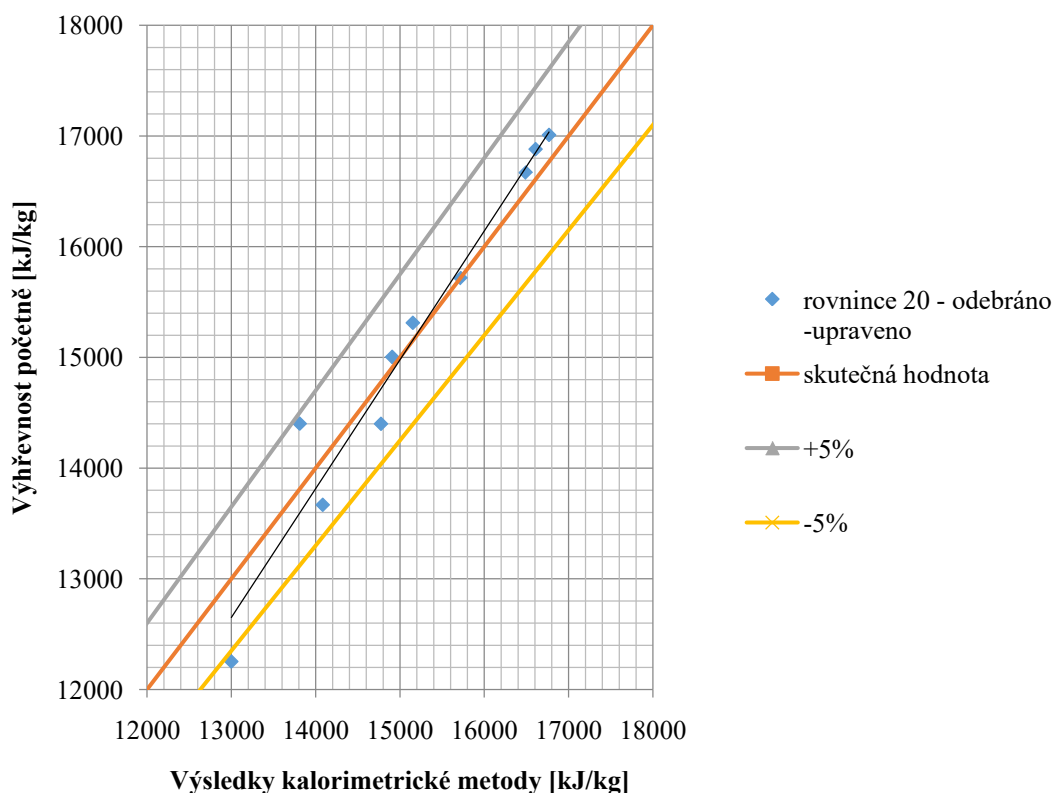


6.3.3 Úprava dalších rovnic

Při důkladnějším prohlédnutí grafů je vidět, že u některých rovnic vychylují přímku lineární regrese pouze některé druhy biomasy. Nejvíce viditelné to je u rovnic (20) a (23). U těchto rovnic byly některé druhy biomasy z grafů vynechány a rovnice byla upravena odečtením průměrného rozdílu výhřevností zbylých druhů biomasy. Vynechanými druhy biomasy byly v obou případech tyto čtyři: len - odpad, lnička - semeno, hořčice - zrno, svetlice – semeno.

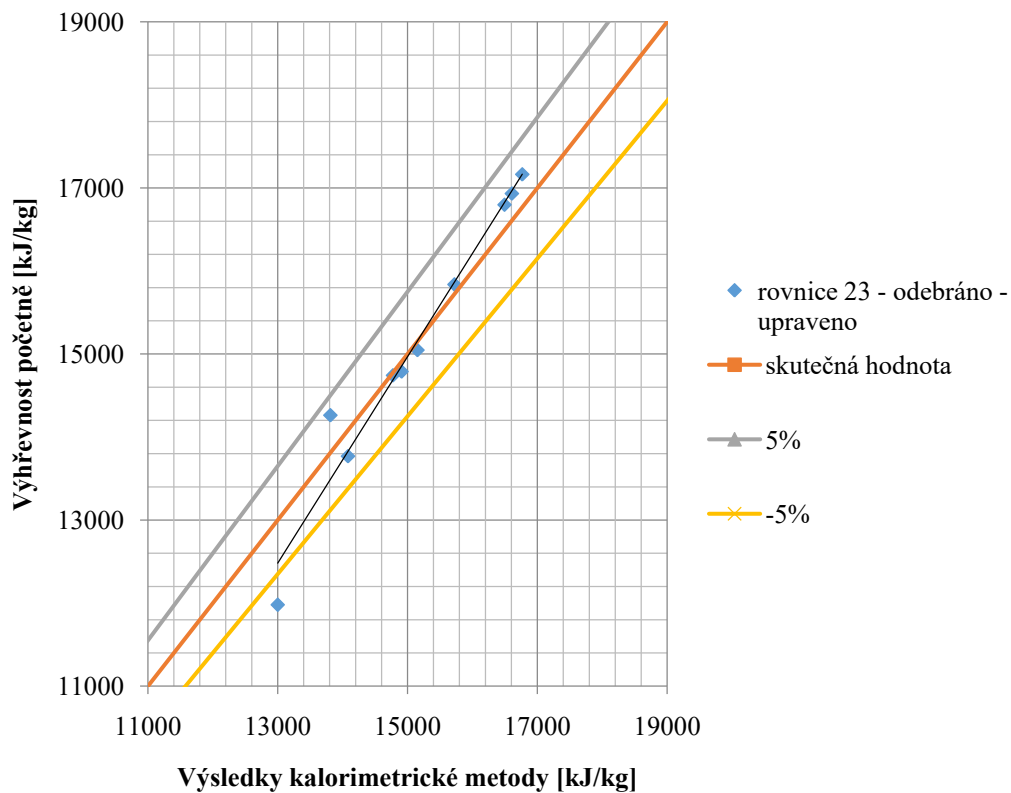
Po vynechání těchto čtyř druhů biomasy (len - odpad, lnička - semeno, hořčice - zrno, svetlice – semeno) a úpravě rovnice (20) dostaneme výslednou rovnici (45), jejíž hodnoty jsou v rozmezí požadovaných pěti procent a to v případě devíti z deseti zbylých vzorků. Při výpočtu původní rovnice pouze jedna hodnota odpovídala tomuto rozmezí. Níže je uvedena výsledná rovnice, která vznikla úpravou a její výsledky jsou zobrazeny pomocí grafu.

$$HHV = -1,3675 + 0,3137C + 0,7009H + 0,0318O^b - 1,556 \text{ [MJ/kg]} \quad (45)$$



Podobně na tom byla i rovnice (23), která po úpravě a vynechání těchto druhů biomasy (len - odpad, lnička - semeno, hořčice - zrna, svetlice – semeno) měla úspěšnost devíti vzorků z deseti, které se vešly do požadovaného rozmezí pěti procent. Z výsledků původní rovnice se ani jeden nepřiblížil ke skutečné hodnotě natolik, aby patřil do požadovaného rozmezí pěti procent. Níže je uvedena rovnice (46), která vznikla úpravou rovnice (23), a její výsledky zobrazeny pomocí grafu.

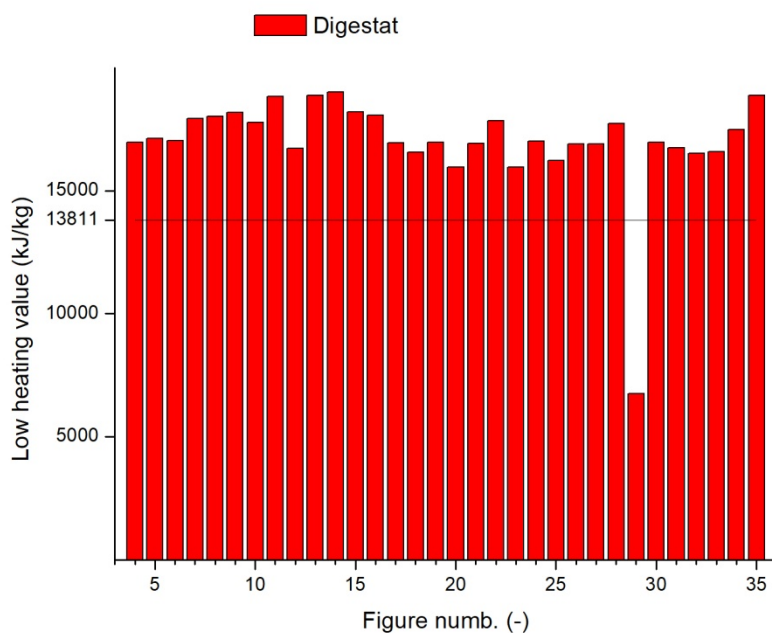
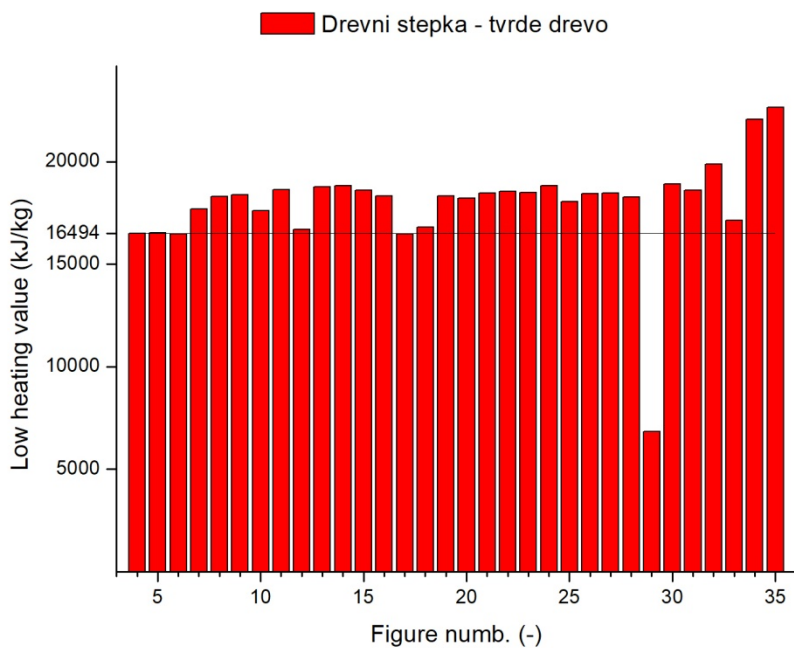
$$HHV = -0,763 + 0,301C + 0,525H + 0,064O - 1,6917 \text{ [MJ/kg]} \quad (46)$$



6.3.4 Sloupcové grafy

Ze sloupcových grafů, vytvořených pro každý vzorek zvlášť, je vidět, že docílení přesných výsledků u různých rovnic závisí především na druhu biomasy. Například pro vzorek „Dřevní štěpka – tvrdé dřevo“ a mu podobné, se skutečné hodnotě přiblížily výsledky sedmi rovnic. Ale pro jiné vzorky jako jsou například „Digestát“ nebo také „Žito – zrno“ se naměřené hodnotě výhřevnosti nepřiblížil výsledek ani jediné z použitých rovnic.

Po prohlédnutí těchto grafů je také viditelné, že rovnice (29) je ve všech případech úplně mimo skutečné hodnoty výhřevnosti, tudíž jde o nevyhovující rovnici.



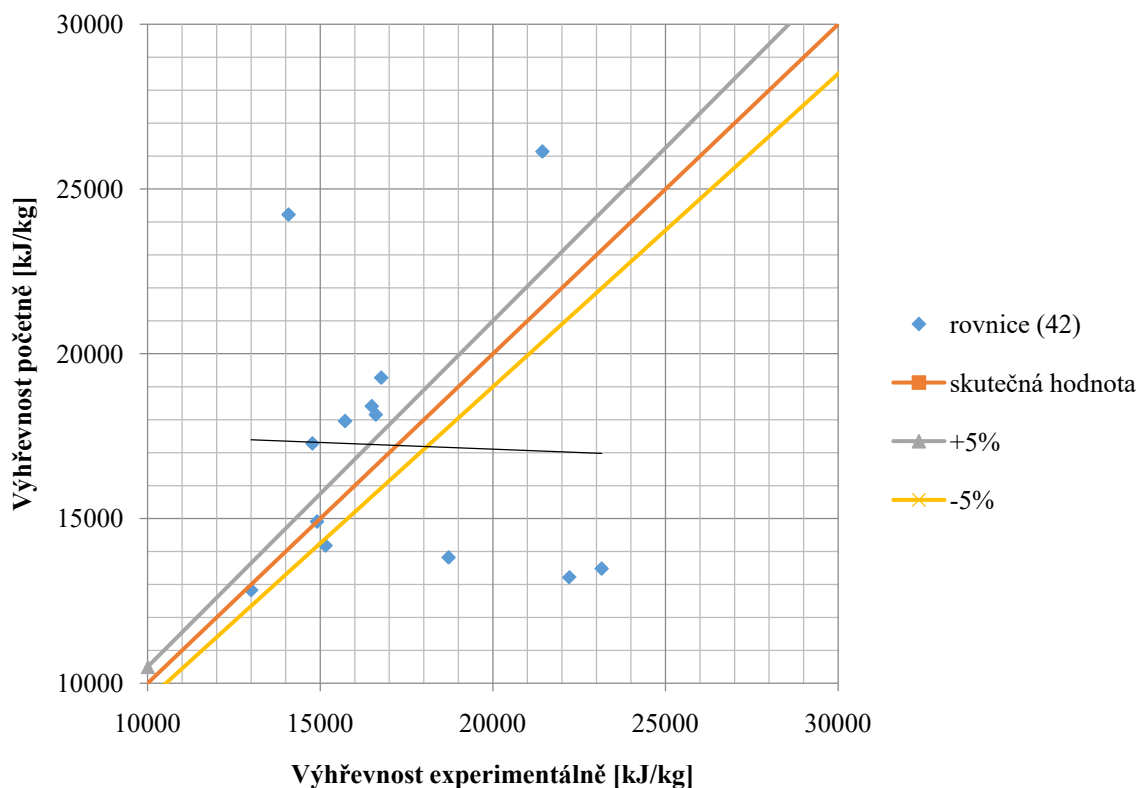
6.4 Vyhodnocení hrubého rozboru

Při vyhodnocování výsledků získaných výpočtem z hrubého rozboru bylo postupováno stejně jako při vyhodnocování výsledků získaných pomocí dat z prvkového rozboru. Výpočet výhřevnosti pomocí rovnic z hrubého rozboru nebylo hlavním cílem této práce, a tak je i vyhodnocení stručnější. Byla porovnáována data získaná z šesti různých rovnic.

Po vytvoření grafů bylo dospěno k závěru, že žádná z těchto rovnic není vhodná pro určování výhřevnosti. Výsledky jsou velmi vzdálené skutečným hodnotám výhřevnosti vzorků. Do rozmezí pěti procent od skutečných hodnot se u dvou rovnic vešly výsledky pouze dvou vzorků. U další jedné rovnice šlo o jeden vzorek a zbylé tři rovnice v tomto rozmezí nezaznamenaly jediný vzorek.

Podle vzhledu grafů se zdají být výsledky velmi nahodilé a neuspořádané.

Jako příklad uvádím graf rovnice (42), grafy ostatních rovnic jsou součástí příloh.



ZÁVĚR

Přesné určení výhřevnosti a spalného tepla různých druhů biomasy je důležitým aspektem především pro podniky, jako jsou například spalovny biomasy. Použití rovnice pro výpočet výhřevnosti nebo spalného tepla, může být velkou výhodou a zjednodušením v případě, že známe obsah všech prvků v daném palivu. Ovšem musíme mít jistotu, že nám tato rovnice ukáže pravdivou hodnotu.

Tato práce obsahuje vyhodnocení výsledků 32 rovnic pro výpočet výhřevnosti a spalného tepla z prvkového rozboru paliva. Výpočet byl proveden pro 14 různých druhů biomasy, u kterých byla provedena kalorimetrická zkouška a takto byla získána přesná hodnota spalného tepla u všech posuzovaných vzorků.

Po vyhodnocení dat bylo dospěno k závěru, že velmi záleží na druhu biomasy. Výsledky některých rovnic byly při výpočtu spalného tepla a výhřevnosti pro druhy biomasy na bázi dřeva velmi přesné, to však neplatilo pro zrna olejnatých plodin, v tomto případě šlo především o lničku, hořčici, len a svetlici.

Žádná z posuzovaných rovnic tedy určitě není vhodná pro všechny druhy biomasy. Některé rovnice jsou velmi nepřesné. Jako nejpřesnější rovnicí z posuzovaných rovnic pro výpočet jakéhokoliv druhu biomasy se ukázala rovnice (12). Velmi vhodnou by však mohla být upravená rovnice (44), která vznikla úpravou rovnice (18), nebo také rovnice (45), která vznikla úpravou rovnice (20) a není vhodná pro určování výhřevnosti u olejnatých plodin (len, lnička, svetlice, hořčice). Všechny rovnice jsou uvedeny výše.

Pokud bychom se chtěli dále zabývat tímto problémem, bylo by vhodné také zacílit na přesnější určení kalorimetrické hodnoty spalného tepla, respektive zvýšení počtu měření jednotlivých druhů biomasy a zároveň zvýšení počtu vzorků u jednotlivých druhů biomasy. Dále by mohl být použit software pro vytvoření rovnice na základě předem získaných údajů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] YIN, Chun-Yang. Prediction of higher heating values of biomass from proximate and ultimate analyses. *Sciencedirect.com*[online]. ©2010 [cit. 2019-03-8] Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236110006460>
- [2] ELBL, P. *Degradace biomasy při skládkování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 45 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Lisý, Ph.D.
- [3] ZÁRYBNICKÁ, M. *Návrh sušky na biomasu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 84 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Marek Baláš, Ph.D.
- [4] ČERNÝ, Václav, Břetislav JANEBA a Jiří TEYSSLER. *Parní kotle*. Praha: SNTL, 1983, 858 s.
- [5] BALÁŠ, Marek. *Kotle a výměníky tepla*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013, 119 s. ISBN 978-80-214-4770-7.
- [6] Biomasa. *oze.tzb-info.cz* [online] ©2019 [cit. 2019-03-12] Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/biomasa>
- [7] ČSN ISO 1928. *Tuhá paliva – Stanovení spalného tepla kalorimetrickou metodou v tlakové nádobě a výpočet výhřevnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010, 56 s. Třídící znak 44 1352
- [8] HELMENSTINE, Anne Marie, *Calorimeter Definition in Chemistry*, *thoughtco.com* 12. 3. 2018 [cit. 20. 3. 2019] Dostupné z: <https://www.thoughtco.com/definition-of-calorimeter-in-chemistry-604397>
- [9] *Spalovací kalorimetrie*, *ufch.vscht.cz*, [online], 24. 9. 2013 [cit. 6. 3. 2019] Dostupné z: https://ufch.vscht.cz/files/uzel/0014043/Uloha_SPK.pdf?redirected
- [10] Stanovení spalného tepla a výpočet výhřevnosti materiálů podle ČSN 44 1352, ČSN EN ISO 1716, *fbiweb.vsb.cz* [online], [cit. 15. 3. 2019]. Dostupné z: https://fbiweb.vsb.cz/materialy/NM/pdf/spalene_teplo.pdf
- [11] RÉDR, Miroslav a Miroslav PŘÍHODA. *Základy tepelné techniky*. Praha: SNTL, 1991, 677 s. ISBN 8003003660.

- [12] Elementární rozbor tuhých paliv, výpočet spalného tepla a výhřevnosti ze složení, Studijní obor Chemie a technologie paliv a prostředí, [cit. 13. 3. 2019]. Dostupné z: https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi7jrrwoNrgAhWSalAKHbV-AKUQFjAAegQIChAC&url=http%3A%2F%2Fold.vscht.cz%2Fmain%2Fstudenti%2Frp%2F2008%2F236.Valentova.ZZ08_priloha4.doc&usg=AOvVaw3aoB9aCdeYSNk7b3bJRFwv
- [13] WICHTERLE, Kamil a KOUTNÍK, Ivan. *Technologie a analýza paliv*. [online] Vyd. 1., 2013, 138 s. ISBN 978-80-248-3344-6. [cit. 2. 3. 2019]. Dostupné z: http://katedry.fmfi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/01_Procesni_inzenyrstvi/05_Technologie_a_analyza_paliv/Wichterle_Technologie_a_analyza_paliv.pdf
- [14] FRIEDL, A., PADOUVAS, E., ROTTER, H. a VARMUZA, K. Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition. *Sciencedirect.com* [online]. ©2005 [cit. 2019-03-8] Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003267005000735>
- [15] NHUCHHEN, Daya Ram a AFZAL, Muhammad T. HHV Predicting Correlations for Torrefied Biomass Using Proximate and Ultimate Analyses. *ncbi.nlm.nih.gov* [online]. ©2017 [cit. 2019-03-14] Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5590445/>
- [16] LAINKA, P. *Metody pro určování vlastností biomasy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 51 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michaela Hrnčířová.
- [17] Phyllis2, database for biomass and waste, <https://phyllis.nl/> [online], ©2019 ECN.TNO [cit. 27. 3. 2019]
- [18] Přístroj Parnas Wagner, verkon.cz [online], ©2009-2019 [cit. 27. 3. 2019]. Dostupné z: <https://www.verkon.cz/pristroj-parnas-wagner-zabrouseny-simax/#>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
w_d	obsah vody ve vzorku – dřevozpracující průmysl	[%]
w_e	obsah vody ve vzorku – energetický průmysl	[%]
m_p	původní váha vzorku	[g]
m_o	váha vysušeného vzorku	[g]
Q_s	spalné teplo	[MJ/kg]
Q_i	výhřevnost	[MJ/kg]
r	hodnota výparného tepla vody	[MJ/kg]
W^r	obsah vody v palivu	[%]
A^r	obsah popeloviny v palivu	[%]
h	obsah hořlaviny v palivu	[%]
H	obsah vodíku v surovém palivu	[%]
C_{dr}	obsah uhlíku ve vysušeném vzorku	[%]
H_{dr}	obsah vodíku ve vysušeném vzorku	[%]
N_{dr}	obsah dusíku ve vysušeném vzorku	[%]
O_{dr}	obsah kyslíku ve vysušeném vzorku	[%]
S_{dr}	obsah síry ve vysušeném vzorku	[%]
HHV	spalné teplo	[MJ/kg]
LHV	výhřevnost	[MJ/kg]
C	obsah uhlíku ve vzorku	[%]
H	obsah vodíku ve vzorku	[%]
O	obsah kyslíku ve vzorku	[%]
S	obsah síry ve vzorku	[%]
W	obsah vody ve vzorku	[%]
N	obsah dusíku ve vzorku	[%]
A	obsah popele ve vzorku	[%]
m_{pop}	hmotnost popele	[g]
m_{sv}	hmotnost suchého vzorku	[g]
Ash	obsah popele ve vzorku	[%]
VM	obsah prchavé hořlaviny ve vzorku	[%]
FC	obsah uhlíku v hořlavině	[%]

Zkratky

OZE – obnovitelné zdroje energie

BSP – bioplynová stanice

E85 – biopalivo na bázi etanolu

SMN30 – typ bionafty

B100 – typ bionafty

ČOV – čistírny odpadních vod

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 0.1 - Závislost výhřevnosti na obsahu vody [3].

Obr. 2.3.1 - Kalorimetr [8]

Obr. 3.2.1 - Analýza vodíku a uhlíku [13]

Obr. 3.3.1 - Přístroj Parnas Wagner [17]

Obr. 6.1.1 - Analytické váhy

Obr. 6.1.2 - Tlaková nádoba

Obr. 6.1.3 - Napouštěcí stanice

Obr. 6.1.4 - Lis na peletky

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.3.1 – Ukázka spalných tepel některých druhů biomasy [17]

Tab. 3.6.1 – Ukázka hodnot z prvkového rozboru několika druhů biomasy [1]

Tab. 5.0.1 – Hrubý rozbor [5]

Tab. 6.2.1 – Naměřené hodnoty

Tab. 6.2.2 – Spalné teplo a výhřevnost

Tab. 6.2.3 – Spalné teplo a výhřevnost

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Grafy – Prvkový rozbor

Příloha 2 – Grafy – Hrubý rozbor