

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra technologických zařízení staveb



Bakalářská práce

**Zhodnocení malých spalovacích zařízení určených
pro vytápění rodinných domků**

Jan Michalička

© 2021 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jan Michalička

Procesní inženýrství
Technologická zařízení staveb

Název práce

Zhodnocení malých spalovacích zařízení určených pro vytápění rodinných domků

Název anglicky

Evaluation of small combustion plants intended for heating of family houses

Cíle práce

Cílem bakalářské práce je seznámit se s problematikou malých spalovacích zařízení určených pro vytápění rodinných domků. Provést literární rešerši na danou problematiku a uskutečnit tepelně-emisní měření.

Dále uskutečnit teoretickou a laboratorní analýzu vybraných vzorků biopaliv pro jejich tepelně-energetické využití v malém spalovacím zařízení.

Metodika práce vychází z určených klasifikačních, jakostních a specifikačních rámců malých spalovacích zařízení tuhých biopaliv pro jejich energetické využití. Praktická část práce zahrnuje uskutečnit prvkové, tak i tepelně-emisní měření na vybraných vzorcích tuhých biopaliv.

Metodika

Bakalářská práce se bude skládat z těchto částí:

1. Úvod
2. Cíl práce a metodika
3. Přehled poznatků z literatury
4. Výchozí podmínky řešení
5. Měření a dosažené výsledky
6. Diskuse a závěry
7. Seznam literatury
8. Přílohy

Doporučený rozsah práce

40-50

Klíčová slova

Biomasa, kalorimetr, prvkový rozbor, emise

Doporučené zdroje informací

Malaťák, J.; Jevič, P.; Vaculík, P.: Účinné využití tuhých biopaliv v malých spalovacích zařízeních s ohledem na snižování emisí znečišťujících látek. 2010, Powerprint, Praha, pp. 240, ISBN 978-80-87415-02-3

Malaťák, J.; Vaculík, P.: Biomasa pro výrobu energie. ČZU v Praze, Technická fakulta, tisk. Powerprint, Praha 2008, 206 s., ISBN: 978-80-213-1810-6

Obroučka, K.: Termické zneškodňování odpadů. VŠB Ostrava, Ostrava 1997, 140 s.

Pastorek, Z.; Kára, J.; Jevič, P.: Biomasa – obnovitelný zdroj energie, nakladatelství FCC Public, Praha 2004, 284 str., ISBN 80-86534-06-5

Směrnice Evropského Parlamentu a Rady 2009/28/EC o podpoře užívání energie z obnovitelných zdrojů a o změně a následném zrušení směrnic 2001/77/ES a 2003/30/ES. Štrasburk, 23.4.2009 (OR. en)

Předběžný termín obhajoby

2019/2020 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Jan Malaťák, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra technologických zařízení staveb

Elektronicky schváleno dne 3. 10. 2019

doc. Ing. Jan Malaťák, Ph.D.
Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 19. 2. 2020

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.
Děkan

V Praze dne 23. 11.2020

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Zhodnocení malých spalovacích zařízení určených pro vytápění rodinných domků" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 12.05.2021

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval svému vedoucímu práce doc. Ing. Janu Malaťákovi, Ph.D. za jeho cenné rady a konzultace při tvorbě bakalářské práce, a také za poskytnutí možnosti realizovat měření v laboratoři analýzy organických materiálů.

Zhodnocení malých spalovacích zařízení určených pro vytápění rodinných domků

Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřena na biomasu určenou pro spalování v malých spalovacích zařízeních a na ně samotné. Práce se skládá ze dvou částí, v první teoretické části je popsána problematika biomasy a její druhy, úpravy, složení a vlastnosti, dále proces spalování a základní rozdělení malých spalovacích zařízení. V praktické části jsou zkoumány vzorky štípaného smrkového dřeva, tvrdých dřevěných briket, měkkých dřevěných briket, dřevěných pelet a jemné dubové štěpky. U vzorků jsou uskutečněny prvkové a stechiometrické analýzy. Uskutečněné výsledky termochemických vlastností ukazují např. výhřevnost všech pěti vybraných paliv se pohybuje mezi 18,24 a 18,94 MJ.kg⁻¹ a výsledky stechiometrických výpočtů ukazují, že měkké brikety a pelety se mohou zaměnit bez významných změn provozních parametrů spalovacího zařízení.

Klíčová slova: biomasa; kalorimetr; prvkový rozbor; emise

Evaluation of small combustion plants intended for heating of family houses

Abstract

The bachelor thesis is focused on small combustion plants and on biomass intended for combustion in those plants. The thesis consists of two parts; the first theoretical part describes biomass and its types, modifications, composition, and properties. Further the thesis describes the process of combustion and defines small combustion plants types. The practical part of thesis examines samples of chopped spruce wood, hardwood briquettes, softwood briquettes, wood pellets, and fine oak chips. Elemental and stoichiometric analysis are performed on those samples. The results of thermochemical properties show us that the calorific value of all five selected fuels is between 18.24 and 18.94 MJ.kg⁻¹. The effects of stoichiometric calculations give us a proof that soft briquettes and pellets can be interchanged without significant changes in the operating parameters of the combustion plant.

Keywords: biomass; calorimeter; element analysis; emissions

Obsah

1 Úvod	1
2 Cíl práce a metodiky	2
3 Přehled poznatků z literatury	3
3.1 Biomasa	3
3.1.1 Vznik biomasy	3
3.1.2 Výhody a nevýhody biomasy	3
3.1.3 Dělení biomasy	4
3.1.4 Obchodovatelná forma biopaliv	10
3.2 Úprava biomasy	10
3.2.1 Stříhací zařízení	10
3.2.2 Sekačky	11
3.2.3 Drtiče	11
3.2.4 Štěpkovače	11
3.2.5 Paketování	11
3.2.6 Briketování a peletování	12
3.3 Složení a vlastnosti tuhých biopaliv	13
3.3.1 Prvky hořlavé části tuhých biopaliv	14
3.3.2 Obsah vody v tuhých palivech	15
3.3.3 Obsah popela v tuhých palivech	16
3.3.4 Obsah síry v tuhých palivech	16
3.3.5 Spálené teplo a výhřevnost tuhých paliv	16
3.3.6 Prchavá hořlavina	17
3.3.7 Charakteristické teploty popela	17
3.4 Získávání energie z biomasy	18
3.4.1 Spalování	18
3.4.2 Karbonizace	19
3.4.3 Pyrolýza	19
3.4.4 Zplyňování	20
3.5 Spalovací zařízení	20
3.5.1 Lokální zdroje vytápění	21
3.5.2 Centrální zdroje vytápění	24

3.6	Legislativa ovlivňující spalovací zařízení	30
4	Výchozí podmínky řešení	31
4.1	Použitá zařízení	31
4.2	Použité vzorky.....	34
4.3	Stechiometrie.....	35
4.4	Spotřeba vzduchu a množství spalin	35
4.5	Spalování tuhých a kapalných odpadů.....	39
4.5.1	Hmotnostní spalování	40
4.5.2	Objemové spalování	41
5	Měření a dosažené výsledky	43
5.1	Výsledky elementární analýzy	43
5.2	Výsledky stechiometrické analýzy.....	48
6	Závěr	56
7	Seznam literatury	57
8	Seznam příloh.....	60

Seznam tabulek

Tabulka 1	– hlavní obchodovatelné formy tuhých paliv	10
Tabulka 2	– objemové a hmotnostní složení suchého vzduchu.....	38
Tabulka 3	– molekulové hmotnosti prvků v hořlavině	38
Tabulka 4	– zjištěné vlastnosti paliv v suchém stavu a vlhkost v původním stavu.....	43
Tabulka 5	– výsledné hodnoty stechiometrické analýzy smrkového dřeva.....	49
Tabulka 6	– výsledné hodnoty stechiometrické analýzy pelet	51
Tabulka 7	– výsledné hodnoty stechiometrické analýzy měkkých briket	52
Tabulka 8	– výsledné hodnoty stechiometrické analýzy tvrdých briket.....	54
Tabulka 9	– výsledné hodnoty stechiometrické analýzy dubové štěpky	55

Seznam obrázků

Obrázek 1 - schéma klasifikace původu a zdrojů dřevní biomasy	5
Obrázek 2 – schéma klasifikace původu a zdrojů bylinné biomasy	7
Obrázek 3 – schéma klasifikace původu a zdrojů ovocné biomasy	8
Obrázek 4 – schéma klasifikace původu a zdrojů vodní biomasy	9
Obrázek 5 – možnosti odvodu spalin.....	21
Obrázek 6 – schématický rozdíl mezi krbem, krbovými kamny a krbovou vložkou	22
Obrázek 7 – řez prohořivacím a odhořivacím kotlem	26
Obrázek 8 – řez zplyňovacím kotlem	27
Obrázek 9 – kotel s odebráním pelet z oddělené místnosti	28
Obrázek 10 – soubor zařízení na spalování slámy.....	29
Obrázek 11 – střížný mlýn Retsch SM 100	31
Obrázek 12 – laboratorní váha Sartorius SP124 S.....	31
Obrázek 13 – elementární analyzátor LECO CHN628	32
Obrázek 14 – termogravimetrický analyzátor LECO TGA-701	33
Obrázek 15 – kalorimetr LECO AC-600.....	34
Obrázek 16 – vzorky použité při měření, zleva štípané smrkové dřevo, dřevěné brikety – tvrdé, dřevěné brikety – měkké, dřevěné pelety a úplně napravo jemná dubová štěpka.....	34
Obrázek 17 – porovnání paliv v suchém a původním stavu pro prvky – uhlík, kyslík a vodík	45
Obrázek 18 – porovnání paliv v suchém a původním stavu pro popel a dusík	45
Obrázek 19 – porovnání paliv v suchém a původním stavu pro spálené teplo a výhřevnost	46
Obrázek 20 – porovnání obsahu popela.....	47
Obrázek 21 – porovnání výhřevnosti.....	47

1 Úvod

Zásobování palivy a energiemi je problematické z důvodu rostoucí populace, rostoucí spotřeby energie, rychlého úbytku fosilních paliv, zdánlivě pomalého technického pokroku v objevování nových zdrojů energie (zejména obnovitelných) a negativních dopadů na životní prostředí. Světová populace od 17. století vzrostla více než 12krát, tím se tedy výrazněji zvýšila i spotřeba energie. [1]

Tuhá paliva se používají již odedávna a používají se doposud. S příchodem plynofikace se vytápění tuhými palivy snížilo. Přejít se značně projevil v městských výtopnách a teplárnách, zejména kvůli ekologickým požadavkům na zlepšení čistoty ovzduší. K tomuto kroku přistoupilo také mnoho majitelů rodinných domů a přešlo z uhlí na plyn, který se postupně stal tradičním vytápěním. Ekonomická situace je a bude vždy zásadní, tak tomu je i u cen za topení. Po roce 1990 se zvýšily ceny všech druhů paliv a lidé si vybírali mezi dražším vytápěním elektrinou a plynem a levnějším vytápěním tuhými palivy. Lidé dávali často přednost pohodlnému vytápění plynem. V mnoha rodinách figurují nezaměstnaní členové, a proto se vrací k levnějšímu vytápění uhlím nebo dřevem. V České republice je řádově milion kotlů, krbů, kamen a sporáků na tuhá paliva, oproti tomu tepelných čerpadel a solárních zařízení je pouze několik stovek, možná tisíc. [2]

2 Cíl práce a metodiky

Cílem bakalářské práce je seznámit se s problematikou biomasy, s jejím složením a vlastnostmi a s malými spalovacími zařízeními, která jsou určena pro vytápění rodinných domků. Provést literární rešerši na danou problematiku. Dále uskutečnit prvkovou analýzu pěti vybraných vzorků biopaliv a provést stechiometrické výpočty spalovacích procesů, které doplňují charakteristiky paliva. Výstupem bude zjištění tepelně-emisní vlastnosti vybraných paliv určených pro spalování v malých spalovacích zařízeních.

Metodika práce vychází z určených klasifikačních, jakostních a specifikačních rámců malých spalovacích zařízení tuhých biopaliv pro jejich energetické využití. V praktické části práce se v laboratoři analýzy organických materiálů katedry technologických zařízení staveb uskuteční analýzy pěti vybraných vzorků dřevní biomasy – štípaného smrkového dřeva, tvrdých dřevěných briket, měkkých dřevěných briket, dřevěných pelet a jemné dubové štěpky. U vzorků se bude zkoumat spálené teplo, výhřevnost, vlhkost, popel a elementární složení (obsah uhlíku, vodíku a dusíku). Po uskutečnění měření se provedou stechiometrické výpočty, tedy výpočet spotřeby vzduchu a množství spalín a hmotnostní a objemové spalování.

3 Přehled poznatků z literatury

3.1 Biomasa

Biomasou označujeme látku původně produkovanou biologickými procesy jako jsou pěstování rostlin v půdě i ve vodě, chov živočichů či organická produkce a její odpad. Bývá účelově získávána dvojitým způsobem, a to jako výsledek výrobní činnosti nebo využitím odpadu z výroby (zemědělská, potravinářská a lesní), komunálního hospodářství, péče a údržby krajiny. Roční produkce biomasy celého světa je podle teoretických výpočtů odborníků v řádech 100 miliard tun. Její energetický potenciál nabývá okolo 1 400 EJ, přičemž spotřeba fosilních paliv za stejné období vychází na 300 EJ. [1]

3.1.1 Vznik biomasy

Na Zemi jsou zásoby biomasy rozloženy nepravidelně. K vytváření biomasy je nezbytná sluneční energie a voda, a proto je v důsledku malého přísunu sluneční energie v severních oblastech minimum biomasy. Dalším problémem je tvorba biomasy v oblastech s nedostatkem vody. Rostliny mění sluneční světlo v biomasu přirozeně chemickými procesy jako je fotosyntéza, která v rostlinách přeměňuje oxid uhličitý, vodu a pomocné látky (např. nerosty) na biomasu a kyslík. Téměř všude kyslík nacházející se v zemské atmosféře vznikl jako odpad při tvorbě biomasy. Účinnost již zmíněných chemických procesů se dá vypočítat jako podíl výhřevnosti usušené biomasy a množstvím sluneční energie, která byla potřeba k růstu dané rostliny. Tyto výpočty můžeme využít například k porovnání účinnosti s jinými obnovitelnými zdroji. [3]

3.1.2 Výhody a nevýhody biomasy

Za výhody biomasy považujeme její obnovitelnost, šetrnost k životnímu prostředí a to, že při jejím spalování vzniká málo popela, který je možné využít dále ke hnojení. Další výhodou biomasy je její získávání zpracováním odpadu z průmyslu či zemědělství a její lokální neomezenost, díky níž není potřeba dovozu. Nevýhody jsou menší výhřevnost oproti ostatním druhům paliva, nutnost využití skladů a velké plochy pro vypěstování, konkurence v použití biomasy v potravinářském průmyslu, nucené snížení vlhkosti, horší manipulace a nutnost příkládání. [2]

3.1.3 Dělení biomasy

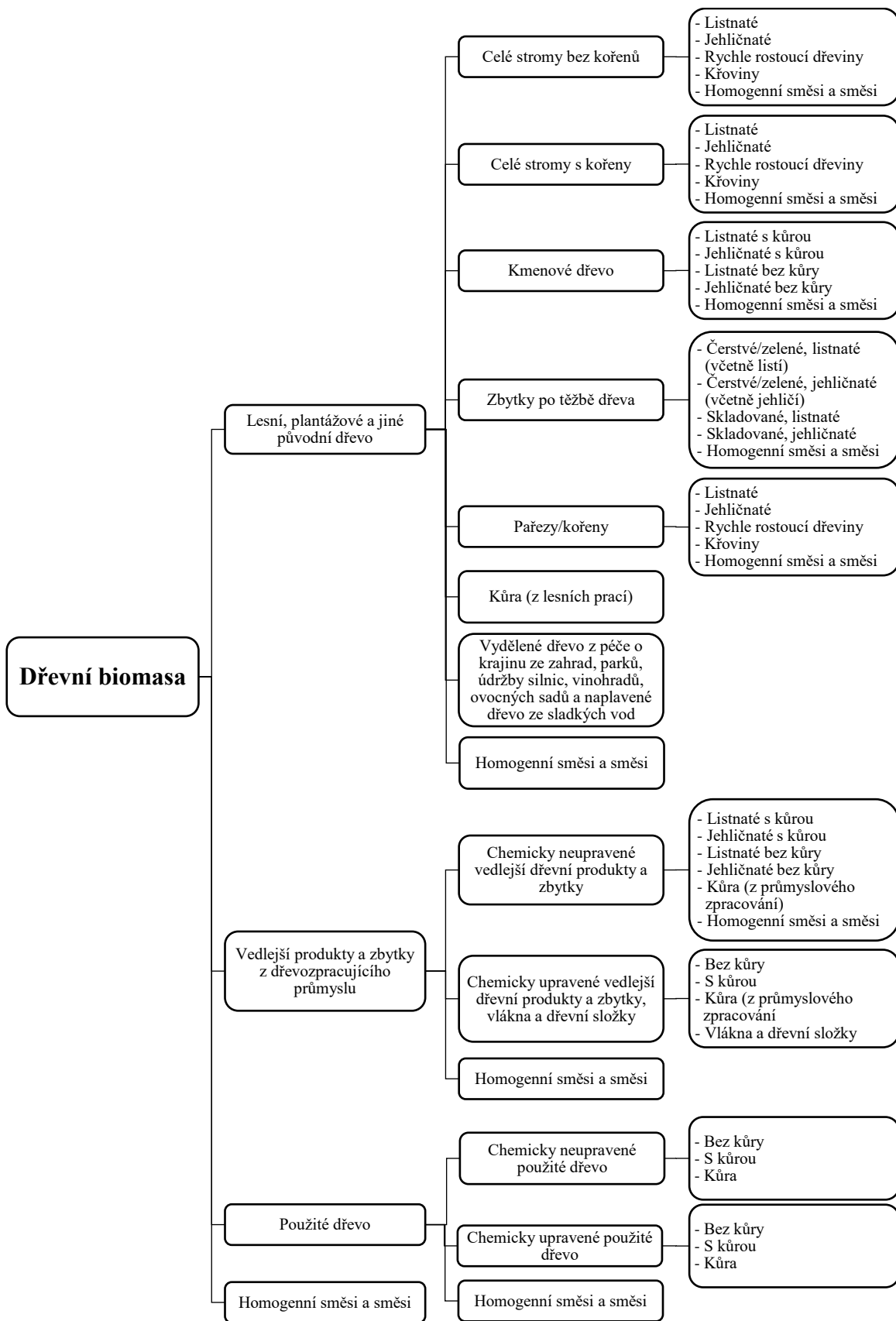
Biomasu dělíme do několika kategorií definovaných normou ČSN EN ISO 17225-1 s názvem Tuhá biopaliva – Specifikace a třídy paliv. Norma pojednává o kvalitě a specifikaci tuhých biopaliv z opracovaných nebo neopracovaných materiálů vyprodukovaných z lesnictví, parků, zemědělství, zahradnictví a akvakultury. Materiál upravený chemicky by měl obsahovat halogenované organické sloučeniny a těžké kovy o koncentraci jako materiál původní nebo nepřekročit hodnoty koncentrace materiálu v zemi jeho původu. Hlavními kategoriemi tuhých biopaliv jsou: dřevní biomasa, bylinná biomasa, ovocná biomasa, vodní biomasa, směsi a příměsi. [4]

3.1.3.1 Dřevní biomasa

Biomasu ze stromů, keřů a křovin označujeme pojmem dřevní biomasa. Ta je kategorizována do čtyř skupin, které jsou následně děleny do několika podskupin. Přesné znění rozdělení dřevní biomasy graficky znázorňuje obrázek 1 níže. [4]

Jedná se o nejčastěji využívanou biomasu jako biopalivo, tudíž bude předmětem výzkumu v praktické části této bakalářské práce.

Obrázek 1 - schéma klasifikace původu a zdrojů dřevní biomasy



Zdroj: vlastní zpracování v souladu s normou ČSN EN ISO 17225-1

Lesní, plantážové a jiné původní dřevo

Pod pojmem lesní, plantážové a jiné původní dřevo si můžeme představit všechno dřevo z lesů, parků, zahrad, plantáží a rychle rostoucí stromy. Dovolené úpravy tohoto dřeva jsou pouze zmenšení velikosti jeho částic, odkornění, sušení a zvlhčení. [5]

Vedlejší produkty a zbytky z dřevozpracujícího průmyslu

Tato kategorie zahrnuje vedlejší dřevní produkty a dřevní zbytky z dřevozpracujícího průmyslu, a to buď bez chemické úpravy, nebo s ní. Bez chemické úpravy se jedná pouze o zbytky například z odkornění, řezání, tvarování a dělení stromů a lisování apod. Za chemicky upravené dřevní zbytky z výrobních desek a nábytku považujeme ty, které jsou upraveny lepidlem, barvou, nátěrem, lakem apod. Chemikálie použité při úpravě nesmí obsahovat těžké kovy nebo halogenové organické sloučeniny, jež jsou obsaženy v konzervačních prostředcích a nátěrech. [5]

Použité dřevo

Použité dřevo značí odpad dřeva od zákazníků či společností v původním stavu, nebo mechanicky upravené a znehodnocené dřevo pouze na nevýznamné ploše. Příkladem této skupiny je může být paleta, krabice a dřevěné odpady. Dřevo by rovněž jako v předešlé kategorii „Vedlejší produkty a zbytky z dřevozpracujícího průmyslu“ při použití chemické úpravy nemělo obsahovat těžké kovy nebo halogenové organické sloučeniny. [4]

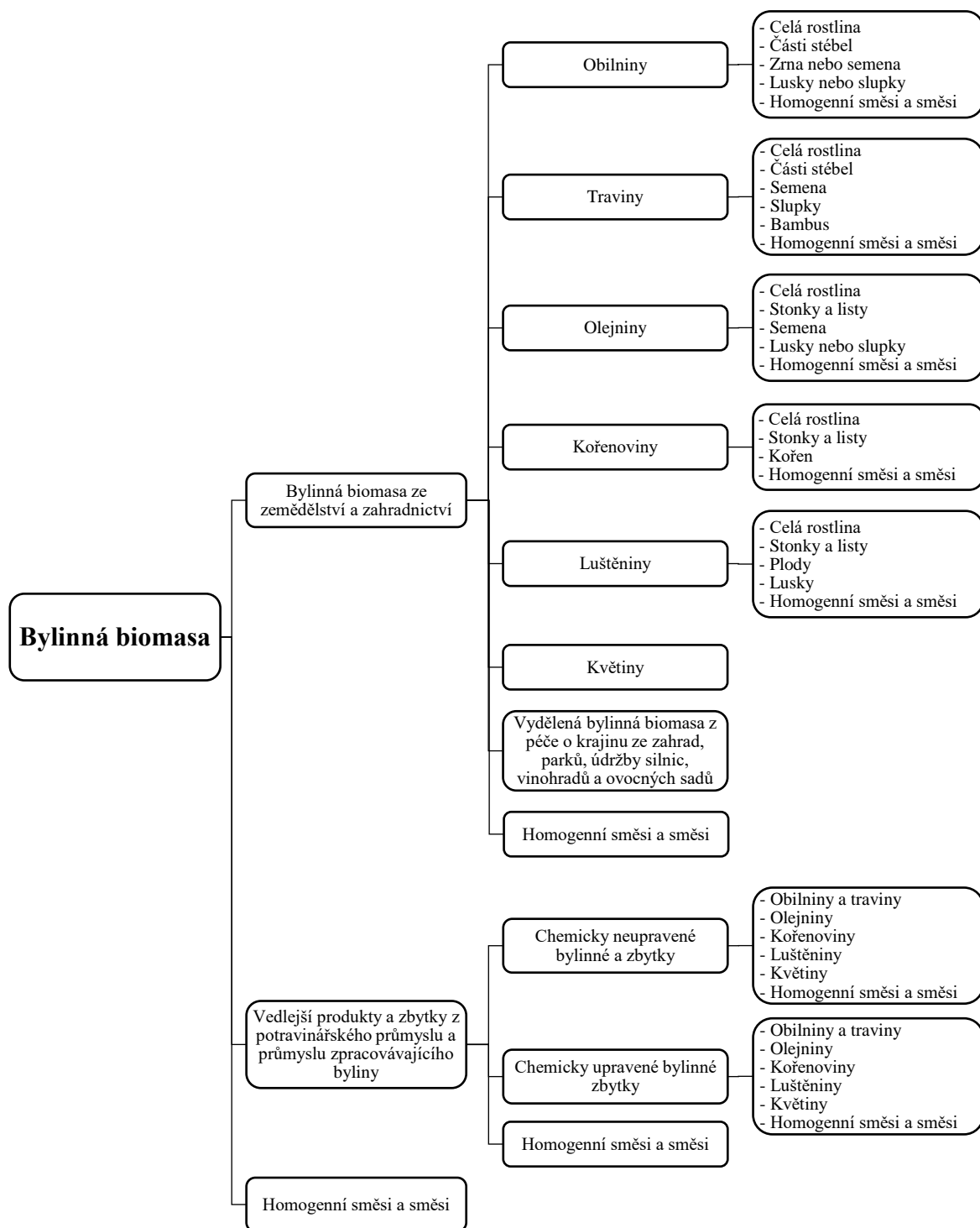
Homogenní směsi a směsi

Další skupinu dřevní biomasy tvoří homogenní směsi vznikající úmyslným mísením a směsi tří kategorií zmíněných výše vznikající neúmyslným mísením. [4]

3.1.3.1 Bylinná biomasa

Bylinnou biomasou označujeme rostliny bez dřevinného stonku, odumírající po vegetační době. Zde spadají zrniny a jejich vedlejší produkty ve formě cereálií. Detailní rozdělení do tří podkategorií nalezneme na obrázku 2 níže. [4]

Obrázek 2 – schéma klasifikace původu a zdrojů bylinné biomasy



Zdroj: vlastní zpracování v souladu s normou ČSN EN ISO 17225-1

Bylinná biomasa ze zemědělství a zahradnictví

Jedná se o biomasu přicházející rovnou z pole, včetně té, již skladované. Řadíme zde všechny materiál ze zemědělských a zahradních polí a ze zahrad a parků. Její přípustné úpravy jsou pouze zmenšení jejich částic, kterého můžeme docílit také sušením. [4]

Vedlejší produkty a zbytky z potravinářského průmyslu a průmyslu zpracovávajícího byliny

Tato bylinná biomasa vzniká jako její zbytek při průmyslových procesech, kterými prochází. Jako příklad můžeme uvést vznik zbytků cukrové řepy při výrobě cukru a vznik zbytků ječného sladu při výrobě piva. [6]

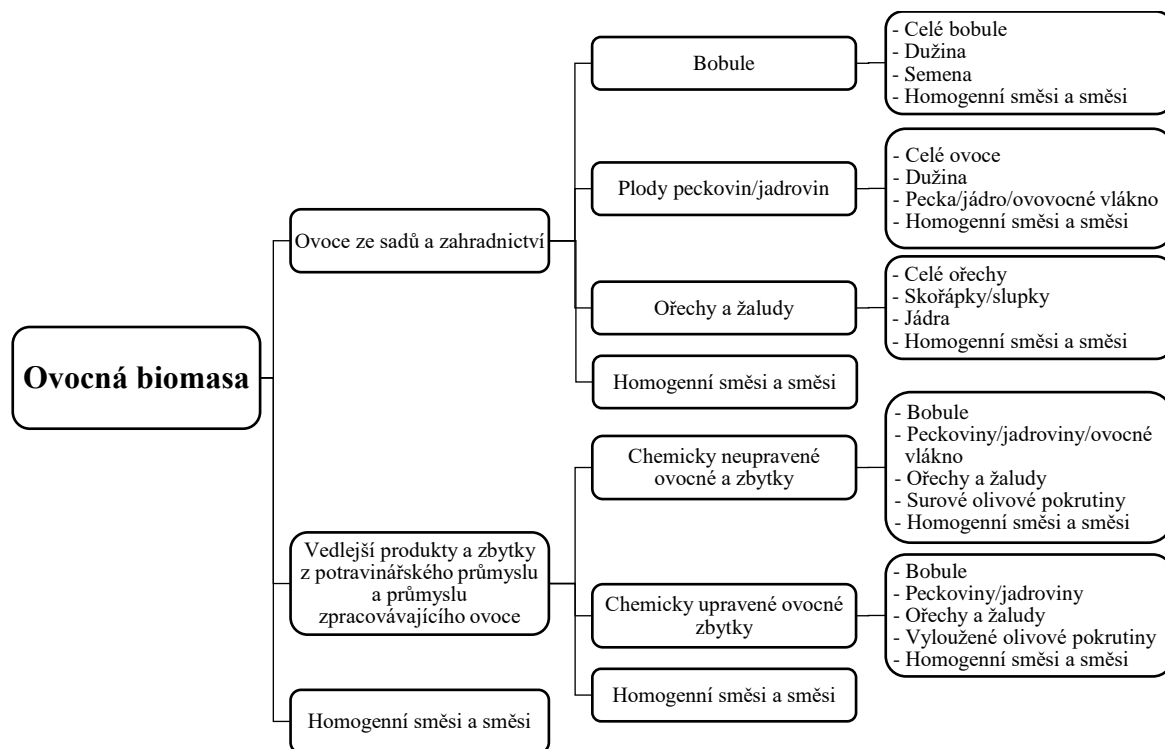
Homogenní směsi a směsi

Další skupinu bylinné biomasy tvoří homogenní směsi vznikající úmyslným mísením a směsi dvou kategorií zmíněných výše vznikající neúmyslným mísením. [4]

3.1.3.2 Ovocná biomasa

Ovocná biomasa je materiál částí rostlin skládajících se ze semen nebo obsahující semena. [4]

Obrázek 3 – schéma klasifikace původu a zdrojů ovocné biomasy



Zdroj: vlastní zpracování v souladu s normou ČSN EN ISO 17225-1

Ovoce ze sadů a zahradnictví

Tato skupina zahrnuje ovoce ze stromů a křovin a plody bylin, jako jsou rajčata. [5]

Vedlejší produkty a zbytky z potravinářského průmyslu a průmyslu zpracovávajícího ovoce

Zde se nachází materiál vytvářený jako zbytek z ovocné biomasy procházející průmyslovými procesy. Typickým příkladem jsou nevylišované zbytky oliv vytvářeny při lisování oleje či zbytky jablek vytvářeny při lisování džusu. [6]

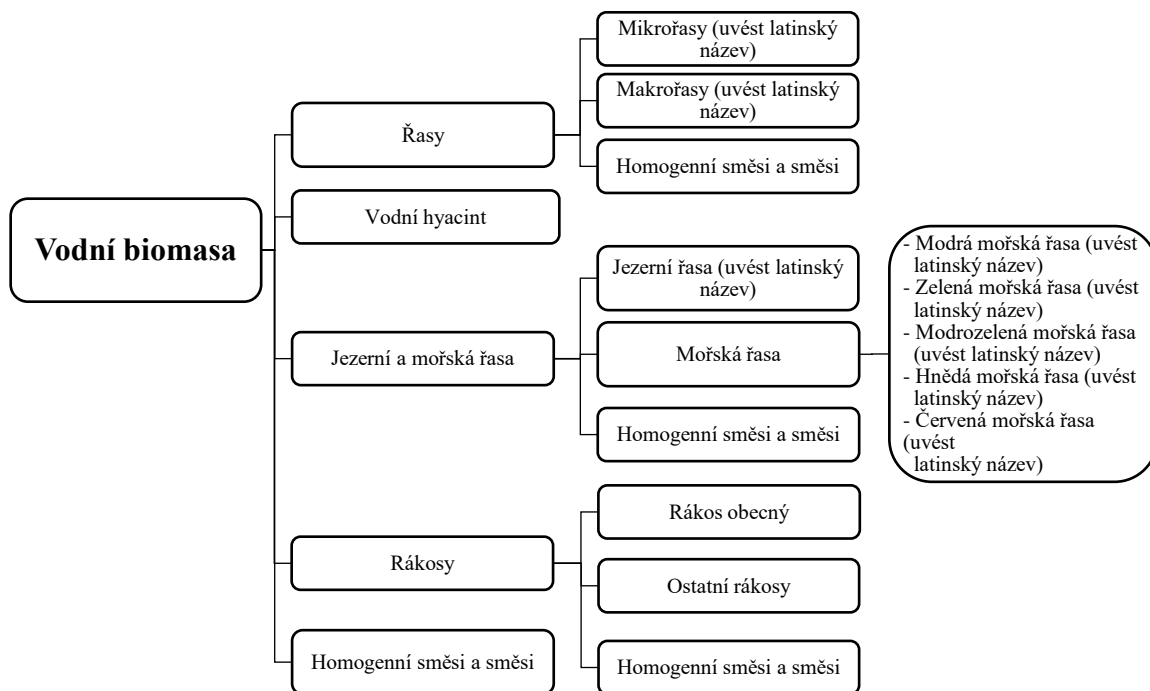
Homogenní směsi a směsi

Další skupinu ovocné biomasy tvoří homogenní směsi vznikající úmyslným mísením a směsi dvou kategorií zmíněných výše vznikající neúmyslným mísením. [4]

3.1.3.3 Vodní biomasa

Vodní biomasa je biomasa z rostlin uzpůsobených k životu ve vodě nebo na hladině. Tyto rostliny nazýváme vodní nebo také hydrofyty. Hlavními zástupci jsou řasy, vodní hyacint, jezerní a mořské řasy a rákosy. Obrázek 4 níže rozděluje vodní biomasu detailněji. [4]

Obrázek 4 – schéma klasifikace původu a zdrojů vodní biomasy



Zdroj: vlastní zpracování v souladu s normou ČSN EN ISO 17225-1

3.1.3.4 Homogenní směsi a směsi

Tuto kategorii biomasy tvoří homogenní směsi vznikající úmyslným mísením a směsi dřevní, rostlinné, ovocné a vodní biomasy vznikající neúmyslným mísením. [4]

3.1.4 Obchodovatelná forma biopaliv

Obchodovatelné formy tuhých biopaliv jsou různé. Základním faktorem ovlivňující manipulaci a samotné hoření biopaliv je jejich rozměr. Nejčastější formy biopaliv vymezuje tabulka 1 níže. [2]

Tabulka 1 – hlavní obchodovatelné formy tuhých paliv

Název paliva	Typická velikost částic	Běžná metoda přípravy
Celé dřevo	> 500 mm	Řezáním ostrými nástroji
Dřevní štěpky	5 mm až 100 mm	Řezáním ostrými nástroji
Rozdrcené dřevní palivo	různé	Řezáním tupými nástroji
Polena	100 mm až 1 000 mm	Řezáním ostrými nástroji
Kůra	různé	Odkorněním zbytků stromů Může být rozřezána nebo nerozřezána
Svazek	různé	Podélným orientováním a svázáním
Palivový jemný prach	< 1 mm	Mletím
Píliny	1 mm až 5 mm	Řezáním ostrými nástroji
Hoblíny	1 mm až 30 mm	Hoblováním ostrými nástroji
Brikety	∅ > 25 mm	Mechanickým stlačením
Pelety	∅ < 25 mm	Mechanickým stlačením
Malé balíky slámy	0,1 m ³	Stlačením a svázáním do čtvercového průřezu
Velké balíky slámy	3,7 m ³	Stlačením a svázáním do čtvercového průřezu
Kulaté balíky slámy	2,1 m ³	Stlačením a svázáním do válcového průřezu
Řezanka ze slámy	10 mm až 200 mm	Rozřezáním během sklizení
Zrno nebo semeno	různé	Bez přípravy nebo sušením
Slupky a ovocné pecky	5 mm až 15 mm	Bez přípravy
Vláknité výlisky	různé	Přípravou z vláknitého odpadu odvodněním

Zdroj: JEVÍČ, Petr. Udržitelná výroba a řízení jakosti tuhých paliv na bázi agrárních bioproduktů

3.2 Úprava biomasy

Prvním krokem při úpravě dřevěné biomasy je redukce její velikosti. Mezi zařízení upravující velikost dřeva řadíme stříhací zařízení, sekačky, drtiče, zařízení na paketování a briketování. [1]

3.2.1 Stříhací zařízení

Stříhací zařízení se používá na zhotovení kusového palivového dřeva, a to nejčastěji z tenkých dřevin a odpadů z dřevařského průmyslu. Nejčastěji stříhací zařízení funguje na

principu gilotiny a po stříhu vždy následuje posunutí dřeva o délku asi 25 až 30 cm. Součástí stříhacího stolu bývá svazkovací zařízení a výkonnost stříhání je malá. [7]

3.2.2 Sekačky

Sekačky dělí dřevo beztrískově s řezným účinkem sekacích nožů napříč vláknem. Dělí se do několika skupin dle různých kritérií. Prvním kritériem dělení je účel použití, díky kterému dělíme sekačky na stacionární a mobilní. Druhým kritériem je druh sekacího orgánu rozdělující sekačky na diskové a bubnové. [7]

3.2.3 Drtiče

Dřevo, které nebylo možno rozsekat pomocí sekačky, bývá zpracováváno drtiči dřeva rozdělující se do dvou skupin – nízkootáčkové, vysokootáčkové. Samotné drcené dřevo je drobné, netvárné a znečištěné. Příklady takto zpracovaného dřeva jsou křoviny a pařezy. [1]

3.2.4 Štěpkovače

Štěpkovače jsou stroje, pomocí nich dělíme materiál řezným účinkem nožů. Nože jsou uloženy na rotujícím disku nebo bubnu. Dělíme je dle sekacího soustrojí na diskové, bubnové a šroubové. Štěpkovače mohou být dále děleny dle způsobu podávání, celkového technického řešení apod. [8]

3.2.4.1 Dřevní štěrka

Dřevní štěrka je hmota obsahující částice o velikosti od 3 do 250 mm. Odpady lesní těžby, průmyslového zpracování dřeva nebo rychle rostoucí dřeviny jsou nadrcené a zkrácené, čímž vzniká štěrka, která je velmi levná a využívaná pro vytápění větších budov. Dle jakosti a příměsí dělíme štěrku na zelenou, hnědou a bílou. [9]

3.2.5 Paketování

Paketování se využívá jako náhrada za štěpkování, jež je velice energeticky náročné. Při paketování se dřevní hmota lisuje do paketů, obdobně jako u lisování slámy, ale lisovací tlaky jsou zde výrazně vyšší kvůli větvím, jež kladou odpor. Balíky se přepravují na paletách a při spalování se drtí, nejde-li o velké kotle, do kterých se balíky vejdou celé. [7]

3.2.6 Briketování a peletování

V praxi můžeme dělit tato tvarovací zařízení na briketování a peletování následovně:

- **pístové hydraulické nebo mechanické jednorázové lisy**, kde jsou brikety o průměru mezi 50 a 60 mm. Tato zařízení jsou univerzální a nejčastěji se kombinují s kalibrovacím drtičem. Je možné do nich použít papír, slámu, piliny a pazdeří. Obvyklý výkon je kolem 250 kg.h⁻¹. a celkový příkon linky s lisy doplněnými o dopravníky je kolem 50 kW. Výkonnost linky bývá do 0,5 t.h⁻¹.
- **Jednovřetenové a dvouvřetenové šnekové lisy** jsou ideální pro lisování pilin, avšak nevhodné jsou na lisování stébelnin. Typické pro šnekové lisy jsou jejich vysoce stlačené a trvanlivé brikety. Výkonnost lisů je jako u předešlé kategorie kolem 0,5 t.h⁻¹ s příkonem 50 kW za nutnosti doprovodu pomocným zařízením s příkonem 70 kW a více za předpokladu, že je součástí linky i sušení materiálu.
- **Protlačovací a granulační lisy** jsou odvozeny od granulačních lisů k výrobě trvanlivých krmiv na bázi slámy. Rozdělujeme je na lisy s kruhovou, vertikální matricí a s horizontální deskovou raznicí. [5]

Výkonnost nabývá hodnot vyšších než 1 t.h⁻¹ s příkonem dosahujícím 150 kW, přičemž v zahraničí se v poslední době pokouší o realizaci samojízdných zařízení s použitím lisů tohoto typu. [1]

Z hlediska energetické náročnosti při výrobě je výroba briket a pelet relativně náročná záležitost. Materiál použitý na výrobu briket či pelet by měl na vstupu vykazovat vyšší stupeň dezintegrace, přičemž jeho vlhkost klesá. Výhodné je tedy vyrábět brikety a pelety z materiálu, jenž byl již předem upraven při jiném technologickém procesu, během kterého byl vysušen a dezintegrován. [6]

3.2.6.1 Pelety

Pelety existují nejčastěji ve formě granulí s kruhovým průřezem. Granule mají průměr 6-20 mm, délku mezi 1-5 cm a vyrobené jsou zásadně z organického materiálu, tzn. z biomasy bez chemických přísad a pojiv. Pelety se vysokým tlakem lisují pomocí protlačovacích matricových lisů. [5]

Barevnost pelet je různá a závislá na druhu použitého dřeva, kvality suroviny, příměsi kůry a technologickém procesu výroby. Vlhkost pelet je stabilně okolo 8 % a vzniklý popel

je o obsahu 1 %. Výhřevnost pelet nabývá hodnot od 16 do 18 MJ.kg⁻¹ a objemová hmotnost se pohybuje kolem 850 kg.m⁻³. [10]

Pelety jsou vhodné pro automatické kotle rodinných a menších obytných domů. Dále pro lokální automatické kamna bytů a mohou být také doplňkem uhlí v kotelnách. Dobré sypné vlastnosti pelet jsou podmíněny poměrem průměru a délky, který nemá být větší než 1:3, aby nedošlo k ucpání dopravníku automatických topenišť. [11]

3.2.6.2 Brikety

Brikety jsou zpravidla ve tvaru válečků, hranolů a šestistěnů s průměrem od 40 do 100 mm a délkou do 300 mm. Materiál briket je ze suchého dřevního prachu, drtě, pilin, kůry, jemných hoblin nebo rostlinných zbytků. Zbarvení je stejně jako u pelet různé a liší se dle druhu použitého dřeva, kvality suroviny, příměsí kůry a technologického procesu výroby. Brikety mají vysokou objemovou hmotnost pohybující se kolem 1000 kg.m⁻³ a dosáhnout může až 1200 kg.m⁻³. Vlhkost se rovná přibližně 8 % a obsah popele je v rozmezí 1-3 %. Výhřevnost briket nabývá hodnoty 12-18 MJ.kg⁻¹. [12]

Brikety se využívají jako topidlo u malých topenišť, lokálních kamen, kotlů a krbů s ručním přikládáním. [11]

3.3 Složení a vlastnosti tuhých biopaliv

Složení a vlastnosti tuhých biopaliv jsou ovlivňujícím faktorem při volbě biopaliva a zařízení, ve kterém se bude tuhé biopalivo spalovat. Rozhodujícím faktorem jsou dále při zhodnocení jakosti biopaliva. Charakterizující vlastnosti tuhých biopaliv jsou obsah vody v původním palivu W (% hm.), obsah popele v původním palivu A (% hm.), spalné teplo Q_s (MJ.kg⁻¹), výhřevnost Q_i (MJ.kg⁻¹), prchavá a neprchavá hořlavina v hořlavině V^{daf} a NV^{daf} (% hm.), obsah veškeré síry v palivu S (% hm.), charakteristické teploty popele t_A , t_B , t_C (°C), spékavost popele, ale také fyzikálně-mechanické vlastnosti. Tři základní složky obsahující tuhé biopalivo v přirozeném stavu jsou: celková voda, popeloviny a hořlaviny. Jedná se o velice podstatné činitele ve spalovacím procesu ovlivňující konstrukci a provoz spalovacího zařízení. [6]

Nehořlavou částí biopaliva je voda a popel snižující výhřevnost biopaliva. Při konstrukci spalovacího zařízení a jeho provozu s vodou a popelem musí být počítáno proto, aby nezapříčinily problémy. Uhlík (C), vodík (H), síra (S) a dusík (N) tvoří hořlavou část.

Při vlastním spalování (exotermická reakce s vzdušným kyslíkem), kde figuruje kyslík (O) z hořlaviny jako okysličovadlo, je přítomen pouze uhlík, vodík a síra, dusík se reakce neúčastní. [6]

$W + C + H + O + S + N + A = 100 \%$, vzorec hmotnostních podílů jednotlivých složek obsažených v tuhém surovém biopalivu (% hm.). [5]

3.3.1 Prvky hořlavé části tuhých biopaliv

3.3.1.1 Uhlík

Hlavním nositelem tepelné energie je uhlík o výhřevnosti $33\,900 \text{ kJ.kg}^{-1}$. V palivu se vyskytuje ve formě organických sloučenin, které jsou jedním ze základů světové energetiky. Zejména fosilní paliva (zemní plyn a uhlí) jsou energetickým zdrojem potřebným při výrobě elektřiny a vytápění. Ropné produkty jsou potřebné pro pohon spalovacích motorů. Pravidelně se setkáváme s výrobky chemického průmyslu na bázi uhlíku – plastické hmoty, umělá vlákna, léčiva atd. [5]

3.3.1.2 Vodík

Vodík s výhřevností $119\,700 \text{ kJ.kg}^{-1}$ vytvoří během hoření asi čtyřikrát více tepla na jednotku hmotnosti než uhlík. Vzniklé teplo se pozitivně odrazí v hodnotě výhřevnosti paliva. Celkový vodík je součtem vodíku vázaného H_V a vodíku nezadaného H_N . Část vodíku vázanou na kyslík nazýváme vodíkem vázaným, naopak vodík nezadaný je část zbylá po navázání první části vodíku. Vodík nezadaný můžeme vyjádřit následujícím vztahem: $H_N = H - (O \cdot 8^{-1})$, kde O je kyslík v palivu s jednotkou kg.kg^{-1} . [13]

3.3.1.3 Síra

Síra je nekov a její charakteristické vlastnosti jsou snadná tavitelnost, elektrická nevodivost a žlutá barva. V přírodě se vyskytuje elementární a vázaná. Elementární síra je původu vulkanického nebo biologického, kdy vznikla redukcí síranu bakteriemi. [14]

Síra s výhřevností $10\,500 \text{ kJ.kg}^{-1}$ je nežádoucí součást paliva, i přesto že zvyšuje výhřevnost paliva. Při hoření vzniká oxid siřičitý a oxid sírový, tyto oxidy mají nežádoucí vliv na trvanlivost spalovacího zařízení a znečišťují okolní atmosféru. [13]

3.3.1.4 Kyslík

Kyslík je nejrozšířenějším prvkem v zemské kůře (kolem 49 %) a vyskytuje se volně v atmosféře (21 %). Vázaný je obsažen ve vodě a v dalších anorganických a organických látkách. Kyslík je obsažen ve všech živých organismech a rostlinách, označujeme ho tedy za biogenní prvek. Využití kyslíku najdeme v reakcích, které požadují více kyslíku, než je ho obsaženého ve vzduchu (hutnictví železa, svařování a řezání kovů). Kyslík je dodáván v tlakových ocelových lahvích označených modrým pruhem. [15]

3.3.1.5 Dusík

Elementární dusík tvoří z velké části vzduch (78 obj. %). Je to bezbarvý plyn, bez zápachu a není jedovatý. Tvoří velmi stabilní molekulu N_2 . Dusík označujeme jako inertní plyn, má tedy nízkou reaktivitu, s kyslíkem reaguje až při teplotě 2000-3000 °C a s vodíkem při vysokém tlaku (10-100 MPa za přítomnosti katalyzátoru). [15]

Dusík se reakce hoření nezúčastňuje. Veškerý dusík přechází do spalin a podílí se na vytváření oxidů dusíku. Přítomnost dusíku v palivu snižuje obsah ostatních prvků, a to má za následek snížení výhřevnosti paliva. [13]

3.3.1.6 Chlór Cl

Chlór je toxický plyn zelené barvy, který se během spalování z velké části přeměňuje na plynné skupenství. Omezujícím faktorem koncentrace chloru v palivu je korozivní účinek, ke kterému dochází při společném působení s alkalickými prvky. [5]

3.3.2 Obsah vody v tuhých palivech

Voda se v tuhých palivech vyskytuje v různých formách. Vlhkost, jež představuje vodu, která se do paliva dostala například při jeho třídění nebo přepravě, se jmenuje hrubá (povrchová) voda. Hrubé vody se zbavíme sušením na vzduchu. Hodnotu vody zjistíme tím, že vzorek paliva zvážíme před i po vysušení a rozdíl nám dá hledanou hodnotu hrubé vody. Voda obsáhlá uvnitř paliva, vyplňující póry, se jmenuje zbylá (hydroskopická) voda. Zbylou vodu lze určit za pomoci pokusu, kdy se vzorek paliva rozdrťí na jemné zrno (maximálně 0,2 mm) a následně se vysouší při teplotách mezi 102 a 105 °C. Hrubá a zbylá voda tvoří vodu celkovou. [16]

3.3.3 Obsah popela v tuhých palivech

Popelovinami označujeme veškeré minerální látky tuhého paliva před jeho spálením. Složky obsažené v popelovinách jsou většinou křemičitany, uhličitany, sírany a další sloučeniny (největší podíl zastupuje křemičitan hliníku, vápníku, hořčíku a železa, volný kyslíčnický křemičitý, uhličitán vápenatý a železnatý, menší množství siřníku železa a nepatrné množství síranu vápenatého). Po spálení paliva zůstává v ohništi tuhý zbytek, ten označujeme popel (ne zcela správně). Popel získáme z tuhého paliva při dokonalém spálení při teplotě 800 ± 25 °C v oxidační atmosféře, přičemž se popeloviny dělí na těkavé zplodiny a netěkavý zbytek nebo uvolňují krystalovou vodu. [17]

3.3.4 Obsah síry v tuhých palivech

Síra S obsáhá v tuhých palivech má různé formy. Dělíme ji z hlediska toho, na které složky paliva je vázaná – síra organicky vázaná, síra anorganicky vázaná. Stanovením obsahu síry v palivech se myslí zjištění veškeré síry, a to jak spalitelné, tak nespalitelné. Spalitelná síra obsažená v hořlavině paliva je organická (pyritová a siřníková). Nespalitelnou síru představuje síra síranová. Dále se síra rozlišuje na síru prchavou a neprchavou. Vyšší obsah síry v tuhých palivech je nežádoucí při provozních podmínkách. Nežádoucí obsah síry v tuhých palivech, který může kotlům za provozu uškodit, je nad 1,8 %, dle zkušeností a výzkumu. [17]

3.3.5 Spálené teplo a výhřevnost tuhých paliv

Hořlavé látky a kyslík se během hoření slučují, což má za následek vzniku spalin, jakožto produktů spalování. Celý proces doprovází uvolňování určitého množství tepla. Teplo tuhých paliv se vztahuje na hmotnostní jednotku $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ za normálních podmínek, tedy při teplotě 0 °C a atmosférickém tlaku. V technické praxi označujeme uvolněné teplo jako spálené teplo Q_s nebo jako výhřevnost Q_i tuhých paliv. **Spálené teplo** představuje množství tepla uvolněného v průběhu dokonalého spálení 1 kg paliva při ochlazení spalin na 0 °C, přičemž všechna vzniklá pára během pochodu zkondenzuje. **Výhřevnost paliva** představuje množství tepla uvolněného v průběhu dokonalého spálení 1 kg paliva při ochlazení spalin na 0 °C, přičemž všechna veškerá voda zůstane v plynné fázi, tedy jako vodní pára. Hodnota spáleného tepla je vyšší než hodnota výhřevnosti paliva právě o teplo, které při výhřevnosti potřebujeme k ohřátí vody z počáteční teploty paliva na teplotu 100 °C a o skupenské teplo

vypařování vody. Množství tohoto tepla je zhruba 2500 kJ na 1 kg vlhkosti. Při tepelných výpočtech spalování paliva v průmyslových pecích se častěji využívá výhřevnost paliva z důvodu změny vody v páru, protože spaliny vzniklé v těchto pecích mají teplotu vyšší než 100°C. Měřič využívaný na měření spáleného tepla se nazývá kalorimetr. V technické praxi spáleného tepla a výhřevnosti paliv dosáhneme výpočtem. Při výpočtech pracujeme s hodnotami celkové (elementární) nebo technické (immediatní) analýzy tuhého paliva. [13]

3.3.6 Prchavá hořlavina

Prchavá hořlavina V^{daf} je významným parametrem tuhých paliv. Termínem prchavá hořlavina označujeme všechny hořlavé plyny, které se dokážou uvolnit při teplotě okolo 850 °C. Snadnost zapálení paliva je ovlivněna obsahem prchavé hořlaviny – čím je jí víc, tím lépe jde palivo zapálit. [18]

Obsah prchavé hořlaviny ve vzorku můžeme stanovit z jeho úbytku hmotnosti po dobu jeho žíhání v uzavřeném kelímku. Zbylou část hořlaviny (organické hmoty) představuje tuhý uhlík, tedy koks. Výhřevnost zbylého tuhého uhlíku je konstantní (přibližně 33,9 MJ.kg⁻¹). Kdežto výhřevnost samotné prchavé hořlaviny je velice proměnná a záleží na prouhelnění paliva. [19]

3.3.7 Charakteristické teploty popela

Charakteristické teploty popela t_A , t_B , t_C tuhých paliv je nutné znát při provozu různých druhů topenišť. Jedná se o teplotu tání popela, při níž se roztaví všechny složky popela. Roztavení popela se odehrává ve velkém teplotním intervalu 200 °C i více. Při této teplotě se koná změna skupenství popela charakterizovaná třemi teplotami:

- teplota počátku měknutí t_A (°C),
- teplota tání t_B (°C),
- teplota počátku tečení t_C (°C).

Tyto teploty jsou zaznamenávány při měření teploty tání. Teplota tání z praktického hlediska stanovuje hodnotu spalovací teploty v ohništi, při které by neměli vzniknout u spalovacího zařízení poruchy. Poruchy mohou vzniknout například roztavením popela na roštu a následným zalitím jeho mezer struskou, nalepením rozměklých popelových částic na stěny ohniště, vytvářením nánosů popela apod. U teploty tání popela závisí na jeho složení a okolní atmosféře ve spalovacím zařízení. [17]

3.4 Získávání energie z biomasy

Procesy, pomocí kterých získáváme energii z biomasy tepelnou přeměnou, rozlišujeme na spalování, karbonizaci, pyrolýzu a zplyňování. [7]

3.4.1 Spalování

Spalování je nejvyužívanější způsob použití biomasy k energetickým účelům. Při spalování je velmi důležitý obsah vlhkosti ve dřevě. [7]

Biomasa je velmi náchylná k navlhání i po jejím vysušení. Při spalování v mokřém stavu přijde dřevo o více než polovinu tepla v sobě obsaženého. Další důležitou vlastností je, že její velký podíl při ohřátí na 200 °C a více zplyňuje, tedy značným podílem biomasy je prchavá hořlavina, díky které se tvoří dlouhý plamen. Dlouhý plamen při spalování biomasy trochu komplikuje konstrukci topenišť. Proces spalování dřeva začíná zahříváním, při němž se odpařuje voda. Z důvodu horší tepelné vodivosti u dřeva a vysokému výparnému teplu vody se u větších kusů dřeva stává, že k odpaření vody dojde znova, kdy už dřevo hoří na povrchu. Odpařování vody zapříčiní úbytek tepla, a také velice účinně chladí dřevo. V místě, kde je již voda odpařena, teplota narůstá, začínají se uvolňovat další prchavé látky a začíná tepelný rozklad jednotlivých látek obsažených ve dřevě (pyrolýza). Směs nově vzniklých hořlavých plynů obsahuje více než polovinu energie uložené ve dřevě a na roštu spalovacího zařízení poté zbyde dřevěné uhlí. Směs hořlavých plynů společně s přivedeným vzduchem hoří dlouhým plamenem a toto spalování nazýváme primárním. Při primárním spalování nedochází k úplnému spálení všech spalitelných plynů. Obvykle totiž není dostatek kyslíku nebo potřebně vysoká teplota. Při přivedení velkého množství vzduchu se plamen moc ochladí, a naopak při přivedení malého množství vzduchu nemůže proběhnout úplná oxidace, vyjímaje vzniku oxidu uhličitého. Proto je vhodné, aby spalovací komora, kde dochází k procesu spalování byla tepelně izolována a hoření mohlo docílit patřičně vysoké teploty. Následně se do plamene přivádí (sekundární) vzduch, díky kterému dosáhneme dohoření nespálených plynů a tím se uvolní energie, kterou zbylé dřevo ještě má. Komínem vychází pouze oxid uhličitý, vodní pára a nepotřebný dusík a na roštu zbyde jen žhavé uhlí. Uhlí se spaluje pomalu s kratším plamenem (stejně jako u koksu). Při spalování uhlí vzniká oxid uhelnatý, jež se v oblasti přívodu sekundárního vzduchu spálí. Za předpokladu, že se všechny těkavé složky uvolnily a na roštu zbylo jen dřevěné uhlí, můžeme přívodem primárního vzduchu regulovat výkon ve vcelku velkém rozpětí. Docílit

správného procesu spalování je tedy složité. Díky nutnosti zajištění velké teploty a velikosti ohně jsou kotle na spalování dřeva poměrně velké. Malé kotle s dobrou účinností je obtížné vyrobit. Velké kotle používají v horní části plamene přívod terciálního vzduchu a jeho dávkování je řízeno počítačem zpracovávajícím a vyhodnocujícím hodnoty o složení spalin. [20]

3.4.2 Karbonizace

Karbonizace nebo také suchá destilace značí termickou přeměnu tuhé biomasy. Děj probíhá bez přístupu vzduchu a hlavní produkt karbonizace je dřevěné uhlí. Karbonizace biomasy je nejdéle používaná tradiční termická přeměna, kde se během jejího průběhu eliminují těžké složky dřeva. Tím se ve dřevě sníží obsah kyslíku a vodíku a u výsledného produktu se zvýší koncentrace uhlíku. Výsledný nekystalický produkt suché destilace, tedy dřevěné uhlí, bývá drobné až kusové s tvrdým, pórovitým, černým a kovově lesklým povrchem. Struktura uhlí je výrazně dřevitá a lom lasturový. Uhlí má vysokou absorpční schopnost, nízký obsah síry, vysoký obsah uhlíku (min. 80 % C), snadnou hořlavost s bodem vznícení od 300 do 400 °C a výhřevnost kolem 27 MJ.kg⁻¹. Zvýšením karbonizační teploty dosáhneme tvrdšího uhlí s vyšším obsahem uhlíku. Dnes se k výrobě uhlí využívají karbonizační pece a retorty. U karbonizačních pecí se pro produkci tepla používají části vsázky a u retort se teplo přivádí z exteriéru. Dřevěné uhlí se využívá hlavně v průmyslu při obohacování oceli uhlíkem, kde plní funkci absorbentu u filtrace kapalin a plynů. Další využití je při tepelné přípravě potravin a k energetickým účelům se spíše nevyužívá. [21]

3.4.3 Pyrolýza

Termický rozklad organických látek na sloučeniny se nazývá pyrolýza. Vzniklé sloučeniny využíváme k výrobě topného oleje nebo plynu. Kotle určené pro centrální topení se vyrábí na principu pyrolýzy probíhající za atmosférického nebo sníženého tlaku, při nízkých nebo vysokých teplotách. U pyrolýzních kotlů je průběh spalování rozdělen do čtyř fází – sušení (odpařování vody z paliva), pyrolýza (uvolňování plynných složek paliva), spalování plynných složek paliva a spalování pevných látek (hlavně uhlíku). [7]

3.4.4 Zplyňování

Zplyňováním se myslí termochemická přeměna uhlíkatého materiálu. Materiál má skupenství pevné nebo kapalné a mění se na vyhřátý energetický plyn za pomoci zplyňovacího média a tepla. Výsledný plyn obsahuje výhřevné složky (H_2 , CO, CH_4 a další minoritní sloučeniny), doprovodné složky (CO_2 , H_2O , N_2) a znečišťující složky (dehet, prach, sloučeniny síry, chlóru, alkálie a další). Při procesu zplyňování je přítomno více reakcí dělicí se do čtyř základních pochodů: sušení, pyrolýza, redukce a oxidace. Procesy probíhají postupně (sesuvný generátor) nebo souběžně (fluidní generátor). Sušení, pyrolýzu a redukci řadíme do procesů spotřebovávající teplo (endotermní). Spotřebované teplo můžeme následně získat při oxidaci v reaktoru (hoření) části paliva, nebo potřebné teplo přivedeme z okolního prostředí. Při následném získání tepla pomocí oxidace se jedná o přímé (autotermní) zplyňování. Při přivádění tepla z okolního prostředí označujeme zplyňování jako nepřímé (alotermní). [22]

Zařízení na zplyňování nazýváme zplyňovače. Ty mohou být proudové, s fluidní vrstvou či s nehybnou vrstvou. Dosud nejrozšířenější formou zplyňování je zplyňování s pevným ložem. U menších a středních zařízení je zplyňovacím médiem vzduch. [23]

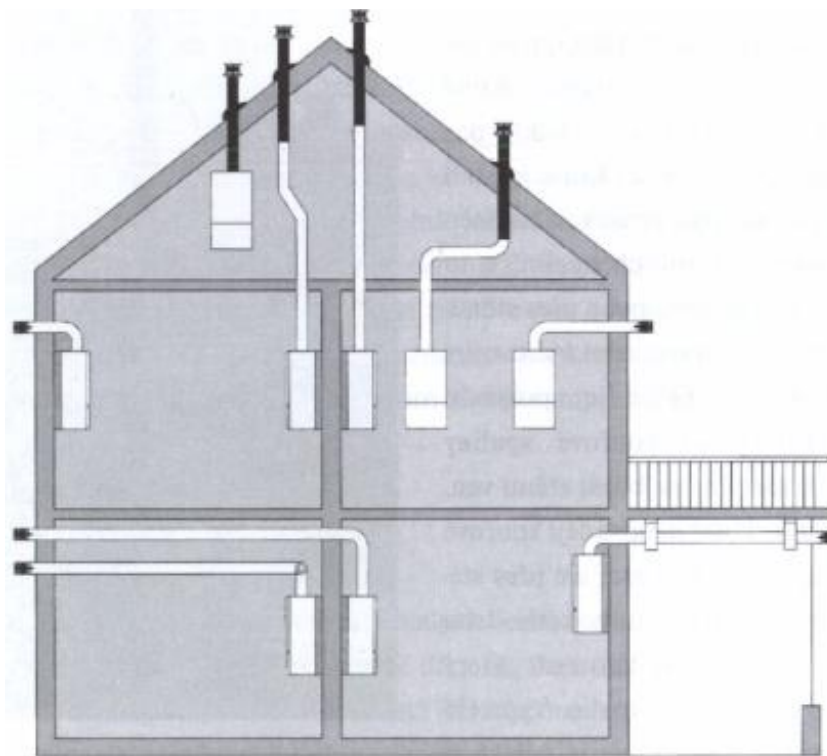
3.5 Spalovací zařízení

Spalovacími zařízeními v případě zdrojů vytápění rozumíme lokální topeniště – krby a kamna, kotle určené pro ústřední vytápění, teplovodní a horkovodní kotle určené pro lokální centralizované systémy, parní kotle pro kogeneraci tepla a elektřiny. Můžeme je dělit dle způsobu předávání tepla na přímotopná spalovací zařízení (lokální zdroj) a kotlová zařízení (centrální zdroj). Přímotopná spalovací zařízení jsou lokální topeniště – krby a kamna. Krby a kamna předávají teplo uvolněné spalováním přímo do místnosti, a tím ohřívají vzduch v místnosti a za pomoci sálavého toku zvyšují teplotu zdi a předmětů v místnosti. V kotlových zařízeních se uvolněné teplo při spalování a obsažené teplo ve spalinách předá pracovní látce, kterou může být voda nebo olej. Pracovní látka se poté rozvádí do jednotlivých místností, prostor, budov, technologických zařízení nebo výměníků. [24]

Pro správný provoz spalovacího zařízení je nutné mít dobrý **komín**. Komín je stavební konstrukce, která vede vzhůru a s jeho pomocí dochází k odvodu plynných produktů vzniklých při procesu spalování a jeho konstrukce musí odpovídat normám. Komín

má za úkol zajistit potřebný tah (podtlak) při průchodu teplých spalin. Tah zajistí odvod spalin z odtahového hrdla topeniště. Účinný tah závisí na mnoha faktorech, např. výška komínu, barometrický tlak. [7]

Obrázek 5 – možnosti odvodu spalin



Zdroj: DUFKA, Jaroslav. *Vytápění domů a bytů. 2. zcela přeprac. vyd.*

Jestliže se v domě nenachází komín, nebo stávající komín není vyhovující, popřípadě se nový nedá postavit, odvádějí se spaliny přes nejbližší stěnu u kotle ven. Kotle, které neodvádí spaliny do komína, říkáme turbokotle. Turbokotle mají ventilátor s jehož pomocí se odvádí spaliny kouřovodem ven. V blízkosti místa výfuku nesmí být okno nebo odvětráno kanalizační potrubí. Kouřovody mohou být vedeny mnoha způsoby a příklady jejich vedení můžeme vidět na obrázku 5 výše. [25]

3.5.1 Lokální zdroje vytápění

3.5.1.1 Kamna a sporáky

Kamna a sporáky reprezentují nejjednodušší lokální topidla s ohništěm pro spalování tuhých paliv. Na dně ohniště je pevný rošt, přes který se ke spalovanému palivu přivádí

vzduch. Množství vzduchu můžeme regulovat dvířky popelníku nacházející se pod roštem. Ohniště má minimální nároky na jakost paliva. [24]

Sporáky na dřevo nesloužily jen na vaření jídla, ale jejich odpadní teplo vyhřívalo celou místnost. V dnešní době se využívají sporáky na dřevo pouze jako přídatná topeniště u venkovních kuchyní (zdroj náhradní energie). Sporáky na dřevo mohou disponovat trubkovým registrem na užitkovou vodu, nebo se dá voda využít k vytápění. Topeniště sporáků bývá nízké z důvodu co nejbližší vzdálenosti mezi hořícím ohněm a plotýnkou. U sporáku je možnost překloupat rošt, když je potřeba zajistit pouze vytápění dané místnosti. [26]

3.5.1.2 Krby, krbové vložky a krbové kamna

Velkým záporem krbů a krbových kamen je spotřeba vzduchu. Se spalinami komínem odchází také velké množství nevyužitého vzduchu. V domech s dokonalou izolací a vzduchotěsností je nutné přivádět při spalování vzduch z venku. [27]

Krby, krbové vložky a krbové kamna se od sebe liší, jak vzhledem (konstrukcí), což můžeme vidět na obrázku 6 níže, tak z hlediska vlastností jako je účinnost, předání tepla apod.

Obrázek 6 – schématický rozdíl mezi krbem, krbovými kamny a krbovou vložkou



Zdroj: <https://www.arecenze.cz/test-krbovych-kamen/>

Krby

Krby jsou jedním z nejstarších topidel a dodnes se často využívají. Krby prošly mnoha vylepšeními během svého dlouhého vývoje. Principem krbu je především předání tepla do místnosti sáláním a pouze malá část je předána konvekcí, tedy ohřátím vzduchu pomocí zdiva a komína samotného krbu. Dříve když domy netěsnily a byly špatně izolovány,

tak bylo předání tepla sáláním výhodné, protože k dosažení chtěné teploty vzduchu v místnosti nedocházelo. V dnešních dobře izolovaných domech je tato vlastnost ne příliš významná. Sálání tepla může být často i nepříjemné. Klasický otevřený krb je ze stránky energetické účinnosti a produkce škodlivých emisí již nevyhovující. Tyto krby mají velice nízkou účinnost, a to méně než 20 %. Proto se dnes využívají hlavně krbové vložky. [20]

Krbové vložky

Krbové vložky byly záměrně vyhotoveny jako doplňková zařízení pro klasické krby se záměrem zvýšit jejich účinnost. Zprvu byla tato zařízení jednoduchá. Jednalo se pouze o kovovou krabici zabudovanou nebo dodatečně vloženou do ohniště. Krbové vložky se časem vyvinuly v samostatné vytápěcí tělesa s charakteristickými znaky. Při využívání krbových vložek se původní sálavý způsob vytápění krbů vyvinul na efektivnější teplovzdušný způsob vytápění. Instalací krbové vložky se získá teplovzdušný uzavřený krb. Krby s krbovou vložkou mají celkovou tepelnou účinnost až 60-80 %. S takto vysokou účinností jsou krbové vložky součástí plnohodnotné koncepce otopné soustavy celého domu. Zvládají prouděním teplého vzduchu vytopit ostatní prostory domu. Vzduch proudí uzpůsobenými kanály a může být doplněn o nucený oběh, pomocí kterého se vzduch dostane i do vzdálenějších prostorů domu. Médium u teplovzdušných krbů je namísto vzduchu voda. Voda proudí přes výměník vody v krbové vložce a tím ohřívá otopná tělesa jednotlivých místností. K uzavření ohniště dochází za pomoci dvířek z odolného keramického skla. Dle použitého materiálu dělíme vložky na litinové a plechové a dle konstrukce vložek na jednoplášťové, dvouplášťové a kombinované. Životnost krbových vložek bývá za předpokladu odpovídající údržby přibližně 15 let (maximálně 20 let). Povrch jednoplášťových vložek nabývá teploty až 400 °C, tudíž se vložky obezdívají. Materiál použitý při obezdívce musí splňovat takové vlastnosti, aby odolával vysokým teplotám. U dvouplášťové krbové vložky nedochází k tak vysokým teplotám vzduchu mezi pláštěmi, proto se z architektonického hlediska dají tyto vložky různě komponovat do interiéru. Časem se vyvinuly vícekomorové vložky, jež mají výhodu v tom, že mají opláštění, které zamezí po otevření dvířek úniku kouře do místnosti. [28]

Krbová kamna

Krbová kamna se nemusí zazdívat nebo pevně zabudovávat, proto při případné rekonstrukci je velice snadné jejich přemístění na jiné místo. Z hlediska materiálu je v obchodech dostupný široký sortiment krbových kamen od litinových až po ty obložené

kachlemi. Oproti krbům mají krbová kamna menší nároky na podlahovou plochu a výhodný je pasivní zisk akumulovaného tepla. V posledních letech se využívají krbová kamna také jako centrální topidlo s možností zařazení do systému ústředního topení. [28]

Materiál určený ke spalování prohořivajícím systémem krbových kamen je dřevo, kdežto koks, uhlí nebo uhelné brikety zde nelze spalovat. K ohřevu okolního vzduchu dochází z velké části konvekčním teplem. Těleso kamen je ze svařených ocelových plechů a uvnitř se nachází spalovací komora, která je z přední části osazena dvířky. Dvířka krbových kamen mají velkoplošné žáruvzdorné sklo. Vnitřek kamen se vyzdívá šamotovými tvarovkami. Ve spodní části se nachází malý rošt se zábranou z přední strany proti vypadnutí paliva. Vzduch z okolního prostoru se nasává v místě zásobníku paliva a dále vzduch stoupá vzhůru a zahřívá prostor mezi pláští. Do místnosti se již ohřátý vzduch vrací průduchy v horní části kamen. Primární vzduch je přiváděn pod rošt. Sekundární vzduch je přiváděn pomocí regulátoru zabudovaného v příkládacích dvířkách a v plášti kamen. [7]

3.5.1.3 Kachlová kamna

U kachlových kamen je způsob hoření dřeva podobný jako u krbů. Kachlová kamna bývají často bez roštu a některé typy rozvádí teplý vzduch i do dalších místností nebo nabízí ohřev teplé vody. Kachlová kamna jsou obložena kachličkami (v nejrůznějších barvách a vzorech). [3]

Klasická kachlová kamna se nejčastěji skládají z keramických hmot způsobujících vysokou hmotnost kamen. Keramické hmoty akumulují uvolněné teplo během spalování a postupně se zahřívají. Po zahřátí se teplo předává do místnosti. V důsledku toho procesu může dojít k tomu, že kamna pořád hřejí, přičemž jsou již vyhaslá. V kachlových kamnech nejčastěji spalujeme kusové dřevo nebo brikety. [24]

3.5.2 Centrální zdroje vytápění

Pro vytápění rodinného domu je potřebný kotel s výkonem v řádu desítek kilowattů. Při volbě kotle pro ústřední vytápění jsou rozhodující klimatické podmínky, lokalita, celková dispozice, konstrukce a způsob využívání domu. Jednotkou používanou k vyjádření tepelných ztrát moderních domů je kilowatt. O druhu použitého paliva a typu kotle rozhoduje jak uživatelský komfort, tak celkové provozní náklady. [24]

Kotle se dělí do mnoha kategorií podle různých hledisek. Vybrané rozdělení je popsáno níže.

3.5.2.1 Kotle dle způsobu přikládání paliva

Automatické přikládání

Kontinuální přívod paliva se využívá u moderních kotlů na spalování pevných paliv. Doprava do ohniště je zajištěna pomocí šnekových dopravníků a za pomoci otočného válcového roštu. Automatickou dopravou je docíleno stability spalovacího procesu a požadovaného výkonu, vysoké účinnosti spalování, nízké produkce škodlivých látek a pohodlí uživatele. Problémem při nepřetržitém dopravování je velikost dávky, která by musela být dosti malá a palivo by tak muselo být ve formě malých částic. Je zde tedy možnost dopravování přetržitě (periodicky), kde je celý proces automatizován. Ke spuštění dopravníku dochází s ohledem na výstupní teplotu spalin či vody, nebo může ke spuštění dopravníku docházet cyklicky (určíme dobu plnění a dobu časové prodlevy). [29]

Automatické kotle určené pro ústřední vytápění pevnými palivy mohou používat spalování na roštu, spalování pomocí speciálních hořáků nebo hořákového provedení spalovací komory, nebo také spodní přívod paliva či zplyňování. Důležitou součástí automatických kotlů je řídicí jednotka zajišťující koordinaci systémů a komunikaci mezi uživatelem a kotlem. Kotle stejné výkonové úrovně se mohou lišit právě kvůli stupni a přesnosti automatizace. [29]

Ruční (manuální) přikládání

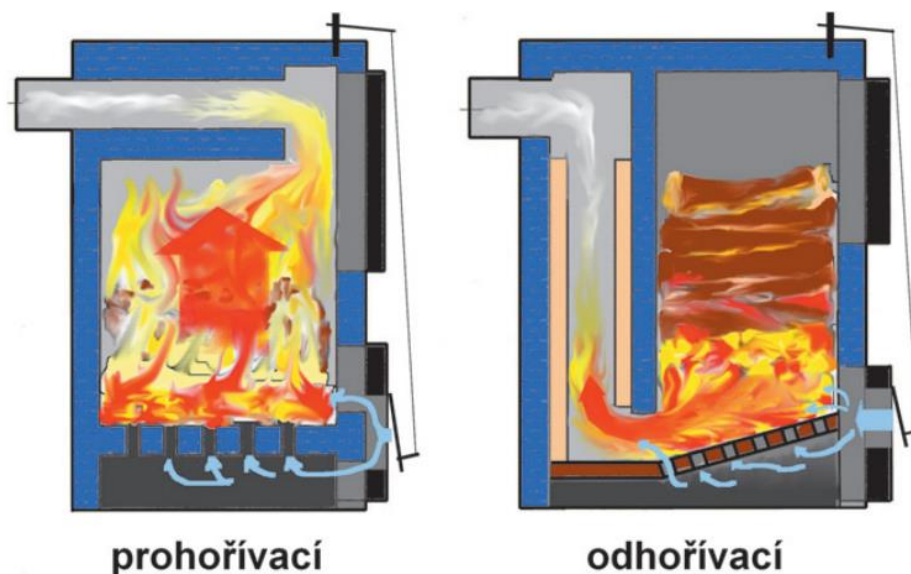
V kotlích s manuálním přikládáním se spaluje jedno z nejlevnějších paliv, a proto výrobci těchto kotlů vycházejí z toho, že kotle musí být levné a tedy jednoduché. Nejrozšířenější konstrukční řešení je klasické velkoobjemové ohniště, kde se periodicky co nejméněkrát přikládá co největší množství paliva. Přiložené dřevo je postupně zahříváno, vysušováno a poté dochází k hoření. Rychlost průběhu tohoto procesu je různá a záleží na konstrukci a kvalitě provedení kotle. Při fázi zapalování (počátku hoření) je v ohništi nadbytek spalovacího vzduchu, s čímž je spojená nízká teplota. To má za následek nedokonalé spalování a tvorbu typických škodlivin. Regulace vzduchu v tomto případě ovšem není z důvodu levné ceny kotlů dostatečně účinná. [24]

3.5.2.2 Kotle dle použité technologie

Prohořivací a odhořivací kotle

Při postupném spalování dochází u prohořivacího kotle k průchodu spalin přes vrstvu paliva. U odhořivacího kotle postupné spalování probíhá ve vrstvě paliva, která je plynule doplňovaná a nedochází k průchodu spalin přes palivo. Tento rozdíl můžeme vidět na obrázku 7 níže. [30]

Obrázek 7 – řez prohořivacím a odhořivacím kotlem



Zdroj: LYČKA, Zdeněk. *Malé teplovodní kotle na pevná paliva: spalování pevných paliv po roce 2013*

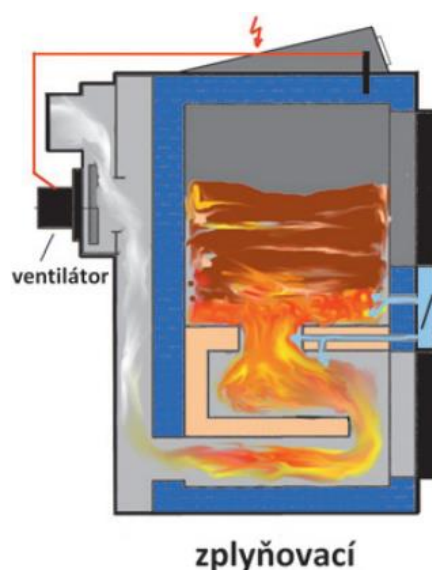
Tato technologie má minimální nároky na řízení průběhu spalovacího procesu. Množství a kvalita spalovaného dřeva a velikost komínového tahu značně ovlivňuje výkon prohořivacích a odhořivacích kotlů. V prohořivacím kotli dojde k nahoření veškerého paliva vloženého v šachtě poměrně rychle, a proto se dá výkon kotle regulovat jen omezeně. V odhořivacím kotli probíhá hoření pouze ve spodní části naloženého paliva, ale je nutné pravidelné odstraňování zbylého popele z roštu. Při neodstranění popele z roštu může dojít k útlumu výkonu. Kvalita technologie prohořívání a odhořívání podléhá mnoha faktorům, většinou je závislá na obsluze kotle. [30]

Zplyňovací kotle

Zplyňovací kotle se na dnešním trhu řadí mezi nejúčinnější kotle a jejich účinnost je mezi 70 a 90 %. Prohořivací a odhořivací kotle mají na rozdíl od zplyňovacích účinnost od 50 do 80 %. Díky vysoké účinnosti zplyňovacích kotlů se ušetří na palivu a provozních

podmínkách a tím produkují méně znečišťujících látek. Na obrázku 8 můžeme vidět řez kotlem. Horní komora slouží zároveň jako zásobník paliva a je do ní přiváděn vzduch podstechiometrickém množství. V této komoře dochází především k hoření uhlíku uvolňujícího se ve formě oxidu uhelnatého, který je doprovázen dalšími uvolněními hořlavými plyny při termickém rozpadu dřeva. Vytvořené spaliny a plyn se přivádí do spalovací komory. Do spalovací komory je přiveden sekundární vzduch a vytvořený oxid uhelnatý a další hořlavé plyny zde shoří. Následně vzniklé horké spaliny ohřívají vodu. [29]

Obrázek 8 – řez zplyňovacím kotlem



Zdroj: LYČKA, Zdeněk. *Malé teplovodní kotle na pevná paliva: spalování pevných paliv po roce 2013*

Podrobněji je samotný proces zplyňování probrán v předešlé kapitole 3.4.4 Zplyňování.

3.5.2.3 Kotle dle druhu paliva

Kotle na kusové dřevo

Ve spalovacích zařízeních na kusové dřevo se spaluje palivové dříví – jehličnaté i listnaté a dřevní brikety. Velikost spalovaného paliva je závislá na velikosti příkládacího otvoru a spalovací komory. Do kotle se jmenovitým výkonem 15 kW je nutné přikládat 4-5 kg polen za hodinu. Během otopného období (průměrně 1500 hodin provozu) tedy spotřebitel potřebuje cca 7,5 tuny palivového dřeva za rok. Tato hodnota je pouze orientační a závisí na mnoha faktorech jako je kvalita dřeva nebo systému spalovacího zařízení. Dřevní brikety mají oproti palivovému dřevu větší výhřevnost a z toho důvodu uvažujeme 3,7 kg

spotřebovaných briket za hodinu, tedy přibližně 6 tun za rok. Při přípravě teplé užitkové vody je nutné počítat s dalšími 1-2 tuny paliva ročně (asi 25 GJ.rok⁻¹ potřebného tepla) a doplnění systému o akumulční nádrž. [11]

Dřevní polena můžeme skladovat ve vytápěné budově v odděleném skladu jako volně uložené dřevo, či v bednách a na paletách. Brikety bývají ve skladě na paletách zabalené ve folii. Sklad by měl být velikostně uzpůsoben pro veškeré palivo potřebné na celou topnou sezónu. Pro rodinný dům většinou stačí sklad o rozloze 15 m². [11]

Kotle na pelety

Moderní kotle na pelety jsou plně automatizované a mají dobré vlastnosti při spalování – nízké emise. Nízkých emisí dosahují přesným elektronicky řízeným systémem dávkování paliva a spalného vzduchu. Tepelný výkon se ovládá plynulou regulací přívodu paliva a vzduchu se závislostí na venkovní a žádané vnitřní teplotě. Kotle na pelety dosahují účinnosti až 94 %. Kotel s výkonem 10 kW by měl orientačně vytopit objekt o 200 m², když bychom počítali s tepelnými ztrátami objektu 50 W.m⁻². Hořák kotle na pelety je podstatnou součástí a dělíme ho na základní typy – posuvný nebo hrncový. K zapálení kotle dochází automaticky horkým vzduchem a přísun pelet do hořáku je rovněž automatický (obvykle elektronicky řízený). Pelety se dodávají na odhořivací talíř v dávkách nebo pomocí šnekového dopravníku do odhořivacího hrnce. Příkladání pelet dopomáhá například šnekový nebo pneumatický (vzduchotlaké sací potrubí) dopravník, který odebírá pelety z nedalekého skladu – obrázek 10. [31]

Obrázek 9 – kotel s odebíráním pelet z oddělené místnosti



Zdroj: <https://www.viessmann.cz/cs/rady-a-tipy/z-jakych-zasobniku-na-pelety-mame-na-vyber.html>

Kotle na štěpku

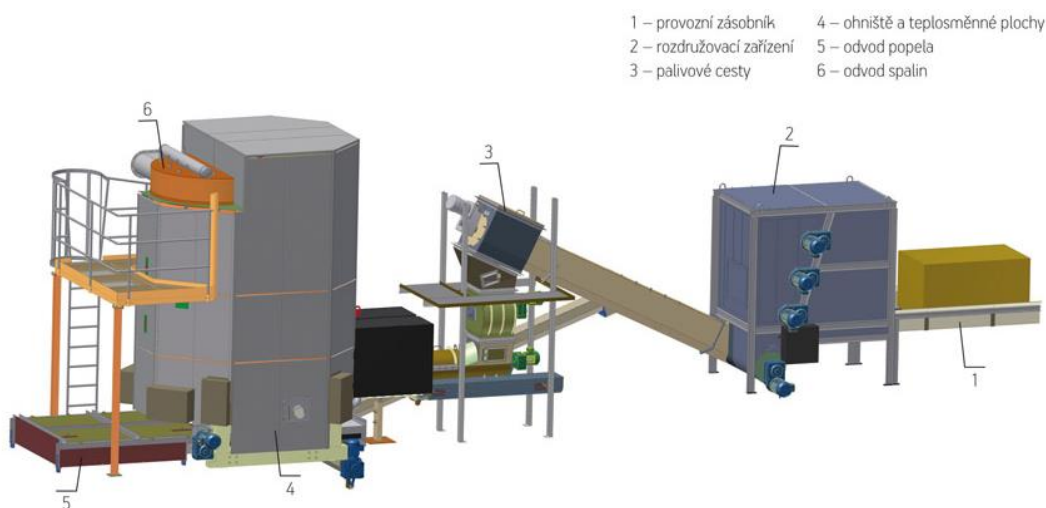
Kotle na štěpku jsou většinou určeny pro ústřední vytápění a ohřev vody ve větších obytných budovách, skupin budov nebo podniků. Kotlem s nižším výkonem (25kW) lze vytápět i rodinné domy, ale spalování štěpky ve větších kotlích (stovky kW) je hospodárnější. Kotle bývají obvykle plně automatizované a mají dobré spalovací vlastnosti a nízké emise. Ve většině kotlů na štěpku můžeme spalovat i brikety, ekonomicky je ale tato varianta méně výhodná. V některých kotlích je také možné spalovat obilí nebo suchou rostlinnou řezanku. [11]

Kotle na štěpku se nejčastěji v obytných domech instalují ve sklepě. Při výkonech kotle do 20kW může být sklad štěpky součástí sklepa, ve kterém je umístěn kotel, ale musí se zajistit odvětrání prostoru. U kotlů nad 100 kW je nově možnost kombinace výroby elektřiny a tepla kogenerační jednotkou. [11]

Kotle na slámu

K výrobě energie začali zemědělci používat slámu. Jednalo se o spalovací zařízení určené pro rodinné farmy. Výkon těchto kotlů byl okolo 50 až 100 kW. Spalovací komora byla uzpůsobena balíkům slámy. Kotle na slámu byly zprvu na ruční přikládání a ty lepší z nich měly z důvodu ne tak častého přikládání zásobník balíků. Později byly typy kotlů uzpůsobeny tvaru velkých balíků a přikládání probíhalo pomocí traktorových vidlí nebo vysokozdvizného vozíku. Tyto kotle měly vcelku malou účinnost mezi 40 a 63 % a nebyly z hlediska norem o obsahu škodlivin ve spalinách vyhovující. Využívaly se na dánských, švédských, finských a norských farmách. [1]

Obrázek 10 – soubor zařízení na spalování slámy



Zdroj: <http://www.tenza.cz/cz/aktivita/energetika/technologie/kotle-na-biomasu/>

Dnešní moderní kotle fungují na stejném principu s řízeným spalováním. Dosud nejlepšími parametry disponují kotle s rovnoměrnou dodávkou paliva. Sklizená sláma bývá ve formě balíku, proto se musí upravovat před samotným spalováním. Balíky se rozeberou na rozebíracím stroji a vzniklá řezanka je pneumatickým systémem dopravována do topeniště kotle – obrázek 11. Kinematiku hoření ovlivňuje vlhkost a chemické složení spalované slámy. U menších kotlů na slámu (zde hovoříme o výkonu do 300 kW, dokonce dle některých autorů až do 1000 kW) je problémové docílit limitní hranice prachových částic, Nox a CO. [1]

3.6 Legislativa ovlivňující spalovací zařízení

Zákony, nařízení, vyhlášky, normy, právní předpisy atd. vymezují a určují hranice jednání podnikatelských objektů, jejich dodržování mají za úkol kontrolovat složky správních a samosprávních orgánů. [1]

Vybraná legislativa limitující spalovací zařízení:

Sbírka zákonů č. 201/2012 Sb. Zákon o ochraně ovzduší vydaný dne 2. května 2012.
In: 201/2012 Sb. 2012.

Směrnice Evropského Parlamentu a Rady 2009/28/EC o podpoře užívání energie z obnovitelných zdrojů a o změně a následném zrušení směrnic 2001/77/ES a 2003/30/ES. Štrasburk, 23.4.2009 (OR. en)

Vyhláška č. 415/2012 Sb. Vyhláška o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší ČSN EN ISO 17225-1 (838202)

ČSN P CEN/TS 15439 Zplyňování biomasy - Dehet a částice v plynných produktech - Vzorkování a analýza

ČSN EN 303-5 Kotle pro ústřední vytápění – Část 5: Kotle pro ústřední vytápění na pevná paliva, s ruční a samočinnou dodávkou, o jmenovitém tepelném výkonu nejvýše 500 kW – Terminologie, požadavky, zkoušení a značení

EN 303-6 Kotle pro ústřední vytápění – Část 6: Kotle pro ústřední vytápění s hořáky s ventilátorem – Zvláštní požadavky na kotle s kombinovaným provozem pro vytápění a ohřev pitné (užitkové) vody, s rozprašovacími hořáky na kapalná paliva, o jmenovitém tepelném příkonu nejvýše 70 kW

4 Výchozí podmínky řešení

4.1 Použitá zařízení

Střížný mlýn, laboratorní váha a sušárna

Po odebrání vzorků z vybraných druhů dřevní biomasy byly vzorky na střížném mlýnu Retsch SM 100 rozemlety na částice o velikosti jednoho milimetru. Odebrané vzorky jsou následně sušeny v horkovzdušné sušárně do ustálení jejich hmotnosti, vyjímaje referenčních vzorků z každého druhu paliva pro zjištění vlastností v původním stavu. K následnému vážení vzorků před jednotlivými analýzami slouží váha Sartorius SP124 S, která je propojena s jednotlivými přístroji a přímo do nich posílá naměřené hodnoty.

Obrázek 12 – laboratorní váha Sartorius SP124 S



Zdroj: vlastní fotografie

Obrázek 11 – střížný mlýn Retsch SM 100



Zdroj: vlastní fotografie

Elementární analyzátor

Elementární analyzátor LECO CHN628 stanovuje procentuální množství dusíku, uhlíku, vodíku v organických materiálech. Analyzátor pracuje na principu spalovací

analýzy, výsledky analýzy získáme do 4,5 minuty. K analyzátoru je připojen počítač, který vyhodnocuje výsledky a je také propojen s laboratorní váhou Sartorius. Vzorek se do analyzátoru vkládá ve fóliovém kelímku na automatický podavač a ten následně vzorek umístí do primární pece. V primární peci dojde k úplné oxidaci v atmosféře kyslíku. Vzniklé oxidy a voda jsou za pomoci nosného kyslíku přemístěny do sekundární pece k další oxidaci. Při stanovení vlastností vychází z norem – ČSN EN 15104 (83 8216), ČSN EN 1529 (83 8226), ČSN EN 15296 (83 8225). K analyzátoru je nutné mít připojené lahve se stlačeným vzduchem, kyslíkem a héliem. [32]

Obrázek 13 – elementární analyzátor LECO CHN628



Zdroj: vlastní fotografie

Termogravimetrický analyzátor

Termogravimetrický analyzátor LECO TGA-701 určuje snížení hmotnosti v závislosti na teplotě. Proces probíhá v řízené atmosféře vzduchu obohacené o dusík. Analyzátor se ovládá pomocí počítače, kde se zobrazují následné výsledky – obrázek 14. Vzorky jsou vkládány do kelímků, které váží váhy zabudované v přístroji. Přístroj dokáže zjistit obsah vlhkosti, prchavé hořlaviny a obsah popela ve zkoumaném palivě. Stanovení těchto vlastností vychází z norem – ČSN EN 14774-2 (83 8220), ČSN EN 14774-3 (83 8220), ČSN EN 14775 (83 8210), ČSN EN 15148 (83 8222). K analyzátoru je nutné mít připojené lahve se vzduchem, kyslíkem a dusíkem. [32]

Obrázek 14 – termogravimetrický analyzátor LECO TGA-701



Zdroj: vlastní fotografie

Kalorimetr

Kalorimetr LECO AC-600 určuje spálené teplo vzorku jeho spálením v řízené atmosféře. Vzorek musí být nejprve upraven do formy slisované tablety (kolem 1 g). Připravený vzorek se vkládá do kovového kelímku a ten následně do spalovací bomby. Spalovací bomba obsahuje zapalovací niť, která se musí dotýkat připraveného vzorku. Bomba je natlakována kyslíkem a poté vložena do vodní lázně kalorimetru. Analýza trvá 5 nebo 9 minut a výsledky spáleného tepla se zobrazují na připojeném počítači – obrázek 15. Výhřevnost se stanovuje výpočtem z výsledků elementární a proximální analýzy vzorků. Při určení těchto vlastností se vychází z normy ČSN EN 14918 (83 8214) a potřebné připojené lahve jsou s kyslíkem a stlačeným vzduchem. [32]

Výhřevnost Q_i můžeme dopočítat pomocí vzorce /1/, kde počítáme se spáleným teplem Q_s , obsahem vodíku H_t a vody W_t v analytickém vzorku koeficientem přepočtu vodíku na vodu (8,94) a hodnotou 24,42, jež představuje spotřebovanou energii na ohřev a vytápění 1 % vody za teploty 25°C. [5]

$$Q_i = Q_s - 24,42 \cdot (W_t + 8,94 \cdot H_t) \quad (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad /1/$$

Obrázek 15 – kalorimetr LECO AC-600



Zdroj: vlastní fotografie

4.2 Použité vzorky

Pro stanovení vlastností byly vybrány vzorky – obrázek 16, které jsou běžně k dostání v obchodech, případně smrkové dřevo obvykle se nacházející v českých lesích.

Obrázek 16 – vzorky použité při měření, zleva štípané smrkové dřevo, dřevěné brikety – tvrdé, dřevěné brikety – měkké, dřevěné pelety a úplně napravo jemná dubová štěpka



Zdroj: vlastní fotografie

Štípané smrkové dřevo

Štípané smrkové dřevo káceno začátkem léta 2019, již jako suché. Kmen smrku o průměru 5 až 8 cm byl nařezán po vzdálenosti přibližně 30 cm a následně naštípan pro snadnější manipulaci a vkládání do kotle. Naštípané dřevo bylo skladováno většinu doby volně v lese a poslední tři měsíce před uskutečněním měření uvnitř (kolem 14 °C), kvůli doschnutí.

Dřevěné brikety – tvrdé

Brikety jsou vyrobeny z pilin bukového dřeva bez přísad na lisovacím stroji. Velikost briket je 155 x 65 x 85 mm, forma 7 (ČSN EN ISO 17225-1, Tuhá Biopaliva – Specifikace a třídy paliv). Výrobce udává výhřevnost je cca 18 MJ.kg⁻¹ a popel cca 1 % hmotnosti.

Dřevěné brikety – měkké

Výroba, forma i vlastnosti uvedené výrobcem měkkých briket jsou totožné, jako u briket tvrdých, jediným rozdílem je druh použitého dřeva, jímž je jehličnaté dřevo.

Dřevěné pelety

Dřevěné pelety jsou vyrobeny ze smrkových pilin bez jakýchkoli přísad na stejném lisu jako brikety. Průměr pelet je 6 mm a délka mezi 10 a 20 mm. Dle výrobce by měla být výhřevnost větší nebo rovna 16,5 MJ.kg⁻¹ a popel po vyhoření 0,7 % hmotnosti a méně.

Jemná dubová štěpka

Primární určení této dubové štěpky je spalování v grilu, díky své malé velikosti 10 - 30 mm. Štěpka je pouze z bukového dřeva včetně kůry a bez přísad.

4.3 Stechiometrie

Stechiometrické výpočty spalovacích procesů doplňují charakteristiky paliva a jsou základem jakýchkoliv tepelných výpočtů. Při řešení návrhové praxe nebo kontrole stávajících zařízení jsou tyto výpočty klíčové. Pomocí stechiometrických výpočtů zjistíme:

- výhřevnost paliva,
- množství kyslíku (vzduchu) potřebného k dokonalému spalování paliva,
- množství a složení spalin,
- měrnou hmotnost spalin,
- adiabatickou, teoretickou a praktickou spalnou teplotu. [6]

4.4 Spotřeba vzduchu a množství spalin

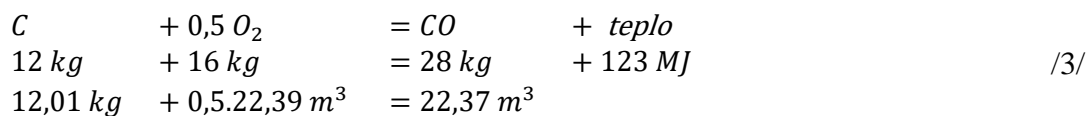
Spalovací proces rozdělujeme dle uskutečněných podmínek na dokonalé, nedokonalé a smíšené spalování. [5]

Při **dokonalém spalování** se spálí veškeré hořlavé složky obsažené v palivu, proto ve vytvořených spalinách již žádné hořlavé složky nejsou. Dokonalé spalování s teoretickým přebytkem vzduchu (L_{\min}) je možné vypočítat ze stechiometrických vztahů spalovacích rovnic. Dosažení tohoto spalování jde pouze při zcela dokonalém promísení paliva se vzduchem a při ideálních spalovacích podmínkách. V praxi je však pro zajištění dokonalého spalování spotřeba vzduchu (kyslíku) větší než teoretická a závisí na druhu paliva, spalovacího zařízení, oblasti spalování (difúzní nebo kinetická) atd. Jedná se tedy o přebytek spalovacího vzduchu, který je tím menší, čím dokonaleji se palivo smísí se vzduchem. Poměru mezi skutečnou a teoretickou spotřebou vzduchu říkáme součinitel přebytku vzduchu n , který lze vyjádřit vztahem:

$$n = \frac{L_{\text{skut}}}{L_{\text{min}}} = \frac{O_{\text{skut}}}{O_{\text{min}}} \doteq \frac{20,95}{20,95 - O_2} \doteq \frac{CO_{2\text{max}}}{CO_2} \quad (-) \quad /2/$$

K zajištění dokonalého spalování je nezbytný přebytek vzduchu. Oproti tomu je nutné počítat se škodlivostí příliš velkého přebytku vzduchu. S nárůstem zúčastněného vzduchu při spalování se zvyšuje množství tepla odnášeného spalinami, snižuje spalná teplota, součinitel využití paliva apod., a proto je nutné používat optimální přebytek vzduchu. [6]

Při **nedokonalém spalování** dochází k přechodu určitého obsahu hořlavých látek do spalin. Nedokonalé spalování nastává vždy při $n < 1$, nebo může nastat i v případě, kdy $n = 0$ či $n > 1$, když dojde k nedokonalému smíšení paliva s oxidačním činidlem. Tento způsob spalování zhoršuje tepelnou účinnost spalování a je ve většině případů nežádoucí, proto se nedokonalé spalování z technologických důvodů využívá jen výjimečně. Základní stechiometrický vztah pro nedokonalé spalování uhlíku je:



Při spalování uhlíku na CO je spotřeba objemu kyslíku poloviční, než při dokonalém spalování na CO₂. Výhřevnost CO je 12 645 kJ.m⁻³. Z důvodu značně vyšší rychlosti reakce hoření vodíku proti průběhu hoření uhlíku je prakticky i při $n < 1$ ztráta nespáleným vodíkem nulová. Jestliže a je podíl uhlíku, který shoří na CO, a b je podíl uhlíku, který vůbec neshoří, zmenší se při nedokonalém spalování objem CO₂ ve spalinách:

$$\Delta v_{CO_2} = (a + b) \cdot \frac{22,37}{12,01} \cdot C \quad (\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}) \quad /4/$$

a navíc vzniká objem CO:

$$v_{CO} = a \cdot \frac{22,37}{12,01} \cdot C \quad (\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}) \quad /5/$$

Spotřeba kyslíku se zmenší o hodnotu:

$$\Delta v_{O_{2min}} = \frac{22,39}{24,02} \cdot a \cdot C + \frac{22,39}{12,01} \cdot b \cdot C \quad (\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}) \quad /6/$$

Množství spalovacího vzduchu klesne o:

$$\Delta v_{sp_{min}}^s = \frac{100}{21} \cdot \Delta v_{O_{2min}} \quad (\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}) \quad /7/$$

Obsah kyslíku ve spalinách je měřítkem přebytku vzduchu jen v případě, že spalování je dokonalé. [6]

O **smíšené spalování** se jedná, když spaliny obsahují oxid uhličitý i oxid uhelnatý.

K výpočtu spotřeby vzduchu a množství spalin můžeme dojít následujícími způsoby:

- podle údajů elementární analýzy pomocí stechiometrických rovnic (analytický způsob),
- pomocí přibližných vzorců, odlišných pro různé druhy paliv (na základě výhřevnosti),
- grafickými metodami.

Pro spalování odpadních látek přichází v úvahu pouze první z uvedených způsobů, tedy stechiometrické výpočty, při nichž se zjednodušuje zaokrouhlením molekulových hmotností a molekulových objemů. Jako okysličovadlo se dále uvažuje suchý vzduch o zjednodušeném složení:

- Objemově: 21% O₂, 78,05% N₂. Z toho složení lze vypočítat poměr kyslíku, dusíku a vzduchu ze vztahu:

$$O_2 : N_2 : \text{vzduch} = \frac{21}{21} : \frac{78,05}{21} : \frac{100}{21} = 1 : 3,716 : 4,76 \quad /8/$$

- Hmotnostně: 23,2% O₂, 75,47% N₂. Analogicky lze určit poměr vztahem:

$$O_2 : N_2 : \text{vzduch} = \frac{23,2}{23,2} : \frac{75,47}{23,2} : \frac{100}{23,2} = 1 : 3,253 : 4,31 \quad /9/$$

Objemové a hmotnostní složení suchého vzduchu bez vodní páry, při zanedbání vzácných plynů, obsažených v nepatrných množstvích, uvádí tabulka 2. [6]

Tabulka 2 – objemové a hmotnostní složení suchého vzduchu

plyn	objemové složení (%)	hmotnostní složení (%)
O ₂	21	23,2
N ₂	75,05	75,474
Ar	0,92	1,28
CO ₂	0,03	0,046

Zdroj: Malaťák, J.; Jevič, P.; Vaculík, P.: Účinné využití tuhých biopaliv v malých spalovacích zařízeních s ohledem na snižování emisí znečišťujících látek.

Atmosférický vzduch použitý ke spalování však obsahuje určité množství vodní páry. Toto množství je závislé na teplotě vzduchu t_v a na relativní vlhkosti vzduchu φ . Objem vodní páry připadající na 1 m³ suchého vzduchu o teplotě t_v je vyjádřen vztahem:

$$v_{H_2O} = \varphi \cdot \frac{p_s}{p_c - p_s \cdot \varphi} \quad (\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}) \quad /10/$$

kde: p_s je tlak vodní páry na mezi sytosti při teplotě t_v (kPa) a p_c je celkový tlak vlhkého vzduchu (kPa).

Součinitel vyjadřující objemové množství vodní páry obsažené ve vzduchu má při dané relativní vlhkosti a teplotě vzduchu velikost:

$$v = 1 + \varphi \cdot \frac{p_s}{p_c - \varphi \cdot p_s} \quad /11/$$

Jeho hodnota bývá přibližně $v = 1,04$.

Při přesných výpočtech objemových množství produktů spalování (kouřových plynů) a potřebného objemu spalovacího vzduchu vycházíme při spalování z molekulové hmotnosti jednotlivých prvků hořlaviny. Molekulové hmotnosti prvků uvádí tabulka 3. [6]

Tabulka 3 – molekulové hmotnosti prvků v hořlavině

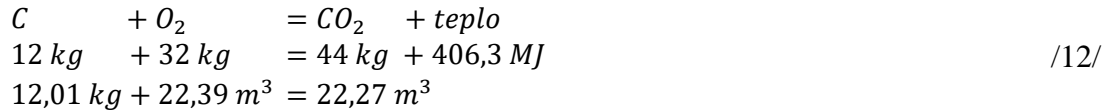
Prvek	Kilomol	
	Hmotnostní (kg)	Objemový (m ³)
Vodík H	2,016	22,39
Uhlík C	12,01	22,39
Kyslík O	32	22,39
Síra S	32,06	22,39
Dusík N	28,02	22,39

Zdroj: Malaťák, J.; Jevič, P.; Vaculík, P.: Účinné využití tuhých biopaliv v malých spalovacích zařízeních s ohledem na snižování emisí znečišťujících látek.

4.5 Spalování tuhých a kapalných odpadů

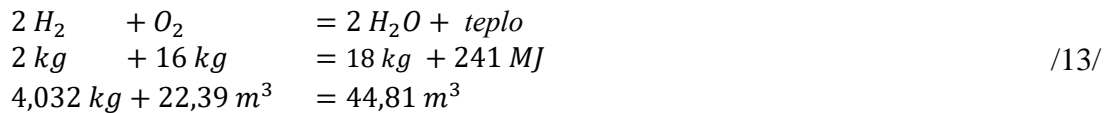
Použitím molekulových hmotností jednotlivých prvků lze vyjádřit vztahy pro oxidační reakce při spalování stechiometrickými rovnicemi:

Spalování uhlíku na oxid uhličitý:



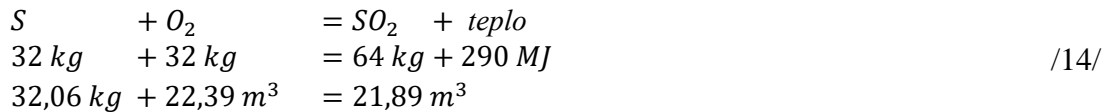
1 kg čistého uhlíku má výhřevnost $33,85 \text{ MJ.kg}^{-1}$.

Spalování vodíku na vodní páru:



1 kg vodíku má výhřevnost $120,5 \text{ MJ.kg}^{-1}$.

Spalování síry na oxid siřičitý:



Při převodu ostatních prvků a vlhkosti (vody) do plynné fáze platí vztahy:

Pro dusík:



Pro kyslík:



Pro vlhkost platí:



Všechny objemy a hmotnosti spalovacího vzduchu a spalin v rovnicích /12/ až /17/ jsou udávány za tzv. normálních podmínek, tedy při teplotě 0°C a normálním atmosférickém tlaku $101,3 \text{ kPa}$. [6]

4.5.1 Hmotnostní spalování

K uvedeným výpočtům se použily rovnice z kapitoly 4.4.

Teoretické množství kyslíku pro dokonalé spalování:

$$O_{min} = \frac{32}{12} \cdot C + \frac{32}{4} \cdot H + \frac{32}{32} \cdot S - \frac{32}{32} \cdot O \quad (\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad /18/$$

Teoretické množství vzduchu pro dokonalé spalování:

$$L_{min} = O_{min} \cdot \frac{100}{23,2} \quad (\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad /19/$$

Skutečné množství vzduchu pro dokonalé spalování:

$$L_{skut} = O_{min} \cdot \frac{100}{23,2} \cdot n \quad (\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad /20/$$

Teoretické hmotnostní množství suchých spalin:

$$m_{spmin}^s = \frac{44}{12} \cdot C + \frac{64}{32} \cdot S + N + 0,75474 \cdot L_{min} \quad (\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad /21/$$

kde: C, H, O, S, N, W jsou poměrná množství uhlíku, vodíku, kyslíku, síry, dusíku a veškeré vody v původním palivu ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) a n je součinitel přebytku vzduchu.

Hmotnostní množství vlhkých spalin:

$$m_{sp}^v = m_{CO_2} + m_{SO_2} + m_{H_2O} + m_{N_2} + m_{O_2} + m_{Ar} \quad (\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad /22/$$

Hmotnostní množství suchých spalin:

$$m_{sp}^s = m_{CO_2} + m_{SO_2} + m_{N_2} + m_{O_2} + m_{Ar} \quad (\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad /23/$$

kde:

$$m_{CO_2} = \frac{44}{12} \cdot C + 0,00046 \cdot L_{skut}$$

$$m_{SO_2} = \frac{64}{32} \cdot S$$

$$m_{H_2O} = \frac{18}{2} \cdot H + W + (v - 1) \cdot L_{skut} \quad (\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad /24/$$

$$m_{N_2} = N + O_{min} \cdot \frac{75,474}{23,2} \cdot n$$

$$m_{O_2} = O_{min} \cdot (n - 1)$$

$$m_{Ar} = 0,0128 \cdot L_{skut}$$

Vyjádření jednotlivých složek spalin v %:

Teoretická hmotnostní koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách:

$$CO_{2max} = \frac{\frac{44}{12} \cdot C}{m_{spmin}^s} \cdot 100 \quad (\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad /25/$$

Teoretická hmotnostní koncentrace oxidu siřičitého v suchých spalinách:

$$SO_{2max} = \frac{\frac{64}{32} \cdot C}{m_{spmin}^s} \cdot 100 \quad (\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad /26/$$

Hmotnostní koncentrace složek spalin ve vlhkých spalinách:

$$CO_2 = \frac{m_{CO_2}}{m_{sp}^v} \cdot 100$$

$$SO_2 = \frac{m_{SO_2}}{m_{sp}^v} \cdot 100$$

$$O_2 = \frac{m_{O_2}}{m_{sp}^v} \cdot 100 \quad (\%) \quad /27/$$

$$H_2O = \frac{m_{H_2O}}{m_{sp}^v} \cdot 100$$

$$N_2 = \frac{m_{N_2}}{m_{sp}^v} \cdot 100$$

4.5.2 Objemové spalování

K výpočtům byly použity rovnice z kapitoly 4.4. V praxi se používají pro přepočty hodnoty reálných molárních objemů plynů. [6]

Teoretické množství kyslíku pro dokonalé spalování:

$$O_{min} = \frac{22,39}{12,01} \cdot C + \frac{22,39}{4,032} \cdot H + \frac{22,39}{32,06} \cdot S - \frac{22,39}{31,99} \cdot O \quad (\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}) \quad /28/$$

Teoretické množství vzduchu pro dokonalé spalování:

$$L_{min} = O_{min} \cdot \frac{100}{21} \quad (\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}) \quad /29/$$

Skutečné množství vzduchu pro dokonalé spalování:

$$L_{skut} = O_{min} \cdot \frac{100}{21} \cdot n \quad (\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}) \quad /30/$$

Teoretické objemové množství suchých spalin:

$$v_{spmin}^s = \frac{22,27}{12,01} \cdot C + \frac{21,89}{32,06} \cdot S + \frac{22,40}{28,013} \cdot N + 0,7805 \cdot L_{min} \quad (\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}) \quad /31/$$

kde: C, H, O, S, N, W jsou poměrná množství uhlíku, vodíku, kyslíku, síry, dusíku a veškeré vody v původním palivu ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) a n je součinitel přebytku vzduchu.

Objemové množství vlhkých spalin:

$$v_{sp}^v = v_{CO_2} + v_{SO_2} + v_{H_2O} + v_{N_2} + v_{O_2} + v_{Ar} \quad (\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}) \quad /32/$$

Objemové množství suchých spalin:

$$v_{sp}^s = v_{CO_2} + v_{SO_2} + v_{N_2} + v_{O_2} + v_{Ar} \quad (\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}) \quad /33/$$

kde:

$$v_{CO_2} = \frac{22,27}{12,01} \cdot C + 0,0003 \cdot L_{skut}$$

$$v_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot S$$

$$v_{H_2O} = \frac{44,81}{4,032} \cdot H + \frac{22,41}{18,015} \cdot W + (v - 1) \cdot L_{skut} \quad (\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}) \quad /34/$$

$$v_{N_2} = \frac{22,40}{28,013} \cdot N + O_{min} \cdot \frac{78,05}{21} \cdot n$$

$$v_{O_2} = O_{min} \cdot (n - 1)$$

$$v_{Ar} = 0,0092 \cdot L_{skut}$$

Vyjádření jednotlivých složek spalin v %:

Teoretická objemová koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách:

$$CO_{2max} = \frac{\frac{22,27}{12,01} \cdot C}{v_{spmin}^s} \cdot 100 \quad (\%) \quad /35/$$

Teoretická objemová koncentrace oxidu siřičitého v suchých spalinách:

$$SO_{2max} = \frac{\frac{21,89}{32,06} \cdot S}{v_{spmin}^s} \cdot 100 \quad (\%) \quad /36/$$

Objemová koncentrace složek spalin ve vlhkých spalinách:

$$CO_2 = \frac{v_{CO_2}}{v_{sp}^v} \cdot 100$$

$$SO_2 = \frac{v_{SO_2}}{v_{sp}^v} \cdot 100$$

$$O_2 = \frac{v_{O_2}}{v_{sp}^v} \cdot 100 \quad (\%) \quad /37/$$

$$H_2O = \frac{v_{H_2O}}{v_{sp}^v} \cdot 100$$

$$N_2 = \frac{v_{N_2}}{v_{sp}^v} \cdot 100$$

5 Měření a dosažené výsledky

5.1 Výsledky elementární analýzy

Výsledky elementární analýzy znázorňuje tabulka 4, jedná se o hodnoty naměřené v suchém stavu zkoumaných vzorků, vyjímaje vlhkost, která byla měřena v původním stavu. Jednotlivé vzorky byly měřeny opakovaně k zajištění přesného výsledku a minimalizace chyb. Kompletní výsledky nalezneme v příloze 1 až 4.

Tabulka 4 – zjištěné vlastnosti paliv v suchém stavu a vlhkost v původním stavu

		Smrkové dřevo	Pelety	Brikety – měkké	Brikety – tvrdé	Štěpka – dub
Popel	% hm.	0,26	0,40	0,48	0,67	1,48
Uhlík	% hm.	51,36	51,76	51,98	50,33	50,37
Vodík	% hm.	5,64	6,07	6,06	5,97	5,93
Dusík	% hm.	0,29	0,24	0,27	0,28	0,33
Kyslík	% hm.	42,46	41,53	41,21	42,74	41,89
Spalné teplo za konst. tlaku	MJ.kg ⁻¹	20,14	20,14	20,26	19,54	19,55
Výhřevnost za konst. tlaku	MJ.kg ⁻¹	18,91	18,82	18,94	18,24	18,25
Původní vlhkost	% hm.	17,02	8,14	8,53	6,29	8,51

Popel

Největší obsah popele má dle elementární analýzy dubová štěpka, 1,48 % hm., u dalších vzorků je obsah popele menší než poloviční oproti dubové štěpce. Obsahy pelet a obou druhů briket splňují hodnoty uvedené na obalu od výrobce. Nejmenší obsah má smrkové dřevo, 0,26 % hm., emise pevných částic popílku při spalování smrkového dřeva jsou tedy ze zkoumaných vzorků nejideálnější.

Uhlík

Obsah uhlíku se pohybuje u zkoumaných paliv mezi 50 a 52 % hm., nejvíce obsahují měkké brikety a to 51,98 % hm. Při uvolňování tepelné energie je obsah uhlíku nejzásadnější.

Vodík

Obsah vodíku ve vzorcích se pohybuje kolem 6 % hm., přičemž nejmenší procento hmotnosti vodíku má smrkové dřevo – 5,64 % hm, nejvíce pak pelety 6,07 % hm. Pouze o jednu setinu % hm. méně než pelety mají měkké brikety.

Dusík

Největší koncentrace dusíku ve vybraných palivech je u dubové štěpky 0,33 % hm. Méně než o jednu desetinu, ale koncentrace ostatních paliv oproti štěpce neklesne.

Kyslík

Hmotnostní procento obsahu kyslíku u vzorků se pohybuje kolem hodnoty 42. Nejvyšší hodnoty nabývá smrkové dřevo s hodnotou 42,46 % hm a nejmenší měkké brikety s hodnotou 41,21 % hm.

Spálené teplo

Spálené teplo se pohybuje v rozmezí od 19,54 MJ.kg⁻¹ do 21,14 MJ.kg⁻¹, kde hodnota 19,54 MJ.kg⁻¹ odpovídá tvrdým briketám a nejvyšší hodnotu 21,14 MJ.kg⁻¹ mají měkké brikety.

Výhřevnost

Výhřevnost vzorků se pohybuje mezi 18 a 19 MJ.kg⁻¹. Nejvyšší výhřevnosti dosahují měkké brikety – 18,94 MJ.kg⁻¹ a nejmenší hodnotu mají brikety tvrdé – 18,24. Hodnoty výhřevnosti měkkých a tvrdých briket odpovídají udávané výhřevnosti výrobcem, který udává cca 18 MJ.kg⁻¹. Naměřená hodnota výhřevnosti pelet 18,82 MJ.kg⁻¹ značně převyšuje minimální hodnotu výhřevnosti dle výrobce – 16,5 MJ.kg⁻¹.

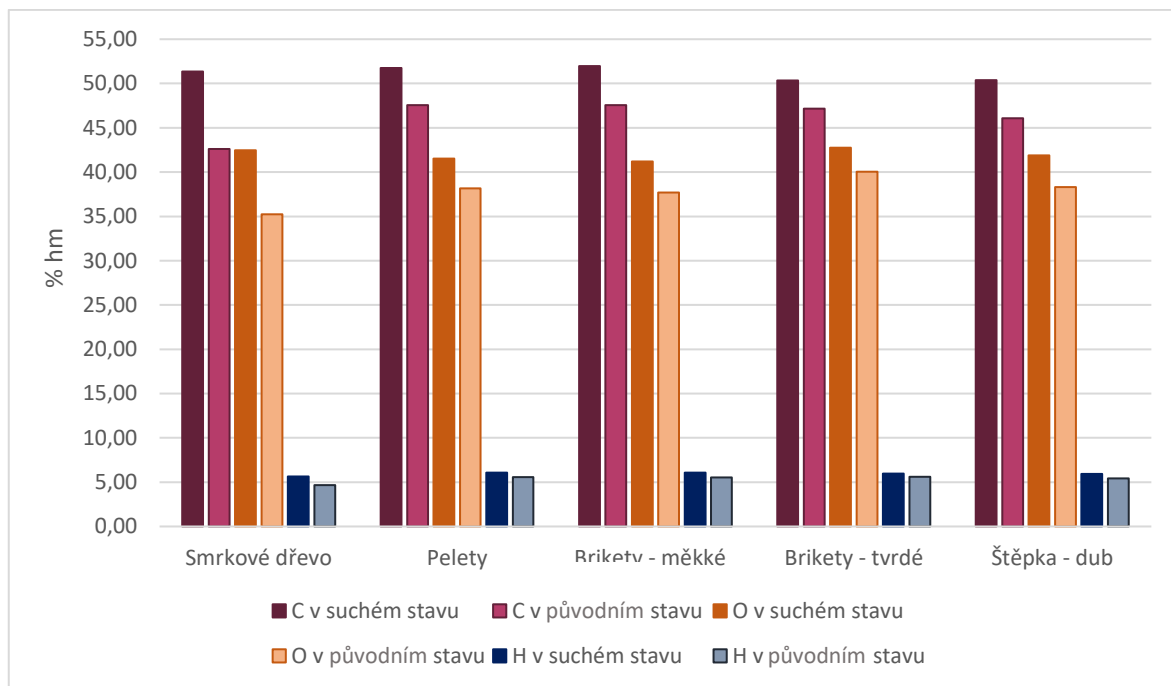
Vlhkost

Nejvyšší vlhkost v původním stavu vzorků byla naměřena u smrkového dřeva a to 17,02 % hm. Vlhkost smrkového dřeva byla tedy minimálně dvakrát větší při porovnání s ostatními zkoumanými vzorky. Tato vyšší vlhkost byla zapříčiněna skladováním polen smrkového dřeva venku, i přestože bylo dřevo tři měsíce před uskutečněním měření přemístěno do vnitřních prostor. Tento fakt značně ovlivnil výhřevnost smrkového dřeva v původním vzorku, kde dřevo dosahovalo nejmenší výhřevnosti, oproti tomu mělo po vysušení smrkové dřevo druhou nejvyšší výhřevnost ze všech vybraných vzorků, tento rozdíl můžeme vidět na obrázku 19.

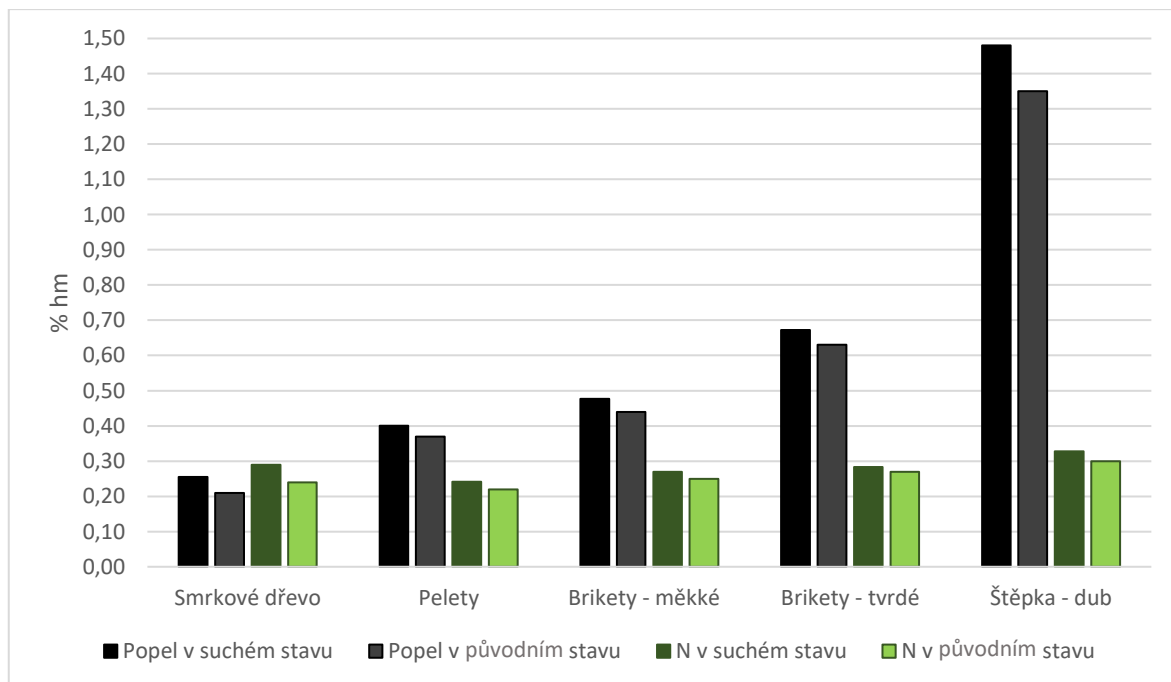
Porovnání původního a suchého stavu

Obrázky 17 - 19 znázorňují rozdíly mezi jednotlivými vlastnostmi zkoumaných vzorků v původním a suchém stavu. Z grafů je patrné, že vzorky v suchém stavu mají všechny hodnoty vyšší ve srovnání se stejnými vzorky v původním stavu.

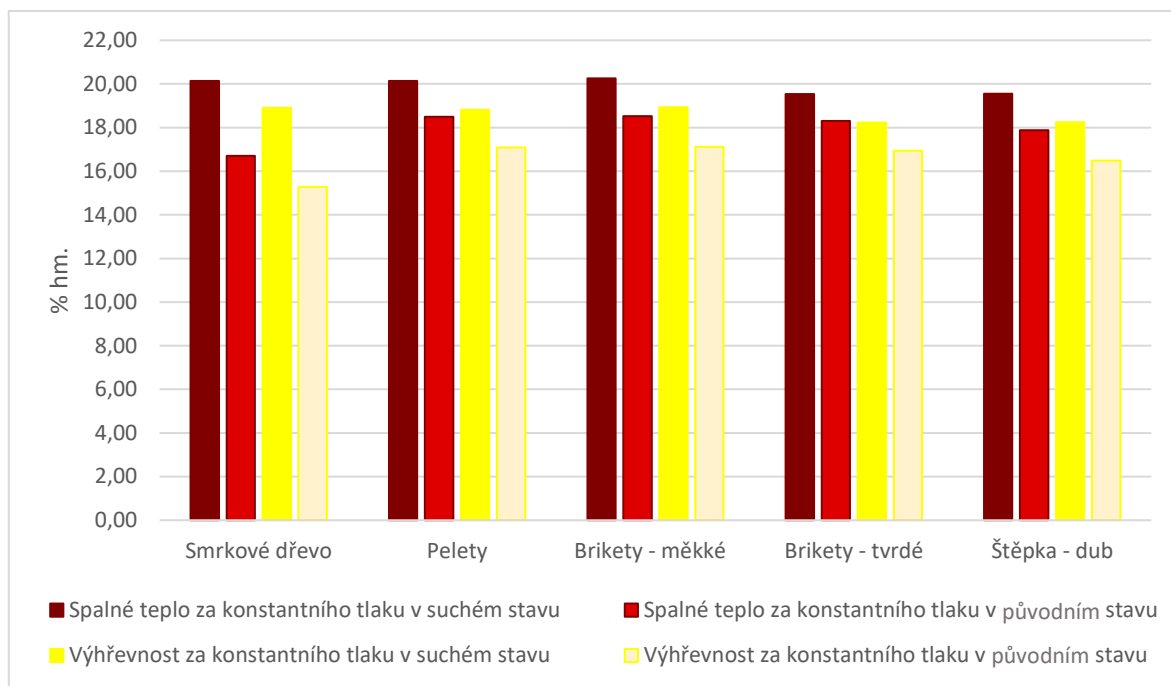
Obrázek 17 – porovnání paliv v suchém a původním stavu pro prvky – uhlík, kyslík a vodík



Obrázek 18 – porovnání paliv v suchém a původním stavu pro popel a dusík



Obrázek 19 – porovnání paliv v suchém a původním stavu pro spálené teplo a výhřevnost



Porovnání výsledků s jinými autory

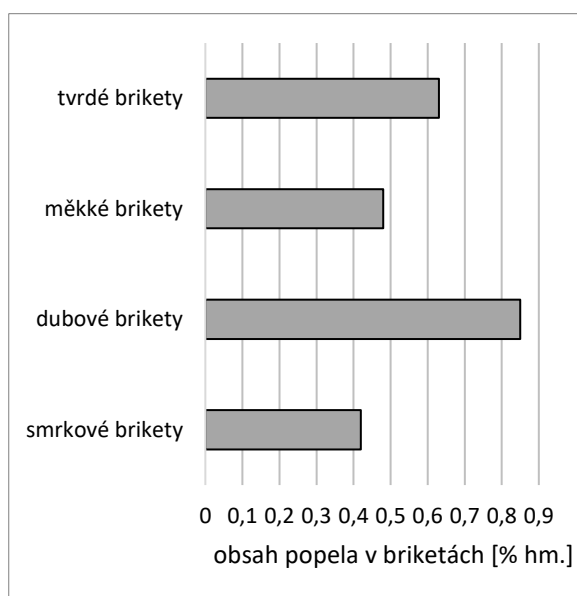
Cosmin Spirchez a spol.

Cosmin Spirchez, Aurel Lunguleasa a Madalina Matei z Transilvania University of Brasov v Rumunsku provedli výzkum briket ze smrkového a dubového dřevního odpadu. U měřených briket byla vlhkost okolo 8 %, s touto hodnotou bylo provedeno měření. S touto hodnotou byly brikety dodány od výrobce v zafóliovaném balení. Po uskutečnění měření vyšly následující výsledky:

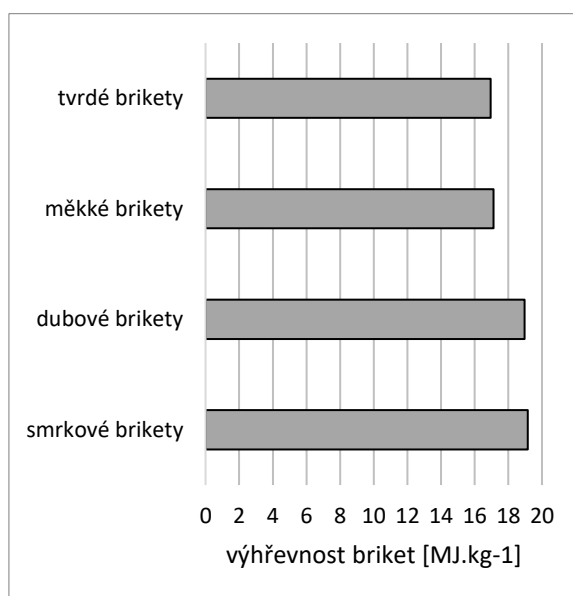
výhřevnost smrkových briket	19,15 MJ.kg ⁻¹ ,
obsah popela smrkových briket	0,42 % hm,
výhřevnost dubových briket	18,97 MJ.kg ⁻¹ ,
obsah popela dubových briket	0,85 % hm. [33]

Výsledky Cosmina Spircheze a spol. byly porovnány s výsledky měkkých (jehličnatých) a tvrdých (bukových) briket zkoumaných v této práci. Při porovnání se pracovalo rovněž s hodnotami v původním stavu – příloha 1, jak byly brikety zakoupeny u výrobce ve fólii. Obrázek 20 znázorňuje rozdíly mezi obsahem porovnávaných briket a obrázek 21 výhřevnost. Rozdíly v obsahu popela a výhřevnosti jsou dány původní vlhkostí, využitým dřevem, ale i technologickým postupem výroby briket.

Obrázek 20 – porovnání obsahu popela



Obrázek 21 – porovnání výhřevnosti



5.2 Výsledky stechiometrické analýzy

Výsledky stechiometrické analýzy vycházejí ze vzorců v kapitole 9.6 s dosazením výsledků z prvkové analýzy. Stechiometrická analýza byla provedena pro všechna měřená paliva vždy pro dokonalé spalování v prvním sloupci ($n = 1$) a pro spalování s přebytkem vzduchu ve sloupci druhém ($n = 1,91$).

Specifické emisní limity se vztahují k celkovému jmenovitému tepelnému příkonu a na normální stavové podmínky a suchý plyn při referenčním obsahu kyslíku v odpadním plynu 6 % pro pevná paliva. Výjimkou je biomasa s 11 % kyslíku v odpadním plynu. V případě kapalných a plyných paliv to jsou 3 %. [34]

Stechiometrická analýza štípaného smrkového dřeva

Skutečné množství vzduchu pro dokonalé hmotnostní spalování štípaného smrkového dřeva má hodnotu $4,99 \text{ kg.kg}^{-1}$ a pro spalování s přebytkem vzduchu $9,54 \text{ kg.kg}^{-1}$. Hmotnostní množství vlhkých spalin pro dokonalé spalování je $6,14 \text{ kg.kg}^{-1}$, přičemž množství suchých spalin je $5,34 \text{ kg.kg}^{-1}$. Hmotnostní množství vlhkých spalin pro spalování s přebytkem vzduchu je $10,81 \text{ kg.kg}^{-1}$ a množství suchých spalin je $9,84 \text{ kg.kg}^{-1}$. Teoretická hmotnostní koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách při dokonalém spalování je 21,31 % hm. a při spalování s přebytkem vzduchu je koncentrace rovněž 21,31 % hm. Teoretická hmotnostní koncentrace oxidu siřičitého v suchých spalinách je 0,00 % hm., z důvodu neměření obsahu síry v palivu při prvkové analýze. Obsah síry se neměřil u žádného z paliv, proto tuto hodnotu teoretické hmotnostní/objemové koncentrace oxidu siřičitého v suchých spalinách mají všechny vzorky.

Skutečné množství vzduchu pro dokonalé objemové spalování je $3,85 \text{ kg.kg}^{-1}$ a pro spalování s přebytkem vzduchu je skutečné množství vzduchu $7,35 \text{ kg.kg}^{-1}$. Objemové množství vlhkých spalin pro dokonalé spalování je $4,72 \text{ kg.kg}^{-1}$, přičemž množství suchých spalin je $3,83 \text{ kg.kg}^{-1}$. Objemové množství vlhkých spalin pro spalování s přebytkem vzduchu je $8,36 \text{ kg.kg}^{-1}$ a množství suchých spalin je $7,33 \text{ kg.kg}^{-1}$. Teoretická hmotnostní koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách při dokonalém spalování a spalování s přebytkem vzduchu je 20,82 % hm.

Kompletní hodnoty stechiometrické analýzy štípaného suchého dřeva jsou v tabulce 5.

Tabulka 5 – výsledné hodnoty stechiometrické analýzy smrkového dřeva

Hmotnostní spalování				
O_{min}	Teoretické množství kyslíku pro dokonalé spalování	1,16	1,16	kg.kg ⁻¹
L_{min}	Teoretické množství vzduchu pro dokonalé spalování	4,99	4,99	kg.kg ⁻¹
L_{skut}	Skutečné množství vzduchu pro spalování	4,99	9,54	kg.kg ⁻¹
n	Součinitel přebytku vzduchu	1,00	1,91	
m^v_{sp}	Hmotnostní množství vlhkých spalin	6,14	10,81	kg.kg ⁻¹
m^s_{sp}	Hmotnostní množství suchých spalin	5,34	9,84	kg.kg ⁻¹
m^s_{spmin}	Teoretické hmotnostní množství suchých spalin	7,33	7,33	kg.kg ⁻¹
m_{CO_2}	Hmotnostní množství CO ₂	1,57	1,57	kg.kg ⁻¹
m_{SO_2}	Hmotnostní množství SO ₂	0,00	0,00	kg.kg ⁻¹
m_{H_2O}	Hmotnostní množství H ₂ O	0,79	0,97	kg.kg ⁻¹
m_{N_2}	Hmotnostní množství N ₂	3,77	7,20	kg.kg ⁻¹
m_{O_2}	Hmotnostní množství O ₂	0,00	1,05	kg.kg ⁻¹
Vyjádření jednotlivých složek spalin v % hm.				
CO_{2max}	Teoretická hmotnostní koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách	21,31	21,31	% hm.
SO_{2max}	Teoretická hmotnostní koncentrace oxidu siřičitého v suchých spalinách	0,00	0,00	% hm.
CO_2	Oxid uhličitý	29,29	15,93	% hm.
SO_2	Oxid siřičitý	0,00	0,00	% hm.
H_2O	Voda	14,84	9,91	% hm.
N_2	Dusík	70,59	73,22	% hm.
O_2	Kyslík	0,00	10,72	% hm.
Objemové spalování				
O_{min}	Teoretické množství kyslíku pro dokonalé spalování	0,81	0,81	m ³ .kg ⁻¹
L_{min}	Teoretické množství vzduchu pro dokonalé spalování	3,85	3,85	m ³ .kg ⁻¹
L_{skut}	Skutečné množství vzduchu pro dokonalé spalování	3,85	7,35	m ³ .kg ⁻¹
n	Součinitel přebytku vzduchu	1,00	1,91	
v^v_{sp}	Objemové množství vlhkých spalin	4,72	8,36	m ³ .kg ⁻¹
v^s_{sp}	Objemové množství suchých spalin	3,83	7,33	m ³ .kg ⁻¹
v^s_{spmin}	Teoretické objemové množství suchých spalin	3,80	3,80	m ³ .kg ⁻¹
v_{CO_2}	Objemové množství CO ₂	0,79	0,79	m ³ .kg ⁻¹
v_{SO_2}	Objemové množství SO ₂	0,00	0,00	m ³ .kg ⁻¹
v_{H_2O}	Objemové množství H ₂ O	0,89	1,03	m ³ .kg ⁻¹
v_{N_2}	Objemové množství N ₂	3,00	5,74	m ³ .kg ⁻¹
v_{O_2}	Objemové množství O ₂	0,00	0,74	m ³ .kg ⁻¹
Vyjádření jednotlivých složek spalin v % obj.				
CO_{2max}	Teoretická objemová koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách	20,82	20,82	% obj.
SO_{2max}	Teoretická objemová koncentrace oxidu siřičitého v suchých spalinách	0,00	0,00	% obj.
CO_2	Oxid uhličitý	16,77	9,48	% obj.
SO_2	Oxid siřičitý	0,00	0,00	% obj.
H_2O	Voda	23,17	14,02	% obj.
N_2	Dusík	78,42	78,24	% obj.
O_2	Kyslík	0,00	10,03	% obj.

Stechiometrická analýza pelet (ze smrkového dřeva)

Skutečné množství vzduchu pro dokonalé hmotnostní spalování pelet je $5,75 \text{ kg.kg}^{-1}$ a pro spalování s přebytkem vzduchu $10,97 \text{ kg.kg}^{-1}$. Hmotnostní množství vlhkých spalin pro dokonalé spalování je $6,91 \text{ kg.kg}^{-1}$, přičemž množství suchých spalin je $6,09 \text{ kg.kg}^{-1}$. Hmotnostní množství vlhkých spalin pro spalování s přebytkem vzduchu je $12,28 \text{ kg.kg}^{-1}$ a množství suchých spalin je $11,26 \text{ kg.kg}^{-1}$. Teoretická hmotnostní koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách při dokonalém spalování je $21,57 \%$ hm. a rovněž $21,57 \%$ hm. při spalování s přebytkem vzduchu.

Skutečné množství vzduchu pro dokonalé objemové spalování je $4,43 \text{ kg.kg}^{-1}$ a pro spalování s přebytkem vzduchu $8,45 \text{ kg.kg}^{-1}$. Objemové množství vlhkých spalin pro dokonalé spalování má hodnotu $5,28 \text{ kg.kg}^{-1}$, přičemž množství suchých spalin je $4,38 \text{ kg.kg}^{-1}$. Objemové množství vlhkých spalin pro spalování s přebytkem vzduchu je $9,47 \text{ kg.kg}^{-1}$ a množství suchých spalin je $8,41 \text{ kg.kg}^{-1}$. Teoretická hmotnostní koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách při dokonalém spalování a spalování s přebytkem vzduchu je $20,33 \%$ hm.

Stechiometrická analýza měkkých briket (z jehličnatého dřeva)

Skutečné množství vzduchu pro dokonalé hmotnostní spalování měkkých briket je $5,75 \text{ kg.kg}^{-1}$ a pro spalování s přebytkem vzduchu $10,98 \text{ kg.kg}^{-1}$. Hmotnostní množství vlhkých spalin pro dokonalé spalování je $6,91 \text{ kg.kg}^{-1}$ a množství suchých spalin je $6,10 \text{ kg.kg}^{-1}$. Hmotnostní množství vlhkých spalin pro spalování s přebytkem vzduchu je $12,29 \text{ kg.kg}^{-1}$ a množství suchých spalin je $11,27 \text{ kg.kg}^{-1}$. Teoretická hmotnostní koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách při dokonalém spalování a spalování s přebytkem vzduchu je $21,56 \%$ hm.

Skutečné množství vzduchu pro dokonalé objemové spalování je $4,43 \text{ kg.kg}^{-1}$ a pro spalování s přebytkem vzduchu má hodnotu $8,46 \text{ kg.kg}^{-1}$. Objemové množství vlhkých spalin pro dokonalé spalování má hodnotu $5,28 \text{ kg.kg}^{-1}$, přičemž množství suchých spalin je $4,38 \text{ kg.kg}^{-1}$. Objemové množství vlhkých spalin pro spalování s přebytkem vzduchu je $9,48 \text{ kg.kg}^{-1}$ a množství suchých spalin je $8,41 \text{ kg.kg}^{-1}$. Teoretická hmotnostní koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách při dokonalém spalování a spalování s přebytkem vzduchu je $20,31 \%$ hm.

Z vypočtených hodnot – tabulka 6 a tabulka 7 je zjevné, že měřené pelety a měkké brikety mají téměř totožné hodnoty, když se tedy paliva mezi sebou zamění, hodnoty spalování a procenta jednotlivých složek ve spalinách zůstanou stejné bez známek záměny.

Tabulka 6 – výsledné hodnoty stechiometrické analýzy pelet

Hmotnostní spalování				
O_{min}	Teoretické množství kyslíku pro dokonalé spalování	1,33	1,33	kg.kg ⁻¹
L_{min}	Teoretické množství vzduchu pro dokonalé spalování	5,75	5,75	kg.kg ⁻¹
L_{skut}	Skutečné množství vzduchu pro spalování	5,75	10,97	kg.kg ⁻¹
n	Součinitel přebytku vzduchu	1,00	1,91	
m^v_{sp}	Hmotnostní množství vlhkých spalin	6,91	12,28	kg.kg ⁻¹
m^s_{sp}	Hmotnostní množství suchých spalin	6,09	11,26	kg.kg ⁻¹
m^s_{spmin}	Teoretické hmotnostní množství suchých spalin	8,08	8,08	kg.kg ⁻¹
m_{CO_2}	Hmotnostní množství CO ₂	1,75	1,75	kg.kg ⁻¹
m_{SO_2}	Hmotnostní množství SO ₂	0,00	0,00	kg.kg ⁻¹
m_{H_2O}	Hmotnostní množství H ₂ O	0,81	1,02	kg.kg ⁻¹
m_{N_2}	Hmotnostní množství N ₂	4,34	8,28	kg.kg ⁻¹
m_{O_2}	Hmotnostní množství O ₂	0,00	1,21	kg.kg ⁻¹
Vyjádření jednotlivých složek spalin v % hm.				
CO_{2max}	Teoretická hmotnostní koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách	21,57	21,57	% hm.
SO_{2max}	Teoretická hmotnostní koncentrace oxidu siřičitého v suchých spalinách	0,00	0,00	% hm.
CO_2	Oxid uhličitý	28,66	15,53	% hm.
SO_2	Oxid siřičitý	0,00	0,00	% hm.
H_2O	Voda	13,35	9,08	% hm.
N_2	Dusík	71,22	73,57	% hm.
O_2	Kyslík	0,00	10,77	% hm.
Objemové spalování				
O_{min}	Teoretické množství kyslíku pro dokonalé spalování	0,93	0,93	m ³ .kg ⁻¹
L_{min}	Teoretické množství vzduchu pro dokonalé spalování	4,43	4,43	m ³ .kg ⁻¹
L_{skut}	Skutečné množství vzduchu pro dokonalé spalování	4,43	8,45	m ³ .kg ⁻¹
n	Součinitel přebytku vzduchu	1,00	1,91	
v^v_{sp}	Objemové množství vlhkých spalin	5,28	9,47	m ³ .kg ⁻¹
v^s_{sp}	Objemové množství suchých spalin	4,38	8,41	m ³ .kg ⁻¹
v^s_{spmin}	Teoretické objemové množství suchých spalin	4,34	4,34	m ³ .kg ⁻¹
v_{CO_2}	Objemové množství CO ₂	0,88	0,88	m ³ .kg ⁻¹
v_{SO_2}	Objemové množství SO ₂	0,00	0,00	m ³ .kg ⁻¹
v_{H_2O}	Objemové množství H ₂ O	0,90	1,06	m ³ .kg ⁻¹
v_{N_2}	Objemové množství N ₂	3,46	6,60	m ³ .kg ⁻¹
v_{O_2}	Objemové množství O ₂	0,00	0,85	m ³ .kg ⁻¹
Vyjádření jednotlivých složek spalin v % obj.				
CO_{2max}	Teoretická objemová koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách	20,33	20,33	% obj.
SO_{2max}	Teoretická objemová koncentrace oxidu siřičitého v suchých spalinách	0,00	0,00	% obj.
CO_2	Oxid uhličitý	16,73	9,34	% obj.
SO_2	Oxid siřičitý	0,00	0,00	% obj.
H_2O	Voda	20,51	12,60	% obj.
N_2	Dusík	78,91	78,50	% obj.
O_2	Kyslík	0,00	10,06	% obj.

Tabulka 7 – výsledné hodnoty stechiometrické analýzy měkkých briket

Hmotnostní spalování				
O_{min}	Teoretické množství kyslíku pro dokonalé spalování	1,33	1,33	kg.kg ⁻¹
L_{min}	Teoretické množství vzduchu pro dokonalé spalování	5,75	5,75	kg.kg ⁻¹
L_{skut}	Skutečné množství vzduchu pro spalování	5,75	10,98	kg.kg ⁻¹
n	Součinitel přebytku vzduchu	1,00	1,91	
m^v_{sp}	Hmotnostní množství vlhkých spalin	6,91	12,29	kg.kg ⁻¹
m^s_{sp}	Hmotnostní množství suchých spalin	6,10	11,27	kg.kg ⁻¹
m^s_{spmin}	Teoretické hmotnostní množství suchých spalin	8,09	8,09	kg.kg ⁻¹
m_{CO_2}	Hmotnostní množství CO ₂	1,75	1,75	kg.kg ⁻¹
m_{SO_2}	Hmotnostní množství SO ₂	0,00	0,00	kg.kg ⁻¹
m_{H_2O}	Hmotnostní množství H ₂ O	0,81	1,02	kg.kg ⁻¹
m_{N_2}	Hmotnostní množství N ₂	4,34	8,29	kg.kg ⁻¹
m_{O_2}	Hmotnostní množství O ₂	0,00	1,21	kg.kg ⁻¹
Vyjádření jednotlivých složek spalin v % hm.				
CO_{2max}	Teoretická hmotnostní koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách	21,56	21,56	% hm.
SO_{2max}	Teoretická hmotnostní koncentrace oxidu siřičitého v suchých spalinách	0,00	0,00	% hm.
CO_2	Oxid uhličitý	28,64	15,52	% hm.
SO_2	Oxid siřičitý	0,00	0,00	% hm.
H_2O	Voda	13,35	9,08	% hm.
N_2	Dusík	71,24	73,59	% hm.
O_2	Kyslík	0,00	10,77	% hm.
Objemové spalování				
O_{min}	Teoretické množství kyslíku pro dokonalé spalování	0,93	0,93	m ³ .kg ⁻¹
L_{min}	Teoretické množství vzduchu pro dokonalé spalování	4,43	4,43	m ³ .kg ⁻¹
L_{skut}	Skutečné množství vzduchu pro dokonalé spalování	4,43	8,46	m ³ .kg ⁻¹
n	Součinitel přebytku vzduchu	1,00	1,91	
v^v_{sp}	Objemové množství vlhkých spalin	5,28	9,48	m ³ .kg ⁻¹
v^s_{sp}	Objemové množství suchých spalin	4,38	8,41	m ³ .kg ⁻¹
v^s_{spmin}	Teoretické objemové množství suchých spalin	4,34	4,34	m ³ .kg ⁻¹
v_{CO_2}	Objemové množství CO ₂	0,88	0,88	m ³ .kg ⁻¹
v_{SO_2}	Objemové množství SO ₂	0,00	0,00	m ³ .kg ⁻¹
v_{H_2O}	Objemové množství H ₂ O	0,90	1,06	m ³ .kg ⁻¹
v_{N_2}	Objemové množství N ₂	3,46	6,61	m ³ .kg ⁻¹
v_{O_2}	Objemové množství O ₂	0,00	0,85	m ³ .kg ⁻¹
Vyjádření jednotlivých složek spalin v % obj.				
CO_{2max}	Teoretická objemová koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách	20,31	20,31	% obj.
SO_{2max}	Teoretická objemová koncentrace oxidu siřičitého v suchých spalinách	0,00	0,00	% obj.
CO_2	Oxid uhličitý	16,72	9,33	% obj.
SO_2	Oxid siřičitý	0,00	0,00	% obj.
H_2O	Voda	20,51	12,60	% obj.
N_2	Dusík	78,93	78,51	% obj.
O_2	Kyslík	0,00	10,06	% obj.

Stechiometrická analýza tvrdých (bukových) briket

Skutečné množství vzduchu pro dokonalé hmotnostní spalování tvrdých briket má hodnotu $5,63 \text{ kg.kg}^{-1}$ a pro spalování s přebytkem vzduchu je hodnota $10,74 \text{ kg.kg}^{-1}$. Hmotnostní množství vlhkých spalin pro dokonalé spalování je $6,78 \text{ kg.kg}^{-1}$, přičemž množství suchých spalin je $5,99 \text{ kg.kg}^{-1}$. Hmotnostní množství vlhkých spalin pro spalování s přebytkem vzduchu je $12,04 \text{ kg.kg}^{-1}$ a množství suchých spalin je $11,05 \text{ kg.kg}^{-1}$. Teoretická hmotnostní koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách při dokonalém spalování je $21,68 \%$ hm. a při spalování s přebytkem vzduchu je koncentrace rovněž $21,68 \%$ hm. – tabulka 8.

Skutečné množství vzduchu pro dokonalé objemové spalování tvrdých briket je $4,33 \text{ kg.kg}^{-1}$ a pro spalování s přebytkem vzduchu je skutečné množství vzduchu $8,28 \text{ kg.kg}^{-1}$. Objemové množství vlhkých spalin pro dokonalé spalování je $5,17 \text{ kg.kg}^{-1}$ a množství suchých spalin je $4,30 \text{ kg.kg}^{-1}$. Objemové množství vlhkých spalin pro spalování s přebytkem vzduchu je $9,27 \text{ kg.kg}^{-1}$ a množství suchých spalin je $8,24 \text{ kg.kg}^{-1}$. Při dokonalém spalování a spalování s přebytkem vzduchu je teoretická hmotnostní koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách $20,54 \%$ hm.

Stechiometrická analýza dubové štěpky

Skutečné množství vzduchu pro dokonalé hmotnostní spalování dubové štěpky je $5,51 \text{ kg.kg}^{-1}$ a pro spalování s přebytkem vzduchu je skutečné množství vzduchu $11,82 \text{ kg.kg}^{-1}$. Hmotnostní množství vlhkých spalin pro dokonalé spalování je $6,66 \text{ kg.kg}^{-1}$, přičemž množství suchých spalin je $5,86 \text{ kg.kg}^{-1}$. Hmotnostní množství vlhkých spalin pro spalování s přebytkem vzduchu je $11,82 \text{ kg.kg}^{-1}$ a množství suchých spalin je $10,83 \text{ kg.kg}^{-1}$. Teoretická hmotnostní koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách při dokonalém spalování je $21,51 \%$ hm. a při spalování s přebytkem vzduchu je koncentrace rovněž $21,51 \%$ hm.

Skutečné množství vzduchu pro dokonalé objemové spalování je $4,25 \text{ kg.kg}^{-1}$ a pro spalování s přebytkem vzduchu je skutečné množství vzduchu $8,11 \text{ kg.kg}^{-1}$. Objemové množství vlhkých spalin pro dokonalé spalování je $5,09 \text{ kg.kg}^{-1}$ a množství suchých spalin je $4,21 \text{ kg.kg}^{-1}$. Objemové množství vlhkých spalin pro spalování s přebytkem vzduchu je $9,11 \text{ kg.kg}^{-1}$ a množství suchých spalin je $8,08 \text{ kg.kg}^{-1}$. Při dokonalém spalování a spalování s přebytkem vzduchu je teoretická hmotnostní koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách $20,48 \%$ hm. Další vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tabulka 9.

Tabulka 8 – výsledné hodnoty stechiometrické analýzy tvrdých briket

Hmotnostní spalování				
O_{min}	Teoretické množství kyslíku pro dokonalé spalování	1,31	1,31	kg.kg ⁻¹
L_{min}	Teoretické množství vzduchu pro dokonalé spalování	5,63	5,63	kg.kg ⁻¹
L_{skut}	Skutečné množství vzduchu pro spalování	5,63	10,74	kg.kg ⁻¹
n	Součinitel přebytku vzduchu	1,00	1,91	
m^v_{sp}	Hmotnostní množství vlhkých spalin	6,78	12,04	kg.kg ⁻¹
m^s_{sp}	Hmotnostní množství suchých spalin	5,99	11,05	kg.kg ⁻¹
m^s_{spmin}	Teoretické hmotnostní množství suchých spalin	7,98	7,98	kg.kg ⁻¹
m_{CO_2}	Hmotnostní množství CO ₂	1,73	1,73	kg.kg ⁻¹
m_{SO_2}	Hmotnostní množství SO ₂	0,00	0,00	kg.kg ⁻¹
m_{H_2O}	Hmotnostní množství H ₂ O	0,79	1,00	kg.kg ⁻¹
m_{N_2}	Hmotnostní množství N ₂	4,25	8,11	kg.kg ⁻¹
m_{O_2}	Hmotnostní množství O ₂	0,00	1,19	kg.kg ⁻¹
Vyjádření jednotlivých složek spalin v % hm.				
CO_{2max}	Teoretická hmotnostní koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách	21,68	21,68	% hm.
SO_{2max}	Teoretická hmotnostní koncentrace oxidu siřičitého v suchých spalinách	0,00	0,00	% hm.
CO_2	Oxid uhličitý	28,93	15,70	% hm.
SO_2	Oxid siřičitý	0,00	0,00	% hm.
H_2O	Voda	13,23	9,02	% hm.
N_2	Dusík	70,95	73,43	% hm.
O_2	Kyslík	0,00	10,75	% hm.
Objemové spalování				
O_{min}	Teoretické množství kyslíku pro dokonalé spalování	0,91	0,91	m ³ .kg ⁻¹
L_{min}	Teoretické množství vzduchu pro dokonalé spalování	4,33	4,33	m ³ .kg ⁻¹
L_{skut}	Skutečné množství vzduchu pro dokonalé spalování	4,33	8,28	m ³ .kg ⁻¹
n	Součinitel přebytku vzduchu	1,00	1,91	
v^v_{sp}	Objemové množství vlhkých spalin	5,17	9,27	m ³ .kg ⁻¹
v^s_{sp}	Objemové množství suchých spalin	4,30	8,24	m ³ .kg ⁻¹
v^s_{spmin}	Teoretické objemové množství suchých spalin	4,26	4,26	m ³ .kg ⁻¹
v_{CO_2}	Objemové množství CO ₂	0,88	0,88	m ³ .kg ⁻¹
v_{SO_2}	Objemové množství SO ₂	0,00	0,00	m ³ .kg ⁻¹
v_{H_2O}	Objemové množství H ₂ O	0,87	1,03	m ³ .kg ⁻¹
v_{N_2}	Objemové množství N ₂	3,38	6,46	m ³ .kg ⁻¹
v_{O_2}	Objemové množství O ₂	0,00	0,83	m ³ .kg ⁻¹
Vyjádření jednotlivých složek spalin v % obj.				
CO_{2max}	Teoretická objemová koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách	20,54	20,54	% obj.
SO_{2max}	Teoretická objemová koncentrace oxidu siřičitého v suchých spalinách	0,00	0,00	% obj.
CO_2	Oxid uhličitý	16,93	9,46	% obj.
SO_2	Oxid siřičitý	0,00	0,00	% obj.
H_2O	Voda	20,33	12,52	% obj.
N_2	Dusík	78,70	78,39	% obj.
O_2	Kyslík	0,00	10,05	% obj.

Tabulka 9 – výsledné hodnoty stechiometrické analýzy dubové štěpky

Hmotnostní spalování				
O_{min}	Teoretické množství kyslíku pro dokonalé spalování	1,28	1,28	kg.kg ⁻¹
L_{min}	Teoretické množství vzduchu pro dokonalé spalování	5,51	5,51	kg.kg ⁻¹
L_{skut}	Skutečné množství vzduchu pro spalování	5,51	10,53	kg.kg ⁻¹
n	Součinitel přebytku vzduchu	1,00	1,91	
m^v_{sp}	Hmotnostní množství vlhkých spalin	6,66	11,82	kg.kg ⁻¹
m^s_{sp}	Hmotnostní množství suchých spalin	5,86	10,83	kg.kg ⁻¹
m^s_{spmin}	Teoretické hmotnostní množství suchých spalin	7,86	7,86	kg.kg ⁻¹
m_{CO_2}	Hmotnostní množství CO ₂	1,69	1,69	kg.kg ⁻¹
m_{SO_2}	Hmotnostní množství SO ₂	0,00	0,00	kg.kg ⁻¹
m_{H_2O}	Hmotnostní množství H ₂ O	0,79	0,99	kg.kg ⁻¹
m_{N_2}	Hmotnostní množství N ₂	4,17	7,95	kg.kg ⁻¹
m_{O_2}	Hmotnostní množství O ₂	0,00	1,16	kg.kg ⁻¹
Vyjádření jednotlivých složek spalin v % hm.				
CO_{2max}	Teoretická hmotnostní koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách	21,51	21,51	% hm.
SO_{2max}	Teoretická hmotnostní koncentrace oxidu siřičitého v suchých spalinách	0,00	0,00	% hm.
CO_2	Oxid uhličitý	28,86	15,66	% hm.
SO_2	Oxid siřičitý	0,00	0,00	% hm.
H_2O	Voda	13,53	9,18	% hm.
N_2	Dusík	71,02	73,46	% hm.
O_2	Kyslík	0,00	10,76	% hm.
Objemové spalování				
O_{min}	Teoretické množství kyslíku pro dokonalé spalování	0,89	0,89	m ³ .kg ⁻¹
L_{min}	Teoretické množství vzduchu pro dokonalé spalování	4,25	4,25	m ³ .kg ⁻¹
L_{skut}	Skutečné množství vzduchu pro dokonalé spalování	4,25	8,11	m ³ .kg ⁻¹
n	Součinitel přebytku vzduchu	1,00	1,91	
v^v_{sp}	Objemové množství vlhkých spalin	5,09	9,11	m ³ .kg ⁻¹
v^s_{sp}	Objemové množství suchých spalin	4,21	8,08	m ³ .kg ⁻¹
v^s_{spmin}	Teoretické objemové množství suchých spalin	4,17	4,17	m ³ .kg ⁻¹
v_{CO_2}	Objemové množství CO ₂	0,86	0,86	m ³ .kg ⁻¹
v_{SO_2}	Objemové množství SO ₂	0,00	0,00	m ³ .kg ⁻¹
v_{H_2O}	Objemové množství H ₂ O	0,88	1,03	m ³ .kg ⁻¹
v_{N_2}	Objemové množství N ₂	3,32	6,34	m ³ .kg ⁻¹
v_{O_2}	Objemové množství O ₂	0,00	0,81	m ³ .kg ⁻¹
Vyjádření jednotlivých složek spalin v % obj.				
CO_{2max}	Teoretická objemová koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách	20,48	20,48	% obj.
SO_{2max}	Teoretická objemová koncentrace oxidu siřičitého v suchých spalinách	0,00	0,00	% obj.
CO_2	Oxid uhličitý	16,81	9,41	% obj.
SO_2	Oxid siřičitý	0,00	0,00	% obj.
H_2O	Voda	20,84	12,78	% obj.
N_2	Dusík	78,76	78,42	% obj.
O_2	Kyslík	0,00	10,05	% obj.

6 Závěr

Bakalářská práce byla zaměřena na biomasu a malá spalovací zařízení určená k jejímu spalování. Cílem bylo seznámit se s touto problematikou a provést elementární a stechiometrickou analýzu vybraných vzorků dřevní biomasy.

V teoretické části byla podrobně probána biomasa – dělení biomasy, úprava biomasy před spalováním, složení a vlastnosti tuhých paliv a získání energie z biomasy. Dále dělení a popis spalovacích zařízení na tuhá paliva. Tyto kapitoly byly sepsány na základě získaných informací z odborné literatury. V praktické části bylo vybráno pět vzorků dřevní biomasy. U vybraných vzorků bylo zjištěno spálené teplo, výhřevnost, obsah vlhkosti a popela a elementární složení, tedy obsah uhlíku, vodíku, dusíku a kyslíku. Po zpracování těchto výsledků získaných měření v laboratoři analýzy organických materiálů nacházející se na technické fakultě České zemědělské univerzity v Praze byly provedeny palivářské výpočty. Na základě výsledku z těchto analýz byly porovnány vlastnosti jednotlivých paliv mezi sebou a následně také porovnány měřené brikety s briketami, u kterých prováděli analýzu jiní autoři.

Výsledky měření potvrzují, že se snížením obsahu vody v tuhém palivu se zvýší hodnota výhřevnosti a spáleného tepla. Například naštípané dřevo je vhodné několik měsíců před spalováním uchovávat v suchých prostorech, kde na něj nepůsobí déšť, mráz apod. Dřevo by mělo být tedy ideálně v co nejsušším stavu při spalování. Výsledky palivářských výpočtů měkkých briket a pelet jsou totožné a provozní parametry spalovacího zařízení se tedy nezmění. Z tohoto hlediska jsou brikety a měkké pelety stejné. Při výběru mezi těmito dvěma palivy je na uvážení kupujícího, které si zvolí. Bude záležet na finančních možnostech kupujícího, prostorovém uspořádání kotelny rodinného domu, kde se bude spalovací zařízení instalovat, anebo na porovnání vlastností samotného paliva, jako je např. výhřevnost, spálené teplo nebo obsah popele.

7 Seznam literatury

- [1] PASTOREK, Z.; J. KÁRA a P. JEVIČ. *Biomasa – obnovitelný zdroj energie*. Nakladatelství FCC Public, Praha 2004, 284 str., ISBN 80-86534-06-5
- [2] DUFKA, J. *Vytápění netradičními zdroji tepla: [biomasa - tepelná čerpadla - solární systémy]*. Praha: BEN - technická literatura, 2003. ISBN 80-7300-079-2.
- [3] JEVIČ, P. *Udržitelná výroba a řízení jakosti tuhých paliv na bázi agrárních bioproduktů: metodická příručka*. Praha: Výzkumný ústav zemědělské techniky, 2008. ISBN 978-80-86884-42-4
- [4] ČSN EN ISO 17225-1, *Tuhá Biopaliva – Specifikace a třídy paliv*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015, 64 str. Třídící znak 838202
- [5] MALAŤÁK, J. a P. VACULÍK. *Biomasa pro výrobu energie*. ČZU v Praze, Technická fakulta, tisk. Powerprint, Praha 2008, 206 s., ISBN: 978-80-213-1810-6
- [6] MALAŤÁK, J.; P. JEVIČ a P. VACULÍK. *Účinné využití tuhých biopaliv v malých spalovacích zařízeních s ohledem na snižování emisí znečišťujících látek*. 2010, Powerprint, Praha, pp. 240, ISBN 978-80-87415-02-3
- [7] HANOUSEK, M. *Topíme dřevem*. Praha: Grada, 2001. Profi & hobby. ISBN 80-247-0082-4
- [8] PŘÍHODA, J, ed. *Racionální využívání lesní biomasy pro energetické účely: sborník referátů*. 11. říjen 2007, Kostelec nad Černými lesy. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2007. ISBN 978-80-213-1691-1
- [9] STUPAVSKÝ, V. a T. HOLÝ. *Dřevní štěrka - zelená, hnědá, bílá*. Biom.cz [online]. 2010-01-01 [cit. 2021-02-20]. Dostupné z WWW: <<https://biom.cz/cz/odborne-clanky/drevni-stepka-zelena-hneda-bila>>. ISSN: 1801-2655.
- [10] STUPAVSKÝ, V. *Pelety z biomasy - dřevěné, rostlinné, kůrové pelety*. Biom.cz [online]. 2010-01-01 [cit. 2021-02-07]. Dostupné z WWW: <<https://biom.cz/cz/odborne-clanky/pelety-z-biomasy-drevene-rostlinne-kurove-pelety>>. ISSN: 1801-2655.
- [11] BENDA, V. *Obnovitelné zdroje energie*. Praha: Profi Press, 2012. ISBN 978-80-86726-48-9
- [12] STUPAVSKÝ, V. a T. HOLÝ. *Brikety z biomasy - dřevěné, rostlinné, směsné brikety*. Biom.cz [online]. 2010-01-01 [cit. 2021-02-07]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/brikety-z-biomasy-drevene-rostlinne-smesne-brikety>>. ISSN: 1801-2655
- [13] OBROUČKA, K. *Termické zneškodňování odpadů*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1997. ISBN 80-7078-505-5
- [14] KULVEITOVÁ, H. *Chemie II: (chemie prvků)*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1322-6.
- [15] ŠRÁMEK, V. *Obecná a anorganická chemie*. 2. vyd. Olomouc: Nakladatelství Olomouc, 2000. ISBN 80-7182-099-7.

- [16] RYBÍN, M. *Průmyslové kotle malých výkonů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963.
- [17] RYBÍN, M. *Spalování paliv a hořlavých odpadů v ohništích průmyslových kotlů*. 2., přeprac. vyd. Praha: SNTL, 1985.
- [18] KOLONIČNÝ, J.; V. BOGOCZOVÁ a J. HORÁK. *Postupy správného topení*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2010. ISBN 978-80-248-2255-6.
- [19] VILIMEC, L. *Stavba kotlů II*. 2. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1716-3.
- [20] MURTINGER, K. a J. BERANOVSKÝ. *Energie z biomasy*. 2., aktualiz. vyd. Brno: ERA, 2008. 21. století. ISBN 978-80-7366-115-1
- [21] KOLAT, P.; V. ROUBÍČEK a J. KOZACZKA. *Pokročilé energetické technologie - zplyňování biomasy a odpadů*: Interviron 2B06068/A 04-03 : ocenění a interpretace odezvy ekosystému na environmentální zátěž v ČR. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1613-5
- [22] POHOŘELÝ, M. a M. JEREMIÁŠ: *Zplyňování biomasy – možnosti uplatnění*. (kolektiv autorů), Výsledky výzkumu, vývoje a inovací pro obnovitelné zdroje energie (OZE 2010). Biom.cz [online]. 2010-11-24 [cit. 2021-02-20]. Dostupné z WWW: <<https://biom.cz/cz/odborne-clanky/zplynovani-biomasy-moznosti-uplatneni>>.
- [23] KOPPE, K. a D. JUCHELKOVÁ. *Nutzung der Biomasse - Využívání biomasy*. Ostrava: Repronis, 2003. ISBN 80-7329-035-9
- [24] OCHODEK, T.; J. KOLONIČNÝ a M. BRANC. *"Technologie pro přípravu a energetické využití biomasy"*: studie v rámci projektu "Možnosti lokálního vytápění a výroby elektřiny z biomasy". Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1426-1.
- [25] DUFKA, J. *Vytápění domů a bytů*. 2., zcela přeprac. vyd. Praha: Grada, 2004. Profi & hobby. ISBN isbn80-247-0642-3.
- [26] EBERT, H.-P. *Topení dřevem ve všech druzích kamen*. Ostrava: HEL, 2007. ISBN isbn978-80-86167-29-9.
- [27] QUASCHNING, V. *Obnovitelné zdroje energií*. Praha: Grada, 2010. Stavitel. ISBN 978-80-247-3250-3
- [28] KOLONIČNÝ, J.; S. PETRÁNKOVÁ ŠEVČÍKOVÁ a J. HORÁK. *Technologie krbových kamen a krbových vložek*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2010. ISBN isbn978-80-248-2254-9.
- [29] KOLONIČNÝ, J.; J. HORÁK a S. PETRÁNKOVÁ ŠEVČÍKOVÁ. *Kotle malých výkonů na pevná paliva*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN isbn978-80-248-2542-7.
- [30] LYČKA, Z. *Malé teplovodní kotle na pevná paliva: spalování pevných paliv po roce 2013*. Krnov: LING Vydavatelství, 2012. ISBN isbn978-80-904914-2-7.

- [31] STUPAVSKÝ, V. *Kotel na pelety - peletový kotel pro ústřední vytápění*. Biom.cz [online]. 2010-01-01 [cit. 2021-03-25]. Dostupné z WWW: <<https://biom.cz/cz/odborne-clanky/kotel-na-pelety-peletovy-kotel-pro-ustredni-vytapeni>>. ISSN: 1801-2655.
- [32] MALAŤÁK, J. et. *Aplikace zplyňovacích technologií při energetickém využití jehličnatých dřevin z kůrovcové a kalamitní těžby*. Praha: Lesy České republiky, s. p., Hradec Králové, 2020, 270s. ISBN:.
- [33] SPIRCHEZ, C.; A. LUNGULEASA a M. MATEI. *Particularities of hollow-core briquettes obtained out of spruce and oak wooden waste*. Maderas: Ciencia y Tecnología [online]. 2018, 20(1), 139-152 [cit. 2021-04-13]. ISSN 07173644.
- [34] *Vyhláška č. 415/2012 Sb. o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší*. Tzb-info.cz [online]. 2012-11-21 [cit. 2021-04-17]. Dostupné z WWW: < <https://www.tzb-info.cz/pravni-predpisy/vyhlaska-c-415-2012-sb-o-pripustne-urovni-znecistovani-a-jejim-zjistovani-a-o-provedeni-nekterych-dalsich-ustanoveni-zakona-o-ochrane-ovzdusi>>.

8 Seznam příloh

Příloha 1 - kompletní výsledky elementární analýzy – část původní

Příloha 2 - kompletní výsledky elementární analýzy – část analytický vzorek

Příloha 3 - kompletní výsledky elementární analýzy – část suchý stav

Příloha 4 - kompletní výsledky elementární analýzy – část hořlavina

Příloha 1 - kompletní výsledky elementární analýzy – část původní vzorek

Vzorek	Původní vzorek								
	Původní vlhkost - možno změnit	Popel celkem	C	H - v hořlavině	N	O - v hořlavině	Spalné teplo za konst. tlaku	Výhřevno st za konst. tlaku	
	% hm.	% hm.	% hm.	% hm.	% hm.	% hm.	MJ.kg-1	MJ.kg-1	
Smrkové dřevo	17,02	0,21	42,62	4,68	0,24	35,23	16,71	15,28	
	SD	0,08							
	RSD	0,45%							
	n	6,00							
	Ua	0,08							
	RUa	0,47%							
	Ub	0,0851							
	RUb	0,50%							
	Uc	0,12	0,02	0,23	0,50	0,11	0,56	0,41	0,42
	RUc	0,69%	7,40%	0,53%	10,75%	44,09%	1,59%	2,42%	2,74%
Pelety	8,14	0,37	47,55	5,58	0,22	38,15	18,50	17,09	
	SD	0,03							
	RSD	0,36%							
	n	5,00							
	Ua	0,04							
	RUa	0,45%							
	Ub	0,0407							
	RUb	0,50%							
	Uc	0,05	0,03	0,27	0,07	0,53	0,60	0,08	0,08
	RUc	0,67%	6,92%	0,57%	1,19%	240,45%	1,58%	0,42%	0,47%
Brikety - jehličnaté dřevo	8,53	0,44	47,55	5,54	0,25	37,70	18,53	17,12	
	SD	0,03							
	RSD	0,32%							
	n	5,00							
	Ua	0,03							
	RUa	0,39%							
	Ub	0,0426							
	RUb	0,50%							
	Uc	0,05	0,03	0,57	0,10	0,15	0,60	0,33	0,33
	RUc	0,64%	7,44%	1,20%	1,86%	62,00%	1,60%	1,77%	1,92%
Brikety - bukové	6,29	0,63	47,16	5,60	0,27	40,06	18,31	16,94	
	SD	0,03							
	RSD	0,56%							
	n	5,00							
	Ua	0,04							
	RUa	0,69%							
	Ub	0,0314							
	RUb	0,50%							
	Uc	0,05	0,04	0,32	0,07	0,67	0,74	0,25	0,25
	RUc	0,85%	6,72%	0,67%	1,18%	252,26%	1,86%	1,37%	1,49%
Štěpka - dub	8,51	1,35	46,09	5,42	0,30	38,32	17,88	16,49	
	SD	0,04							
	RSD	0,51%							
	n	5,00							
	Ua	0,05							
	RUa	0,63%							
	Ub	0,0426							
	RUb	0,50%							
	Uc	0,07	0,07	0,44	0,09	0,64	0,78	0,30	0,30
	RUc	0,80%	5,16%	0,95%	1,59%	213,45%	2,04%	1,68%	1,83%

SD standardní odchylka
RSD relativní standardní odchylka
n počet dobrých měření

nejistota 0,05

Ua chyba měření
RUa relativní chyba měření
Ub chyba přístroje
RUB relativní chyba přístroje
Uc celková chyba měření - interval spolehlivosti
RUc relativní celková chyba měření

na hranici kalibrace
mimo interval kalibrace

Výhřevnost podle ISO 1928

Nestanovována oprava spalného tepla na HNO3. Tam, kde byla měřena Síra, byla provedena oprava spalného tepla výpočtem.

Příloha 2 - kompletní výsledky elementární analýzy – část analytický vzorek

Vzorek	Analytický vzorek								Spalné teplo za konst. obj.	Výhřevnost za konst. tlaku
	Vlhkost ze všech měření	Popel	C	H (vč. vody)	H v hořlavině	N	O v hořlavině			
	% hm.	% hm.	% hm.	% hm.	% hm.	% hm.	% hm.	MJ.kg ⁻¹	MJ.kg ⁻¹	
Smrkové dřevo	17,02	0,21	42,62	6,58	4,68	0,24	35,23	16,71	15,28	
SD	0,08		0,02	0,20		0,01		0,04		
RSD	0,45%		0,04%	3,05%		4,91%		0,27%		
n	6		3	3		2		2		
Ua	0,08		0,05	0,50		0,11		0,40		
RUa	0,47%		0,11%	7,57%		44,08%		2,40%		
Ub	0,09		0,21	0,07		0,00		0,04		
RUb	0,50%		0,50%	1,00%		0,80%		0,25%		
Uc	0,12	0,02	0,22	0,50	0,50	0,11	0,56	0,40	0,42	
RUC	0,69%	7,40%	0,51%	7,64%	10,75%	44,09%	1,60%	2,42%	2,74%	
Pelety	8,14	0,37	47,55	6,49	5,58	0,22	38,15	18,50	17,09	
SD	0,03		0,05	0,01		0,06		0,01		
RSD	0,36%		0,11%	0,09%		26,76%		0,04%		
n	5		3	3		2		2		
Ua	0,04		0,13	0,01		0,53		0,06		
RUa	0,45%		0,28%	0,22%		240,45%		0,33%		
Ub	0,04		0,24	0,06		0,00		0,05		
RUb	0,50%		0,50%	1,00%		0,80%		0,25%		
Uc	0,05	0,03	0,27	0,07	0,07	0,53	0,60	0,08	0,08	
RUC	0,67%	6,92%	0,57%	1,02%	1,20%	240,45%	1,58%	0,41%	0,47%	
Brikety - jehličnaté dřevo	8,53	0,44	47,55	6,50	5,54	0,25	37,70	18,53	17,12	
SD	0,03		0,21	0,03		0,02		0,04		
RSD	0,32%		0,44%	0,50%		6,90%		0,19%		
n	5		3	3		2		2		
Ua	0,03		0,52	0,08		0,15		0,32		
RUa	0,39%		1,09%	1,23%		62,00%		1,75%		
Ub	0,04		0,24	0,06		0,00		0,05		
RUb	0,50%		0,50%	1,00%		0,80%		0,25%		
Uc	0,05	0,03	0,57	0,10	0,10	0,15	0,60	0,33	0,33	
RUC	0,64%	7,44%	1,20%	1,59%	1,86%	62,00%	1,60%	1,77%	1,92%	
Brikety - bukové	6,29	0,63	47,16	6,30	5,60	0,27	40,06	18,31	16,94	
SD	0,03		0,08	0,01		0,07		0,03		
RSD	0,56%		0,18%	0,12%		28,08%		0,15%		
n	5		3	3		2		2		
Ua	0,04		0,21	0,02		0,67		0,25		
RUa	0,69%		0,44%	0,31%		252,26%		1,35%		
Ub	0,03		0,24	0,06		0,00		0,05		
RUb	0,50%		0,50%	1,00%		0,80%		0,25%		
Uc	0,05	0,04	0,32	0,07	0,07	0,67	0,74	0,25	0,25	
RUC	0,85%	6,72%	0,67%	1,05%	1,18%	252,26%	1,86%	1,37%	1,49%	
Štěpka - dub	8,51	1,35	46,09	6,38	5,42	0,30	38,32	17,88	16,49	
SD	0,04		0,15	0,02		0,07		0,03		
RSD	0,51%		0,32%	0,36%		23,76%		0,18%		
n	5		3	3		2		2		
Ua	0,05		0,37	0,06		0,64		0,30		
RUa	0,63%		0,80%	0,90%		213,45%		1,66%		
Ub	0,04		0,23	0,06		0,00		0,04		
RUb	0,50%		0,50%	1,00%		0,80%		0,25%		
Uc	0,07	0,07	0,43	0,09	0,09	0,64	0,78	0,30	0,30	
RUC	0,80%	5,16%	0,94%	1,35%	1,59%	213,45%	2,04%	1,68%	1,83%	

SD standardní odchylka

RSD relativní standardní odchylka

n počet dobrých měření

nejistota 0,05

Ua chyba měření

RUa relativní chyba měření

Ub chyba přístroje

RUb relativní chyba přístroje

Uc celková chyba měření - interval spolehlivosti

RUC relativní celková chyba měření

na hranici kalibrace

mimo interval kalibrace

Výhřevnost podle ISO 1928

Nestanovována oprava spalného tepla na HNO₃. Tam, kde byla měřena síra, byla provedena oprava spalného tepla výpočtem.

Příloha 3 - kompletní výsledky elementární analýzy – část suchý stav

Vzorek		Suchý stav					Spalné teplo za konst. obj. MJ.kg ⁻¹	Spalné teplo za konst. tlaku MJ.kg ⁻¹	Výhřevnost za konst. tlaku MJ.kg ⁻¹
		Popel % hm.	C % hm.	H % hm.	N % hm.	O % hm.			
Smrkové dřevo	<i>SD</i>	0,26	51,36	5,64	0,29	42,46	20,14	20,14	18,91
	<i>RSD</i>	0,02							
	<i>n</i>	7,03%							
	<i>Ua</i>	6							
	<i>RUa</i>	0,02							
	<i>Ub</i>	7,38%							
	<i>RUb</i>	0,00							
	<i>Uc</i>	0,50%							
	<i>Uc</i>	0,02	0,27	0,61	0,13	0,68	0,49	0,49	0,50
	<i>RUc</i>	7,40%	0,53%	10,75%	44,09%	1,59%	2,42%	2,42%	2,67%
Pelety	<i>SD</i>	0,40	51,76	6,07	0,24	41,53	20,14	20,14	18,82
	<i>RSD</i>	0,02							
	<i>n</i>	5,56%							
	<i>Ua</i>	5							
	<i>RUa</i>	0,03							
	<i>Ub</i>	6,90%							
	<i>RUb</i>	0,00							
	<i>Uc</i>	0,50%							
	<i>Uc</i>	0,03	0,30	0,07	0,58	0,66	0,08	0,08	0,09
	<i>RUc</i>	6,92%	0,57%	1,19%	240,45%	1,58%	0,42%	0,42%	0,45%
Brikety - jehličnaté dřevo	<i>SD</i>	0,48	51,98	6,06	0,27	41,21	20,26	20,26	18,94
	<i>RSD</i>	0,03							
	<i>n</i>	5,98%							
	<i>Ua</i>	5							
	<i>RUa</i>	0,04							
	<i>Ub</i>	7,43%							
	<i>RUb</i>	0,00							
	<i>Uc</i>	0,50%							
	<i>Uc</i>	0,04	0,63	0,11	0,17	0,66	0,36	0,36	0,36
	<i>RUc</i>	7,44%	1,20%	1,86%	62,00%	1,60%	1,77%	1,77%	1,90%
Brikety - bukové	<i>SD</i>	0,67	50,33	5,97	0,28	42,74	19,54	19,54	18,24
	<i>RSD</i>	0,04							
	<i>n</i>	5,40%							
	<i>Ua</i>	5							
	<i>RUa</i>	0,05							
	<i>Ub</i>	6,70%							
	<i>RUb</i>	0,00							
	<i>Uc</i>	0,50%							
	<i>Uc</i>	0,05	0,34	0,07	0,71	0,79	0,27	0,27	0,27
	<i>RUc</i>	6,72%	0,67%	1,18%	252,26%	1,86%	1,37%	1,37%	1,47%
Štěpka - dub	<i>SD</i>	1,48	50,37	5,93	0,33	41,89	19,54	19,55	18,25
	<i>RSD</i>	0,06							
	<i>n</i>	4,14%							
	<i>Ua</i>	5							
	<i>RUa</i>	0,08							
	<i>Ub</i>	5,14%							
	<i>RUb</i>	0,01							
	<i>Uc</i>	0,50%							
	<i>Uc</i>	0,08	0,47	0,09	0,70	0,85	0,33	0,33	0,33
	<i>RUc</i>	5,16%	0,94%	1,59%	213,45%	2,04%	1,68%	1,68%	1,80%

SD standardní odchylka
RSD relativní standardní odchylka
n počet dobrých měření
nejistota 0,05
Ua chyba měření
RUa relativní chyba měření
Ub chyba přístroje
RUb relativní chyba přístroje
Uc celková chyba měření - interval spolehlivosti
RUc relativní celková chyba měření
 na hranici kalibrace
 mimo interval kalibrace

Výhřevnost podle ISO 1928 Nestanovována oprava spalného tepla na HNO₃. Tam, kde byla měřena Síra, byla provedena oprava spalného tepla výpočtem.

Příloha 4 - kompletní výsledky elementární analýzy – část hořlavina

Vzorek	Hořlavina						
	C	H	N	O	Spalné teplo	Výhřevnost	
	% hm.	% hm.	% hm.	% hm.	MJ.kg ⁻¹	MJ.kg ⁻¹	
Smrkové dřevo	51,49	5,65	0,29	42,57	20,19	18,96	
SD							
RSD							
n							
Ua							
RUa							
Ub							
RUb							
Uc	0,27	0,61	0,13	0,68	0,49	0,51	
RUC	0,53%	10,75%	44,09%	1,59%	2,42%	2,67%	
Pelety	51,97	6,09	0,24	41,70	20,22	18,89	
SD							
RSD							
n							
Ua							
RUa							
Ub							
RUb							
Uc	0,30	0,07	0,58	0,66	0,08	0,09	
RUC	0,57%	1,19%	240,45%	1,58%	0,42%	0,46%	
Brikety - jehličnaté dřevo	52,23	6,09	0,27	41,41	20,36	19,03	
SD							
RSD							
n							
Ua							
RUa							
Ub							
RUb							
Uc	0,63	0,11	0,17	0,66	0,36	0,36	
RUC	1,20%	1,86%	62,00%	1,60%	1,77%	1,90%	
Brikety - bukové	50,67	6,01	0,29	43,03	19,67	18,36	
SD							
RSD							
n							
Ua							
RUa							
Ub							
RUb							
Uc	0,34	0,07	0,72	0,80	0,27	0,27	
RUC	0,67%	1,18%	252,26%	1,86%	1,37%	1,47%	
Štěpka - dub	51,13	6,02	0,33	42,52	19,84	18,53	
SD							
RSD							
n							
Ua							
RUa							
Ub							
RUb							
Uc	0,48	0,10	0,71	0,87	0,33	0,33	
RUC	0,95%	1,59%	213,45%	2,04%	1,68%	1,80%	

SD standardní odchylka
RSD relativní standardní odchylka
n počet dobrých měření
nejistota 0,05
Ua chyba měření
RUa relativní chyba měření
Ub chyba přístroje
RUb relativní chyba přístroje
Uc celková chyba měření - interval spolehlivosti
RUC relativní celková chyba měření
na hranici kalibrace
mimo interval kalibrace

Výhřevnost podle ISO 1928 Nestanovována oprava spalného tepla na HNO₃. Tam, kde byla měřena Sira, byla provedena oprava spalného tepla výpočtem.