

Česká zemědělská univerzita v Praze
Technická fakulta
Katedra technologických zařízení staveb



Diplomová práce

**Optimalizace tepelně-emisních vlastností malých
spalovacích zařízení**

Bc. Petr Zahrádka

© 2017 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Petr Zahrádka

Obchod a podnikání s technikou

Název práce

Optimalizace tepelně-emisních vlastností malých spalovacích zařízení

Název anglicky

Optimization of heat-emission characteristics of small combustion plants

Cíle práce

Cílem diplomové práce je experimentální ověření teoretických předpokladů spalování v podmínkách malých spalovacích zařízení. Cíle práce budou vycházet z určených klasifikačních, jakostních a specifikačních rámců a charakteristiky souvisejících právních předpisů spalování paliv v malých spalovacích zařízeních.

V praktické části diplomové práce budou jednotlivé vzorky analyzovány na palivářské vlastnosti v laboratoři TF a následně budou ověřovány na tepelně-emisní charakteristiky během spalování. Závěrem se výsledky z měření statisticky vyhodnotí a ekonomicky se posoudí využití vybraných vzorků paliv na spalovacím zařízení.

Metodika

- 1 Úvod
- 2 Cíl práce
- 3 Metodika práce
- 4 Současný stav sledované problematiky
- 5 Praktická část práce
- 6 Výsledky a diskuse
- 7 Závěr a doporučení
- 8 Seznam použitých zdrojů

Doporučený rozsah práce

50-60 stran

Klíčová slova

Biomasa, prvkový rozbor, výhřevnost, stechiometrie, spaliny

Doporučené zdroje informací

- Diasa, J., Dostav, M., Azevedob, J.L.T., 2004. Test of a small domestic boiler using different pellets. Biomass and Bioenergy 27, 531–539.
- Eskilsson, D., 2004. Optimisation of efficiency and emissions in pellet burners. Biomass and Bioenergy 27, 541–546.
- 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

2016/17 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Jan Malaťák, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra technologických zařízení staveb

Elektronicky schváleno dne 11. 1. 2016

doc. Ing. Jan Malaťák, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 20. 1. 2016

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 25. 02. 2017

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci „Optimalizace tepelně-emisních vlastností malých spalovacích zařízení“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použité literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 4. 4. 2017

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu doc. Ing. Janu Malatřákovi, Ph.D., za jeho cenné rady při konzultacích, podklady a odborné vedení, které mi pomohli při zpracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat vedení společnosti TOP – EL, spol. s r. o., za podporu a poskytnuté materiály a celé mé rodině za podporu v průběhu mého studia.

Optimalizace tepelně-emisních vlastností malých spalovacích zařízení

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na experimentální ověření teoretických předpokladů spalování vybraných vzorků paliv dřevní biomasy v malých spalovacích zařízeních. Cíle práce budou vycházet z určených klasifikačních, jakostních a specifikačních rámců a charakteristiky související s legislativními předpisy při spalování biopaliv. V praktické části diplomové práce jsou vzorky paliv analyzovány na palivářské vlastnosti a následně ověřeny na tepelně-emisní charakteristiky během spalování. Z výsledků měření jsou vyhodnoceny grafické závislosti oxidu uhelnatého (CO), oxidu uhličitého (CO₂), oxidy dusíku (NO_x) a teploty spalin (t) na součiniteli přebytku vzduchu. Tyto závislosti jsou následně matematicky vyjádřeny pomocí regresní analýzy. Závěrem je provedeno ekonomické zhodnocení použití spalovacího zařízení jako doplňkový zdroj tepla v domácnosti.

Klíčová slova: Biomasa, prvkový rozbor, výhřevnost, stechiometrie, spaliny

Optimization of heat-emission characteristics of small combustion plants

ABSTRACT

The thesis is focused on experimental verification of theoretical assumptions of combustion selected fuel samples of wood biomass in small combustion devices. The aims of this thesis will be determined based on the classification, specification and quality frameworks and characteristics associated with legal requirements during burning biofuels. In the practical part the samples are analyzed for fuel properties and then validated on heat-emission characteristics during combustion. During the actual measurement results are evaluated by a plot of carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO₂), nitrogen oxides (NO_x) and flue gas temperature (t) depending on the excess air coefficient. These dependencies are mathematically expressed by regression analysis. In conclusion, there is performed an economic evaluation of using the combustion device as a supplemental heat source at home.

Keywords: Biomass, elemental analysis, calorific value, stoichiometry, flue gas

Obsah

1. Úvod.....	2
2. Cíle práce	3
3. Metodika praktické části práce	4
4. Současný stav sledované problematiky	6
4.1 Spalovací zařízení na tuhá biopaliva	6
4.1.1 Lokální spalovací zařízení na dřevo a dřevěné brikety.....	7
4.1.1.1 Nejčastější zástupci současných malých lokálních spalovacích zařízení	10
4.1.2 Spalovací zařízení na dřevo a dřevěné brikety s teplovodním výměníkem.....	13
4.1.2.1 Nejčastější zástupci současných malých spalovacích zařízení s teplovodním výměníkem.....	14
4.1.3 Lokální spalovací zařízení na dřevěné pelety	15
4.1.4 Spalovací zařízení na dřevěné pelety s teplovodním výměníkem	16
4.1.4.1 Nejčastější zástupci současných malých spalovacích zařízení s teplovodním výměníkem.....	17
4.1.5 Spalovací zařízení kombinovaná na dřevo a pelety.....	18
4.1.6 Spalovací zařízení na dřevní štěpku.....	18
4.2 Legislativní požadavky pro provoz spalovacích zařízení	19
4.2.1 Zákon o ochraně ovzduší	19
4.2.2 Normy pro lokální spalovací zařízení	23
4.3 Biomasa.....	25
4.3.1 Členění biomasy	25
4.3.1.1 Dřevní Biomasa	26
4.3.2 Specifikace tuhých biopaliv na základě obchodních forem a vlastností.....	26
4.3.2.1 Obchodní forma a specifikace vlastností tuhých biopaliv	27

4.3.3 Způsoby využití biomasy k energetickým účelům	28
4.3.4 Dřevní biomasa jako základní palivo pro spalovací zařízení	29
4.3.4.1 Palivové (kusové) dřevo	29
4.3.4.2 Dřevěné pelety – peletování	30
4.3.4.3 Dřevěné brikety – briketování	31
4.3.4.4 Dřevní štěpka – štěpkování	32
4.4 Základní vlastnosti a složení tuhých paliv – biopaliv	33
4.4.1 Chemické složení tuhých paliv	33
4.4.2 Výhřevnost a spalné teplo tuhých paliv	35
4.4.3 Obsah vody	35
4.4.4 Prchavá hořlavina V [% hm.] v tuhých palivech	36
4.4.5 Popel	37
4.4.6 Teploty popela	37
5. Praktická část práce	38
5.1 Metodika stanovení tepelně-emisních vlastností spalovacích zařízení	38
5.1.1 Metodika stanovení stechiometrie spalovacích procesů	38
5.1.1.1 Spalování tuhých a kapalných paliv	44
5.1.2 Metodika přepočtu koncentrace znečišťujících látek	45
5.1.3 Metodika měření emisních koncentrací	47
5.1.4 Statistická analýza vztahů mezi veličinami – regresní analýza	50
5.1.5 Použité spalovací zařízení	50
5.1.6 Vybrané vzorky tuhých biopaliv	52
5.1.6.1 Vyhodnocení prvkové a stechiometrické analýzy vybraných vzorků biopaliv	52
5.1.6.2 Tepelně-emisní měření vybraných vzorků biopaliv	59
5.2 Výsledky a diskuse	68

5.3 Ekonomické zhodnocení použití spalovacího zařízení jako doplňkový zdroj tepla ..	69
6. Závěr	74
7. Seznam použitých zdrojů.....	75
8. Seznam použitých obrázků	78
9. Seznam použitých tabulek	79
10. Seznam použitých grafů.....	80
Příloha 1	81
Příloha 2: Revizní zpráva o kontrole spalovacího zařízení [6].....	83

1. Úvod

V současné době je stále rostoucí zájem o vybavení domácnosti malým spalovacím zařízením na tuhá biopaliva. Převážně se jedná o lokální zařízení, jakými jsou krbová kamna, sporáky, pece, krbové vložky a kotle. Podstatně narůstá i procentuální podíl zařízení, která jsou napojena na systém ústředního vytápění – čili s teplovodním výměníkem. Čím dál tím více jsou zařízení, instalována přímo do interiéru především díky estetickým vlastnostem a možností pohledu na hořící oheň v interiéru. Současně je využito veškeré vyprodukované teplo do prostoru, které by se jinak akumulovalo v kotelně.

Vytápění biomasou v malých spalovacích zařízeních bez teplovodního výměníku má rozhodující význam i z hlediska energetické bezpečnosti, neboť není výhradně závislé na centrálním dodávání tepelné nebo jiné energie. [1]

Technický pokrok i vzrůstající životní úroveň vedou stále ke zvyšující se spotřebě energie. S navyšující produkcí energie jsou však spojeny i negativní aspekty, mezi něž se na první místa řadí snižující se zásoby fosilních paliv, dlouhodobý růst emisních koncentrací škodlivin v atmosféře a množství tuhých odpadů. Alternativou pro výrobu potřebné energie jsou obnovitelné zdroje energie, mezi které se řadí i biomasa. Biomasa u nás představuje obnovitelný zdroj s největším využitelným potenciálem a v posledních letech stoupá díky narůstajícím cenám fosilních paliv a ostatních energií. Její spotřeba progresivně stoupá převážně v domácnostech, ale i ve středních a větších podnicích (teplárny, elektrárny, fabriky). Z dlouhodobého hlediska se na biomasu v energetické politice ČR pohlíží jako na významný energetický zdroj a předpokládá se, že její podíl na celkové bilanci využívání obnovitelných zdrojů bude 80 % v roce 2020 a 85 % v roce 2030. [2]

Spalování tuhých paliv je vždy doprovázeno produkcí znečišťujících látek a obecným cílem většiny výrobců biopaliv i spalovacích zařízení, je snížit hodnoty těchto látek na minimum. Jedním z důležitých nástrojů ke snížení množství vypouštěných znečišťujících látek, jsou legislativní požadavky a směrnice na spalovací zařízení napojené na soustavu ústředního topení a také na samotné palivo. Především se hledí na účinnost spalování, tepelně emisní vlastnosti, emisní hodnoty ve výstupních spalínách, vlhkost a kvalitu paliva.

2. Cíle práce

Tato diplomová práce řeší důležité otázky při používání biomasy jako tuhého paliva do malých spalovacích zařízení.

Cílem práce je porovnat vybrané vzorky tuhých biopaliv, získané z lesnické produkce a posoudit jejich vhodnost jako palivo pro malá spalovací zařízení, která jsou dnes stále více žádaná v domácnostech jako doplněk ke stávajícímu ústřednímu topení. Výsledky jsou následně posouzeny z hlediska dopadu na ekologii, ale i na ekonomii provozu, která se zakládá ve znalosti stechiometrických charakteristik paliv, emisních faktorů, podmínek spalovacích procesů a tepelné práce samotného spalovacího zařízení.

Měření je zaměřeno na koncentrace emisí vzniklé spalováním vybraných vzorků biopaliv. Jsou zjišťovány oxidy uhlíku, oxidy dusíku, oxidy síry a uhlovodíky. Oxid uhličitý je stanoven na základě naměřené koncentrace kyslíku a charakteristiky biopaliv. Prostřednictvím těchto měření je posuzováno palivo i spalovací zařízení, pokud jde o jeho tepelné parametry a emisní poměry. Zkoušky jsou uskutečněny ve školní laboratoři ČZU v Praze na Katedře Technologických zařízení staveb.

Veškerá zařízení při spalování biopaliv produkují znečišťující látky, které jsou v této práci jednotlivě popsány, zkoumány při měření vybraných vzorků tuhých biopaliv a následně graficky vyhodnoceny.

Výsledek práce a její přínos, spočívá především v posouzení vhodnosti a optimalizace spalování vybraných tuhých biopaliv z lesnické produkce ve spalovacím zařízení s ohledem na životní prostředí a současně ekonomii provozu. Na závěr jsou vyhodnoceny i dopady na ekonomiku v domácnosti, při použití spalovacího zařízení jako doplňkového zdroje tepla.

3. Metodika praktické části práce

Metodika řešení jednotlivých cílů praktické části diplomové práce je založena na analytickém zpracování naměřených a vypočítaných hodnot a jejich syntéze.

Metodika praktické části vychází z určených klasifikačních, jakostních a specifikačních rámců tuhých biopaliv a charakteristiky souvisejících právních předpisů, typů běžných lisovaných biopaliv a legislativních podmínek v oblasti emisních limitů a kvality paliv z hlediska ochrany ovzduší. Pro stanovení, zpracování a vyhodnocení výsledných hodnot jsou zpracovány jednotlivé metodiky:

- Metodika stanovení stechiometrie spalovacích procesů.
- Metodika přepočtu koncentrace znečišťujících látek.
- Metodika měření emisních koncentrací.
- Metodika testování statistických hypotéz.

Praktická část práce zahrnuje stanovení prvkových rozborů jednotlivých použitých vzorků paliv a určení stechiometrických analýz, které jsou základem pro posouzení tepelně-emisních vlastností. Po zhodnocení vzorků paliv následuje tepelně-emisní měření spalovacího zařízení. Metodika práce je rozdělena do následujících dílčích metodik:

1) Metodika prvkové a stechiometrické analýzy

Veškeré výsledné hodnoty prvkové a stechiometrické analýzy jsou uvedeny jak v tabulkách, tak i v grafech v následujícím postupu pro každý druh původního vzorku:

- Prvková analýza původního vzorku.
- Stechiometrická analýza původního vzorku za normálních podmínek a referenčního obsahu kyslíku ve spalinách.
- Stanovení výhřevnosti vzorků v závislosti na přepočtové vodě v palivu za normálních podmínek. Pro vyjádření výhřevnosti v různých stavech vody v palivu je původní vzorek přepočten na sušinu a následně přepočítán až na 50% obsah veškeré vody.
- Určení hmotnostního toku původního paliva (vzorku) do spalovacího prostoru v závislosti na tepelném výkonu spalovacího zařízení – požadovaná hodnota.

2) Metodika tepelně-emisního měření

Metodika zhodnocení tepelně-emisního měření je sestavena z několika částí a určí se pro spalovací zařízení následující:

- Analýza výchozích podmínek tepelně-emisního měření:
 - Spalovací zařízení
 - Vzorke paliv
 - Měřicí zařízení
- Stanovení a analýza koncentrací tepelně-emisního měření spalovacího zařízení:
 - Převedení hodnot z analyzátoru spalin
 - Přepočty koncentrací spalin na normální podmínky a pro referenční obsah kyslíku ve spalinách
 - Stanovení průměrných koncentrací spalin
 - Vyhodnocení
- Stanovení a vyhodnocení grafické závislosti oxidu uhelnatého a oxidu uhličitého na součiniteli přebytku vzduchu a oxidů dusíku a teploty spalin na součiniteli přebytku vzduchu pro každý vzorek paliva
- Regresní analýza – matematické vyjádření jednotlivých složek spalin v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu

Statistické zhodnocení teoretických a naměřených hodnot oxidu uhličitého v závislosti na množství kyslíku ve spalinách.

4. Současný stav sledované problematiky

4.1 Spalovací zařízení na tuhá biopaliva

O to mít doma rodinný krb, je stále rostoucí zájem. Jedná se o pocitově jiné teplo, nežli při vytápění kotlem na plyn nebo elektřinu. Převážně narůstá zájem o interiérová topidla, jakými jsou kamna, krby, pece a sporáky, které díky prosklenému ohništi navodí atmosféru rodinného krbu.

Současná spalovací zařízení na tuhý biomasu pracují na principu: [3]

- Zplyňovacího spalovacího zařízení na kusové dřevo a brikety
- Spodního příkládání – retortové příkládání, kdy jsou pelety šnekovým podavačem tlačeny přes retortu (koleno) do spalovacího prostoru
- Samospádného příkládání – pelety jsou ze zásobníku šnekovým podavačem vytlačeny nad rošt, kam poté přepadávají
- Hořákového topeniště – hořák s vlastním podavačem, ventilátorem spalovacího vzduchu. Podávání pelet do hořáku je samospádem.

Spalovací zařízení se dělí do těchto hlavních skupin, podle toho, na jaké je palivo a zda bude spotřebič napojen na systém ústředního vytápění či nikoliv: [4]

- Lokální spalovací zařízení na dřevo a dřevěné brikety
- Spalovací zařízení na dřevo a dřevěné brikety s teplovodním výměníkem
- Lokální spalovací zařízení na dřevěné pelety
- Spalovací zařízení na dřevěné pelety s teplovodním výměníkem
- Spalovací zařízení kombinovaná na dřevo a pelety
- Spalovací zařízení na dřevní štěpku

Z historického hlediska jde o návrat k dávné historii, kdy tento typ zdrojů byl prakticky jedinou využívanou technologií pro vytápění. Rozkvět těchto topidel spadá do druhé poloviny devatenáctého a první poloviny století dvacátého. Vedle stavěných kachlových kamen a sporáků, typických pro venkovské stavby, se kamna začala vyrábět průmyslově. [4]

4.1.1 Lokální spalovací zařízení na dřevo a dřevěné brikety

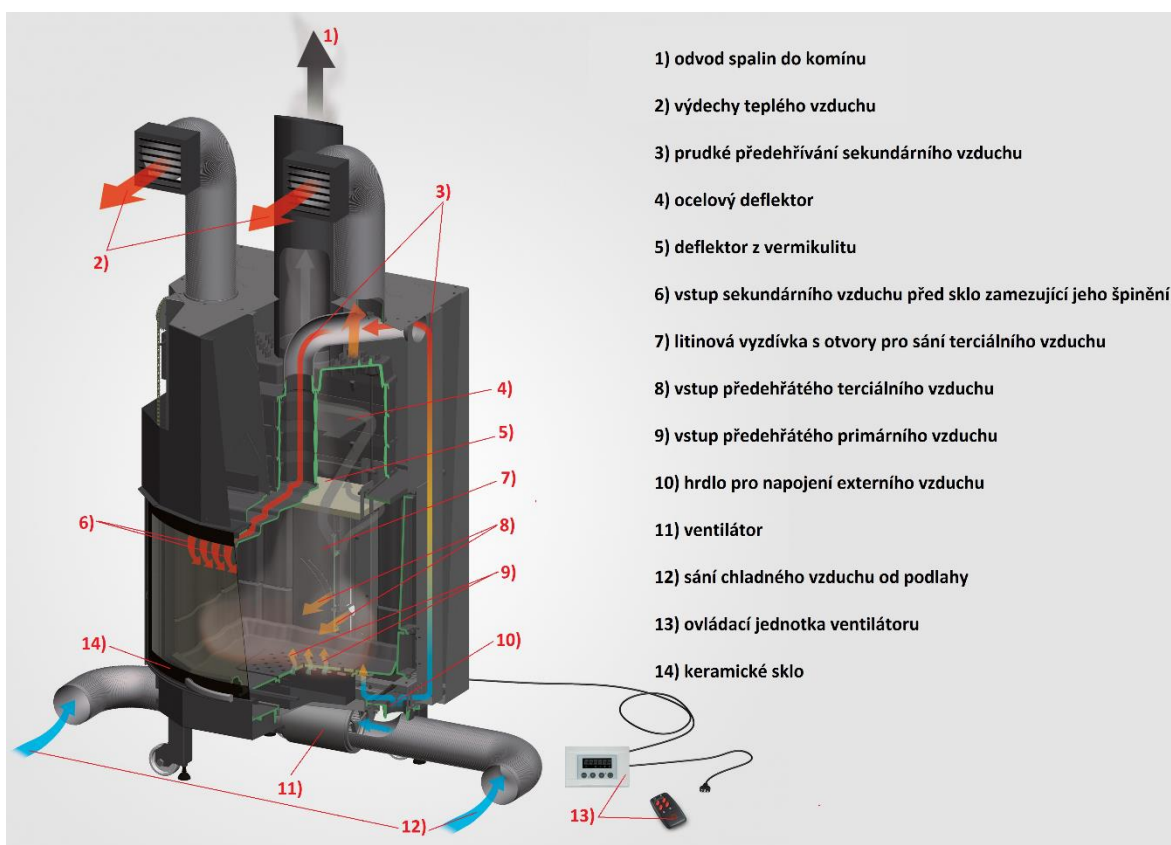
Pro dosažení maximální účinnosti a minimálních emisí má proces spalování dřeva a dřevěných briket následující čtyři fáze: [3]

- sušení, odpařování vody z paliva
- pyrolýza, při které dochází k uvolňování plynné složky paliva a vzniká dřevěné uhlí
- spalování plynné složky paliva – tzv. zplyňování – přivedení spalovacího vzduchu nad rošt a palivo
- spalování pevných látek, zejména uhlíku – dohořívání dřevěného uhlí

Při zahřívání dříví (přiložením do roztopeného topeniště) se nejprve odpaří voda z paliva a poté se dodávaným teplem začne uvolňovat spalitelný plynný podíl paliva (tzv. prchavá hořlavina). Při dostatečném přísunu kyslíku a dosažení zápalné teploty dochází ke vznícení plynu a uvolňuje se spalné teplo. Tento proces se udržuje, pokud palivo neobsahuje příliš velké množství vody (> 20 %) a je-li přivedeno dostatečné množství kyslíku. Uhlík zůstává v pevné formě na roštu, povrchově se okysličuje na oxid uhelnatý (CO), který s dodaným dalším kyslíkem oxiduje v oxid uhličitý (CO₂). Při rovnoměrném dodávání paliva a dostatečném množství přívodu kyslíku probíhají všechny čtyři fáze současně a teplo se vytváří rovnoměrně. Pro dříví je specifické, že mezi tuhými palivy obsahuje nejvyšší podíl plynných látek uvolňovaných pyrolýzou (75 až 85 %) nehořících na roštu, ale ve vztahu mezi rostem a komínem (hovoří se o tzv. zplyňování dřeva). Z toho vyplývají neopomenutelné důsledky pro konstrukci topenišť na dřevo: [3 a 5]

- pod rošt se přivádí pouze menší část kyslíku, potřebného pro okysličení pevných zbytků paliva na roštu (primární vzduch) – většinou se používá na roztápění
- větší část kyslíku se přivádí do proudu unikajících plynů do prostoru za rošt nebo nad rošt a palivo (sekundární a terciální vzduch) – sekundární vzduch převážně slouží na celkovou regulaci hoření, terciální vzduch je neregulovatelný a je přiváděn do spalovacího prostoru topeniště automaticky vlivem podtlaku komínu
- prostor bezprostředně nad rostem (či za ním) do vzdálenosti 10 [cm] by neměl být konstruován jako výměník tepla, ale jako prostor udržující žár na roštu (se šamotovou, litinovou nebo keramickou vyzdívkou), jehož úkolem je udržet plyny a přiváděný kyslík na potřebné zápalné teplotě

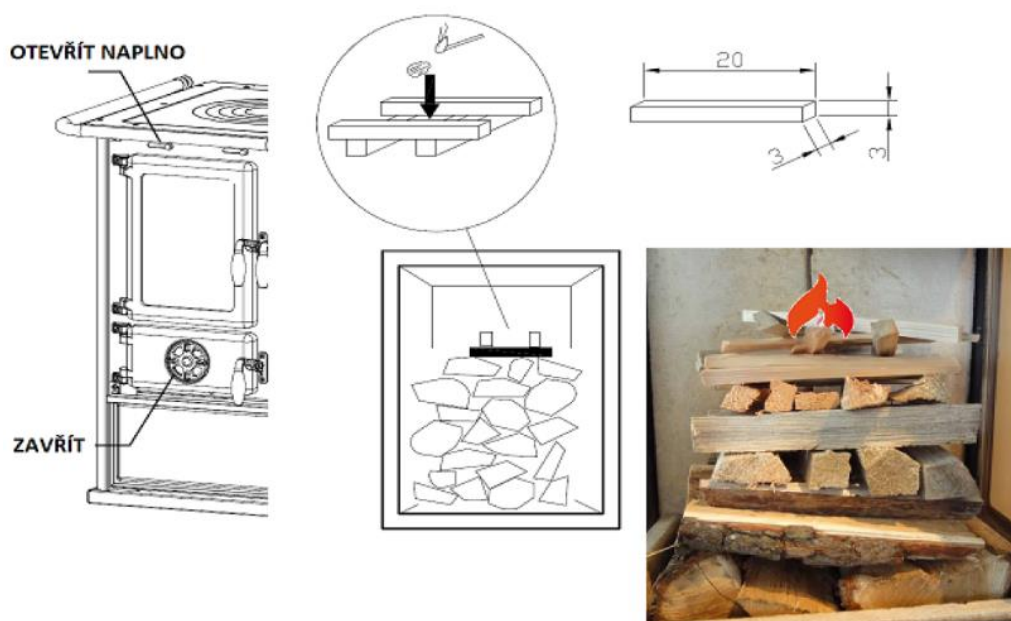
Topeniště na spalování palivového kusového dřeva a dřevěných briket je znázorněno na obrázku 1. Do spalovací komory vstupují většinou dva až tři vzduchy (primární, sekundární a terciální vzduch). Každý vzduch, který vstupuje do topeniště, je v komorách jeho cesty maximálně předehříván pro zlepšení procesu hoření. Hoření plynů je maximálně podpořeno prodloužením dráhy spalin skrze tzv. deflektory, které jsou uspořádány v řadách nad sebou nad roštem spalovací komory. Jsou vyrobené z oceli, šamotu, nerezové oceli anebo z lisované expandovaného vermikulitu. Nerezová ocel a vermikulit je pro tyto případy nejvhodnější, jelikož má tendenci odrazet vyzařovaný žár zpátky na rošt a tím zlepšit proces pyrolýzy a celkového spalování. Většina spalovacích zařízení má na dvířkách topeniště keramické sklo odolávající žáru a teplotám do 750 [°C]. [6]



Obrázek 1: Řez topeništěm teplovzdušné krbové vložky na dřevo s popisky [6]

Konstrukce topenišť se liší většinou použitým materiálem. Nejčastěji se setkáváme s celo-litinovými konstrukcemi, s kombinací litiny a šamotu, keramickými deskami (tzv. žárobetony) nebo vermikulitem. Podle konstrukce roštu uvnitř topeniště rozeznáváme spalování **roštové** a **bez roštové**. Roštové spalování je u topenišť stále ještě častější. Dno topeniště je vybaveno roštem, nejčastěji z litiny, ve kterém jsou otvory pro lepší přísun

primárního vzduchu a skrze tyto otvory v roštu je snadnější i samotné čištění topeniště, jelikož zbytkový popel má možnost propadávat do odnímatelného popelníku. Dno spalovacího prostoru může být také plné, bez otvorů a tento způsob hoření je nazýván jako tzv. bez roštové. U těchto topenišť není možné zbytkový popel schraňovat do odnímatelného popelníku a není možné přivádět primární vzduch pod rošt a palivo, a z toho důvodu je roztápění takového topeniště spalovacího zařízení trochu obtížnější. Na druhou stranu dochází k delšímu vyzařování tepla a někteří výrobci uvádí menší množství zbytkového popela. U bez roštového spalování se doporučuje tzv. roztápění od shora. U tohoto roztápění není zapotřebí primárního vzduchu pod rošt, a přestože je trochu pomalejší, jedná se o čisté roztápění s minimální spotřebou paliva a také s minimálními emisemi (bez kouře). Také keramická skla topenišť se podstatně méně špiní. Způsob a popis tohoto roztápění je znázorněný na obrázku 2. [3 a 6]



Obrázek 2: Ekologické roztápění od shora [6]

Optimální tah komínu pro lokální spalovací zařízení na kusové dřevo a dřevěné brikety bývá v rozmezí 10 až 12 [Pa]. Při instalaci nového komínového systému je velmi častý případ s nadměrným tahem po jeho zahřátí, a tak se doporučuje instalovat do kouřovodů tzv. komínovou (regulační) klapku, kterou je možné tah komínu dodatečně zmírnit. Teploty odcházejících spalin při dokonalém spalování dřeva se pohybují v rozmezí

130 až 350 [°C]. Samozřejmě vše závisí na kvalitní konstrukci topeniště a relativně suchém palivu. [6]

4.1.1.1 Nejčastější zástupci současných malých lokálních spalovacích zařízení

Klasická kamna – jedná se o ocelová nebo litinová kamna. Konstrukce je jednodušší a díky tomu jsou nižší pořizovací náklady. Nevýhodou bývá nižší účinnost spalování a vyšší výstupní emise. Výhodou bývá možnost spalování i uhlí. Příklad klasických kamen je na obrázku 3a). [4 a 6]

Krbová kamna jednoplášťová sálavá – Jedná se především o celo-litinová nebo ocelová krbová kamna, kde je teplo předáváno do prostoru sáláním. Výhodou sálavých kamen je okamžitý nárůst tepla na jejich povrchu, avšak teplo nijak necirkuluje, a tak největší podíl předávaného tepla je cítit v blízkosti kamen. Povrchová teplota na těchto kamnech je mnohem větší nežli u kamen dvouplášťových. Příklad sálavých kamen je na obrázku 3b). [4 a 6]

Krbová kamna dvouplášťová teplovzdušná – taková kamna jsou označována také jako konvekční právě díky tomu, že přenos tepla je předáván z větší části konvekčně, což je cirkulace a ohřev vzduchu v dutině mezi vnitřním korpusem a vnějším pláštěm kamen. Ve spodní části kamen je chladnější vzduch od podlahy nasáván do prostoru mezi pláštěmi a skrze otvory kolem plotny kamen je následně silně ohřátý vzduch vyfukován do prostoru a má za následek rovnoměrné rozložení tepla po místnosti a lépe se dostane i do přilehlých místností. Vnější obklad tohoto typu kamen bývá většinou ocelový, kachlový nebo z přírodního nerostu – mastku nebo pískovce. Sálavé teplo je předáváno do prostoru pouze přes prosklená dvířka. U některých typů konvekčních krbových kamen je možná instalace ventilačních jednotek pro podporu proudění a předávání tepla nebo pro možnost napojení rozvodu horkého vzduchu do jiných místností. Povrchová teplota je u těchto kamen nižší než u kamen sálavých, a tak vzniká i menší riziko vzniku popálenin při fyzickém kontaktu s kamny. Díky dvouplášťové konstrukci kamna dokáží šetřit místo, jelikož minimální vzdálenost hořlavých materiálů, jako skříně, sofa, stolky apod., může být od bočních a zadních částí kamen i 15 [cm]. Tento typ konstrukce, je vhodný na vytápění trvale obývaných nebo zateplených objektů. Příklad těchto kamen je na obrázku 3c). [4 a 6]

Akumulační kamna – tento typ kamen je známý dlouhou dobou nahřívání, ale také dlouhou dobou předávání sálavého tepla díky masivní konstrukci, která se pohybuje od 300 [kg] až do několika tun. Sálavé teplo je pohlcováno akumulační hmotou např. ze šamotu, keramiky nebo přírodního nerostu (masek, pískovec). Takové konstrukce jsou čím dál tím populárnější do nízkoenergetických a pasivních objektů nebo na trvalé každodenní topení starších objektů. Povrchová teplota je opět nižší než u sálavých kamen, obdobně jako u kamen konvekčních, ale kamna dokáží topit dlouhou dobu i po vyhasnutí kamen. Do této skupiny také patří klasická stavěná kachlová kamna a kachlové pece. Příklad akumulačních kamen je na obrázku 3d). [4 a 6]



Obrázek 3: Příklady spalovacích zařízení – a) klasická kamna; b) jednoplášťová sálavá; c) dvouplášťová konvekční; d) akumulační kamna masťková s hmotností 1000 kg [7 a 8]

Krbové vložky jednoplášťové (sálavé) - konstrukce je jednoplášťová a jsou schopny rychlejšího předávání tepla do prostoru. Sálavé vložky jsou dnes využívány především pro stavbu masivních (akumulačních) krbových sestav, kachlových kamen a pecí. Sálavé teplo se předává do akumulační hmoty, která je součástí kouřovodu nebo obezdívky a opět tak prodlužuje dobu vyzařování tepla i po vyhasnutí. Možnost akumulace se využívá především v dobře izolovaných objektech, u nízkoenergetických a pasivních staveb, které mají minimální energetické tepelné ztráty anebo pro trvalé každodenní topení. [4 a 6]

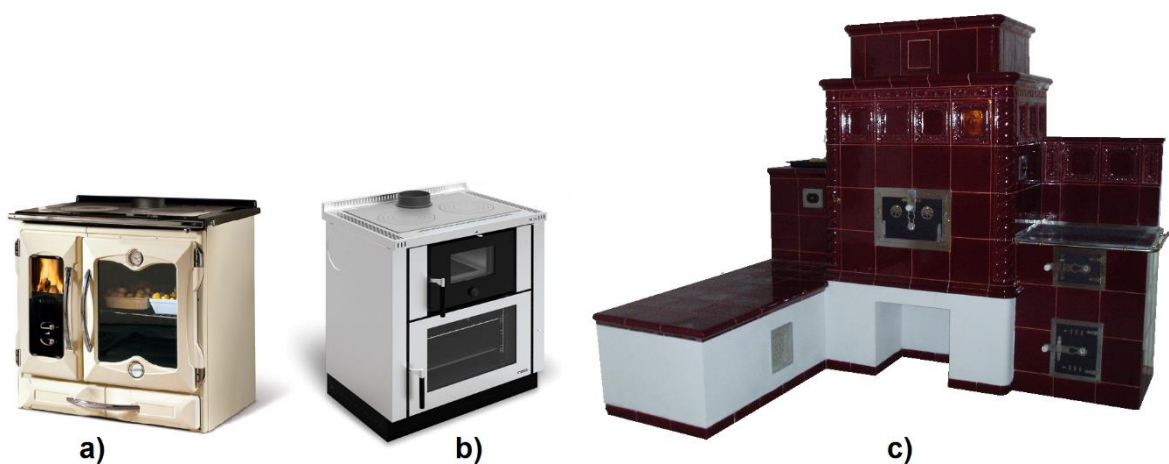
Krbové vložky dvouplášťové (teplovzdušné) - konstrukce je stejně jako u kamen dvouplášťová a teplo skrze dutinu mezi pláštěmi krbové vložky proudí. U většiny těchto krbových vložek je využíván tzv. teplovzdušný rozvod. Horký vzduch je pomocí odizolovaných flexibilních hliníkových trubek veden do dalších místností za pomoci ventilátoru nebo pouze přírodní konvekce. V dnešní době jsou poptávány krbové vložky

s rohovým, třístranným nebo oboustranným prosklením. Různé provedení krbových vložek jsou znázorněny na obrázku 4. [4 a 6]



Obrázek 4: Příklady krbových vložek – a) jednovlášťová sálavá; b) dvouvlášťová konvekční s ventilátory a možností rozvodu teplého vzduchu; c) jednovlášťová s třístranným prosklením; d) dvouvlášťová s rohovým prosklením [7 a 9]

Sporáky – tento typ spalovacího zařízení je určen nejen k vytápění, ale i k ohřevu, vaření a pečení pokrmů na varné plotně nebo v pečicí troubě. Pečicí trouba bývá umístěna vedle, nad nebo pod topeništěm. V dnešní době jsou sporáky velmi dobře regulovatelné díky možnosti vyřazení pečicí trouby z provozu pomocí mechanické klapky. Na trhu jsou sporáky s plnými nebo prosklenými dvířky topeniště. U sporáků se setkáme i s provedením dvojitého, nebo trojitého prosklení, které tlumí nepříjemnou sálavou složku tepla při vaření. Provedení obkladu bývá kachlové, ocelové smaltované, ocelové lakované nebo litinové. Sporáky se vyrábí jednovlášťové sálavé, dvouvlášťové teplovzdušné a akumulční (pece). Příklady sporáků jsou na obrázku 5. [4 a 6]

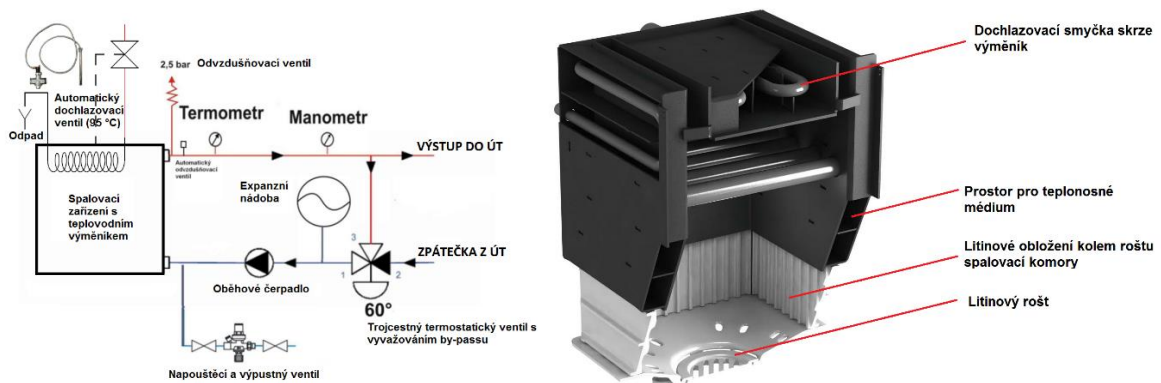


Obrázek 5: Příklady provedení sporáků – a) litinový sálavý; b) nerezový teplovzdušný s možností vestavby do kuchyňské linky; c) kachlový sporák stavěný (kachlová pec) [7 a 10]

4.1.2 Spalovací zařízení na dřevo a dřevěné brikety s teplovodním výměníkem

Pokud je šamotové, keramické nebo litinové topeniště nahrazeno ocelovým svařencem, ve kterém je voda nebo jiné teplotnosné médium, označujeme tyto zdroje tepla jako zařízení s teplovodním výměníkem. Výměníky by neměli být konstrukčně řešeny až na dno roštu topeniště, aby na roštu nebylo odebíráno příliš velké množství tepla, které potřeba pro pyrolýzu a přehřívání kyslíku. Po zahřátí teplotnosného média uvnitř výměníku na určitou teplotu je nutná jeho cirkulace pomocí oběhového čerpadla. Médium je buď napřímo distribuováno do radiátorů nebo je soustředěno do akumulčních nádob. Akumulační nádoby jsou izolované nádrže, které umožňují napojení veškerých zdrojů ohřevu vody (jako např. solární panely, plynový kotel, tepelné čerpadlo apod.). Přes doplňující výměníky lze z těchto nádrží získávat i teplou užitkovou vodu. [6]

Taková topeniště vyžadují vyšší tah komínu. Pro teplovodní zařízení je většinou požadován tah 17 až 20 [Pa]. Spaliny jsou vodním výměníkem ochlazovány, a proto je proces spalování o něco rychlejší než u teplotvzdušných kamen. Na obrázku 6 je znázorněno doporučené schéma zapojení zařízení na systém ústředního topení. Základem pro bezproblémový chod těchto zařízení je trojcestný směšovací ventil na zpátečce (vratce) vody ze systému ústředního topení zpět do výměníku v topeništi. Tento ventil udržuje vratnou teplotu vodního média nad hodnotou 60 [°C], aby nedocházelo ke vzniku rosného bodu na vnějších stěnách výměníku a nízkoteplotní korozi na stěnách uvnitř výměníku. [6]



Obrázek 6: Schéma zapojení teplovodních spalovacích zařízení a konstrukce teplovodního výměníku v řezu [6]

Výměníky u těchto zařízení musí mít při provozu také zabezpečení oproti přetopení při náhlém výpadku elektrické energie. K tomu slouží separované vlnovce

(tzv. dochlazovací smyčky) nebo záložní zdroje. Na obrázku 6 je také znázorněn teplovodní výměník krbových kamen s dochlazovací smyčkou v řezu. Výměník je konstrukčně umístěn buď v horní části spalovacího prostoru, nebo nahrazuje vyzdívky a deflektory v topeništi. [6]

4.1.2.1 Nejčastější zástupci současných malých spalovacích zařízení s teplovodním výměníkem

Krbová kamna s teplovodním výměníkem – jedná se o klasická kamna vybavená ocelovým svařencem kolem dokola nebo v horní části topeniště. Na pohled se mnohdy vůbec neliší od teplovzdušných krbových kamen. Rozdíl je viditelný až při pohledu na zadní stěnu kamen, kde jsou vývody pro připojení na ústřední systém vytápění. [4 a 6]

Krbové vložky a krby s teplovodním výměníkem – princip je stejný jako u topeniště krbových kamen, jen jsou určeny k obezdění. Topeniště bývá u krbových vložek větší, a tak dosahují vyšších výkonů. Krbové vložky se dnes často vyrábějí s technologií bez roštového spalování bez přítomnosti popelníku. [4 a 6]

Sporáky s teplovodním výměníkem – tento typ zařízení má největší schopnost využít energetický potenciál v dřevní biomase díky varné plotně, pečicí troubě a teplovodnímu výměníku. [4 a 6]

Kotle s teplovodním výměníkem – u kotlů je někdy hoření podpořeno odtahovým ventilátorem spalin. Výměníky jsou u kotlů s větším objemem vody, aby pohltily maximální množství produkovaného tepla a šířily ho pomocí teplonosného média do celého objektu. Vnější stěny kotle jsou většinou odizolovány, aby teplo neunikalo do prostoru a nepřetápěly se tolik malé prostory kotelny, kde není teplo žádané.

Kotle můžeme rozdělit následovně: [4 a 16]

- Prohořivací kotle – původně konstruovány na topení koksem, který nehoří plamenem, a tak výstupní teploty byly u těchto kotlů velmi vysoké 400 až 600 [°C],
- Odhořivací kotle – již mají delší spalinové cesty a výstupní teplota je nižší 250 až 400 [°C]. Více využívají zplyňování paliva. Ale přesto je účinnost poměrně nízká.
- Zplyňovací kotle – již mají řízený spalovací proces pomocí odtahového ventilátoru spalin nebo regulací primárního a sekundárního vzduchu. Výstupní teploty jsou 150 až 300 [°C]. Zde je již vyšší účinnost takového spalovacího zařízení.

Příklady současných spalovacích zařízení s teplovodním výměníkem jsou na obrázku 7.



Obrázek 7: Příklady spalovacích zařízení s teplovodním výměníkem – a) krbová kamna; b) krbová vložka; c) sporáku; d) zplyňovací kotel [7]

4.1.3 Lokální spalovací zařízení na dřevěné pelety

Spalování pelet probíhá v hořáku. Topeniště jsou menších rozměrů, než je pro spalování kusového dřeva. Především rošty hořáků jsou menších rozměrů. Procesu hoření napomáhá ve většině případů odtahový ventilátor spalin, který vytváří podtlak ve spalovací komoře, a ten nasává potřebný vzduch k hoření pelet. Rošty jsou litinové nebo nerezové. Spaliny jsou vyfukovány pod tlakem do komínu, a proto je kouřovod pro napojení na komín odlišný od kouřovodu pro zařízení spalující palivové dřevo. Kouřovod je přetlakový a každý segment je vybaven těsnícími kroužky. Jedná se o tzv. nucený odtah spalin. Topeniště spalovací komory je obloženo litinou, šamotem, keramikou nebo vermikulitem. Pelety se doplňují do zásobníku a většinou za pomoci šnekového podavače jsou dávkovány na rošt samospádem anebo spodním dávkováním – vtlačováním do spalovací komory. Celý proces spalování je plně automatizován, od zapálení, díky odporovému žhavicímu válečkovému tělísku v těsné blízkosti roštu, přes hoření a celkovou regulaci výkonu. Většina zařízení má totiž řídicí jednotku a je vybavena čidlem pro snímání teploty v okolní místnosti a dle nastavené požadované teploty dokáže kamna optimálně regulovat jejich výkon. Tato zařízení je možné ovládat pomocí dálkového ovladače, ale také vzdáleně, přes mobilní telefon nebo stolní počítač. Některé typy jsou pro tuto komunikaci již vybaveny GSM nebo Wifi modulem z výroby, a pro některé je možné jeho dodatečné pořízení a instalace. Kamna je

možné naprogramovat na tzv. týdenní programování a zaručit tak plně automatický chod kamen pro každý den v týdnu. [6]

U zařízení na pelety je celý proces topení podstatně komfortnější, nežli je tomu při topení kusovým dřevem. S peletami není tolik práce. Pelety jsou k dostání již vyschlé, v 15kg pytlích nebo dnes častěji využívané a přikládání je méně časté v závislosti na kapacitě zásobníku spalovacího zařízení. Minimální hodinová spotřeba pelet se u takových zařízení pohybuje od 0,6 [kg·h⁻¹] což umožňuje provoz s minimálním výkonem kolem 2,0 až 2,5 [kW] v závislosti na kvalitě pelet. Teploty odcházejících spalin se pohybují od 100 do 250 [°C] u teplovzdušných zařízení a od 70 do 200 [°C] u zařízení s teplovodním výměníkem a u kotlů. [6]

Většina teplovzdušných zařízení je vybavena dalším tangenciálním ventilátorem pro lepší distribuci tepla do prostoru a maximalizaci konvekčního proudění. V horní části topeniště jsou průduchy (teplovzdušný výměník), skrze které je vzduch ohříván a vyfukován z konstrukce kamen. Z toho vyplývá, že pro provoz kamen na pelety je potřeba neustálé dodávky elektrické energie. Minimální účinnosti zařízení spalujících dřevěné pelety se dnes pohybují od 86 % výše. Některé typy umožňují také napojení na rozvod teplého vzduchu do jiných místností za pomoci dalších ventilátorů. Zařízení mohou být v podobě krbových kamen, krbových vložek anebo sporáků. Na obrázku 8 jsou příklady různých spalovacích zařízení. [6]

4.1.4 Spalovací zařízení na dřevěné pelety s teplovodním výměníkem

U těchto zařízení, obdobně jako u zařízení spalující dřevo, je kolem spalovací komory ocelový svařenec naplněn teplonosným vodním médiem. Zařízení nevyžadují žádné jištění proti přetopení při náhlém výpadku elektrické energie, jelikož je dávkování paliva pozvolné a při přerušení dodávky energie přestane podávací mechanismus dávkovat a zbytkové pelety v topeništi dohoří bez rizika přehřátí a poškození výměníku nebo konstrukce zařízení. Výhodou je vybavenost veškerými topenářskými komponenty, které jsou nutné k zapojení na systém ústředního topení (oběhové čerpadlo, pojistné odvzdušňovací a tlakové ventily, expanzní nádoba, trojcestný ventil atd.) [6]

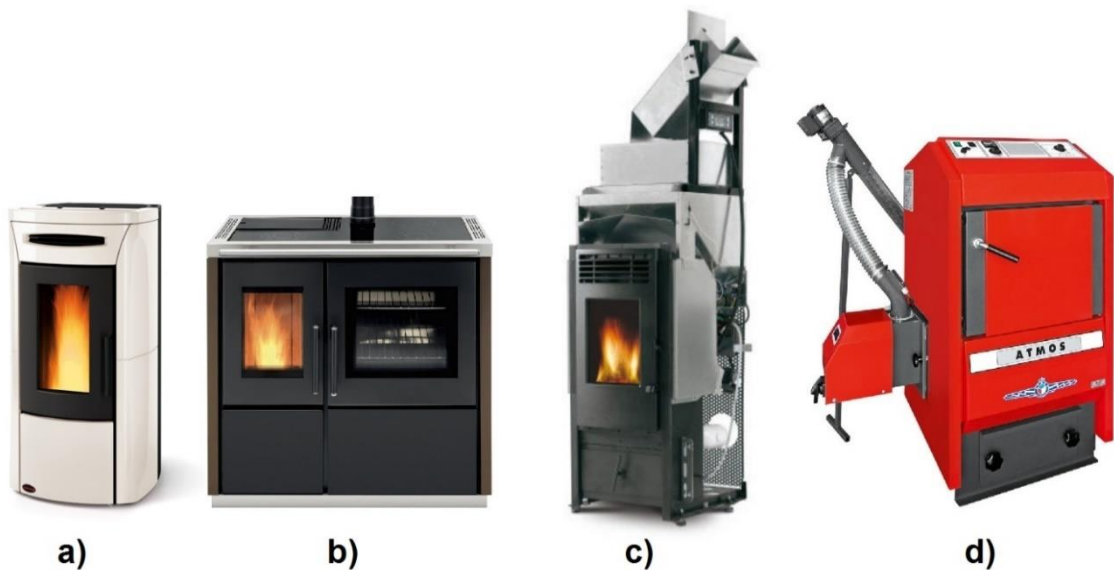
4.1.4.1 Nejčastější zástupci současných malých spalovacích zařízení s teplovodním výměníkem

Krbová kamna s teplovodním výměníkem – mají výhodu, že přebytečné teplo, které nepohltí výměník je předáváno konvekčně nebo za pomoci ventilátoru do okolí nebo dalších místnosti. Příklad takových kamen je na obrázku 8a). [4 a 6]

Krbové vložky a krby s teplovodním výměníkem – v případě obezdění krbové vložky je získán prostor, kde mohou být veškeré potřebné topenářské komponenty uschovány. Čím dál populárnější je stavění krbů s možností zadního přikládání nebo plnění z chodby nebo technické místnosti. Příklad krbové vložky je na obrázku 8c).

Sporáky s teplovodním výměníkem – takové typy spalovacích zařízení vyrábí jen malé procento celkových výrobců. Pořizovací cena takového zařízení je řádově 200 000,- [Kč]. Podoba sporáku na pelety je znázorněna na obrázku 8b). [4 a 6]

Kotle – příklad kotle se samospádným přikládáním je na obrázku 8d). U kotlů je velkou výhodou možnost napojení na externí zásobník pelet o kapacitě 200 až 3 000 [kg], a tím docílit delšího chodu kotle bez nutnosti zásahu člověka. Ovšem je potřeba dbát na kvalitu pelet, aby nedocházelo k čtenějšímu zanášení spalinových cest a nebylo potřeba kotel vyčistit dříve, než dojdou v zásobníku pelety. [6 a 16]



Obrázek 8: Příklady spalovacích zařízení s teplovodním výměníkem – a) krbová kamna s kachlovými boky; b) sporák c) krbová vložka; d) kotel na pelety [7, 9 a 11]

4.1.5 Spalovací zařízení kombinovaná na dřevo a pelety

Dnes je na trhu stále narůstající nabídka tzv. kombinovaných spalovacích zařízení, které dokáží spalovat jak palivové dřevo, tak i dřevěné pelety. Výhodou je možnost ručního přikládání v případě přítomnosti a v případě nepřítomnosti přepnout na automatický chod kamen na pelety. Buď se jedná o konstrukci se dvěma topeništi zvlášť anebo s jedním topeništěm společným pro oba dva druhy paliva. Ukázky současných kombinovaných spalovacích zařízení jsou na obrázku 9. [6]



Obrázek 9: Příklady kombinovaných spalovacích zařízení na dřevo a pelety – a) krbová kamna teplovzdušná; b) teplovzdušný sporák se dvěma topeništi (bez trouby); c) krbová vložka s teplovodním výměníkem; d) teplovodní kotel [7, 9 a 11]

4.1.6 Spalovací zařízení na dřevní štěpku

Kotle na dřevní štěpku jsou určeny pro ústřední vytápění a ohřev vody větších obytných nebo průmyslových budov, skupin budov nebo podniků. Tzv. štěpkové kotle nejnižších výkonů lze také použít k vytápění a ohřevu vody v rodinných domech. Tepelný výkon těchto kotlů začíná na 15 [kW]. Při vyšších výkonech ve stovkách [kW] je využití dřevní štěpky hospodárnější než spalování pelet. Výkon kotlů lze automaticky regulovat. V některých kotlích lze spalovat i rostlinné zbytky, piliny, hobliny nebo obilí. Tyto kotle zpravidla nabízejí veškerý komfort automatizace jako u peletových kotlů. [12]

4.2 Legislativní požadavky pro provoz spalovacích zařízení

Každé spalování produkuje znečišťující látky, a ty jsou komínovým proudem vypouštěny do ovzduší. Pro posouzení kvality průběhu spalování a vlivů spalovacích zařízení spalující dřevo nebo biomasu na životní prostředí je nutné seznámit se s právními podmínkami, a to především v oblasti emisních limitů a kvality paliv z hlediska Zákona o ochraně ovzduší č. 201/2012 Sb. (2012). Jedná se především o kontrolu následujících látek, podle kterých se určují tepelně-emisní vlastnosti zařízení a následně, podle kterých se dělí do jednotlivých emisních tříd: [14]

- **CO** [$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}\text{N}$] – oxid uhelnatý při 13 % O_2 u interiérových topidel a při 10 % O_2 u kotlů;
- **NO_x** [$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}\text{N}$] – oxidy dusíku
- **OGC = TOC** [$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}\text{N}$] – celkový organický plynný uhlík, kterým se rozumí úhrnná koncentrace všech organických látek s výjimkou methanu vyjádřená jako celkový uhlík;
- **TZL** [$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}\text{N}$] – tuhé znečišťující látky (prach), celkový prach bez rozlišení velikosti částic.
- Minimální účinnost η [%] – minimální procentuální využití vložené energie

Snaha většiny výrobců je eliminovat hodnoty znečišťujících látek na minimum a tím zvýšit hodnoty účinnosti na maximum. To samozřejmě závisí především na druhu a kvalitě paliva, množství přivedeného vzduchu a konstrukci spalovací komory.

4.2.1 Zákon o ochraně ovzduší

Tento Zákon č. 201/2012 Sb. vydaný dne 2. května 2012, má následující základní ustanovení. Ochranou ovzduší se rozumí předcházení znečišťování ovzduší a snižování úrovně znečišťování tak, aby byla omezena rizika pro lidské zdraví způsobená znečištěním ovzduší, snížení zátěže životního prostředí látkami vnášenými do ovzduší a poškozujícími ekosystémy a vytvoření předpokladů pro regeneraci složek životního prostředí postižených v důsledku znečištění ovzduší. Tento zákon zpracovává příslušné předpisy Evropské unie a upravuje: [14]

- přípustné úrovně znečištění a znečišťování ovzduší,

- způsob posuzování přípustné úrovně znečištění a znečišťování ovzduší a jejich vyhodnocení,
- nástroje ke snižování znečištění a znečišťování ovzduší,
- práva a povinnosti osob a působnost orgánů veřejné správy při ochraně ovzduší,
- práva a povinnosti dodavatelů pohonných hmot a působnost orgánů veřejné správy při sledování a snižování emisí skleníkových plynů z pohonných hmot v dopravě.

Příloha 10 tohoto zákona vymezuje minimální emisní požadavky na spalovací stacionární zdroje o jmenovitém tepelném příkonu 300 [kW] a nižším pro účely uvádění výrobků na trh. [14]

Emisní limity musí dle norem plnit spotřebiče jen při jmenovitém výkonu nebo příkonu, kromě spotřebičů na dřevní pelety, které mají odlišné limity při sníženém, tzv. redukovaném výkonu. V tabulce 1 jsou uvedeny požadavky na spalovací stacionární zdroje na pevná paliva, které slouží jako zdroje tepla pro teplovodní soustavu ústředního vytápění, které se smějí nabízet do 31. prosince 2017. [14]

Pro zkoušení teplovodních kotlů na tuhá biopaliva, je v platnosti norma EN 303-5:(2012), která ještě kotle rozděluje do různých emisních tříd. Emisní hodnoty, které kotle splňují a jsou uvedené v tabulce 1, tvoří emisní třídu 3. Tato norma rozděluje kotle až do jmenovitého výkonu 500 [kW]. Zařízení, která splňují emisní hodnoty 3. třídy se budou moci nabízet do konce roku 2017, ale jejich používání zatím není žádným datem limitováno. V této třídě se ještě zařízení dělí podle jmenovitého příkonu nebo výkonu do třech úrovní. Emisní třídy musí veškerá zařízení plnit do jmenovitého příkonu 300 [kW] (do jmenovitého výkonu 500 kW dle EN 303-5:(2012)). Jediný rozdíl ve stanovených emisních požadavcích je, že norma EN 303-5:(2012) kategorizuje zdroj dle jeho výkonu, zatímco Zákon č. 201/2012 Sb. – o ochraně ovzduší (2012) kategorizuje zdroj dle jeho příkonu. [14 a 15]

Od 1. září 2022 bude následovat přísný zákaz provozu zdrojů na tuhá paliva o jmenovitém příkonu 300 [kW] a nižším, připojené na soustavu ústředního vytápění, které splňovali 1. a 2. emisní třídu podle dnes již zrušené předchozí normy EN 303-5:(1999). Jejich používáním by provozovatel mohl dostat pokutu ve výši až 50 000,- [Kč]. Tyto kotle nesmí výrobci a dovozci nabízet na trhu od 1. ledna 2014. [14 a 15]

Dodávka Paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný příkon [kW]	Mezní hodnoty emisí ¹⁾		
			CO	TOC ²⁾³⁾	TZL
			[mg·m ⁻³ _N] při 10% O ₂ ([mg·m ⁻³ _N] při 13% O ₂)		
Ruční	Biologické	≤ 65	5000 (3636)	150 (109)	150 (109)
		> 65 až 187	2500 (1818)	100 (73)	150 (109)
		> 187 až 300	1200 (873)	100 (73)	150 (109)
	Fosilní	≤ 65	5000 (3636)	150 (109)	125 (91)
		> 65 až 187	2500 (1818)	100 (73)	125 (91)
		> 187 až 300	1200 (873)	100 (73)	125 (91)
Samočinná	Biologické	≤ 65	3000 (2182)	100 (73)	150 (109)
		> 65 až 187	2500 (1818)	80 (58)	150 (109)
		> 187 až 300	1200 (873)	80 (58)	150 (109)
	Fosilní	≤ 65	3000 (2182)	100 (73)	125 (91)
		> 65 až 187	2500 (1818)	80 (58)	125 (91)
		> 187 až 300	1200 (873)	80 (58)	125 (91)

¹⁾ Vztahuje se k suchým spalinám, teplotě 273,15 K, tlaku 101,325 [kPa] a k referenčnímu obsahu kyslíku 10 %; pro sálavé spalovací stacionární zdroje, určené pro připojení na teplovodní soustavu ústředního vytápění a k instalaci v obytné místnosti, se hodnoty vztahují k referenčnímu obsahu kyslíku 13 %.

²⁾ TOC = celkový organický uhlík, kterým se rozumí úhrnná koncentrace všech organických látek s výjimkou methanu vyjádřená jako celkový uhlík.

³⁾ Nevztahuje se na sálavé spalovací stacionární zdroje, určené pro připojení na teplovodní soustavu ústředního vytápění a k instalaci v obytné místnosti.

Tabulka 1: Mezní hodnoty spalovacích zařízení napojených na soustavu ústředního vytápění nabízené do 31. 12. 2017, 3. emisní třída kotlů (dle EN 303-5:2012) [19 a 20]

V tabulce 2 jsou následně uvedeny požadavky na spalovací stacionární zdroje na tuhá biopaliva o jmenovitém tepelném příkonu 300 [kW] a nižším, které slouží jako zdroje tepla pro teplovodní soustavu ústředního vytápění, a které budou tvořit spodní limitní hranici nabízených zařízení od 1. ledna 2018. Spalovací zařízení splňující hodnoty v tabulce 4 jsou dle normy EN 303-5:(2012) charakterizovány jako zařízení 4. emisní třídy. [14 a 15]

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný příkon [kW]	Mezní hodnoty emisí ¹⁾		
			CO	TOC ²⁾³⁾	TZL
			[mg·m ⁻³ _N] při 10% O ₂ ([mg·m ⁻³ _N] při 13% O ₂)		
Ruční	Biologické/ fosilní	≤ 300	1200 (873)	50 (36)	75 (55)
Samočinná	Biologické/ fosilní	≤ 300	1000 (727)	30 (22)	60 (44)

¹⁾ Vztahuje se k suchým spalinám, teplotě 273,15 K, tlaku 101,325 [kPa] a k referenčnímu obsahu kyslíku 10 %; pro sálavé spalovací stacionární zdroje, určené pro připojení na teplovodní soustavu ústředního vytápění a k instalaci v obytné místnosti, se hodnoty vztahují k referenčnímu obsahu kyslíku 13 %.

²⁾ TOC = celkový organický uhlík, kterým se rozumí úhrnná koncentrace všech organických látek s výjimkou methanu vyjádřená jako celkový uhlík.

³⁾ Nevztahuje se na sálavé spalovací stacionární zdroje, určené pro připojení na teplovodní soustavu ústředního vytápění a k instalaci v obytné místnosti a na zdroje, u nichž ztráty do okolí tohoto zdroje činí více než 6 % celkového tepelného výkonu.

Tabulka 2: Mezní hodnoty spalovacích zařízení napojených na soustavu ústředního vytápění nabízené od 1. 1. 2018, 4. emisní třída kotlů (dle EN 303-5:2012) [14 a 15]

Kotlová norma EN 303-5:(2012) ještě dělí zařízení do poslední 5. emisní třídy. Hodnoty, které kotle musí plnit jsou znázorněny v tabulce 3. Pro tuto třídu zatím žádná limitující data nejsou, ale přesto jsou již dnes takováto zařízení na trhu běžně dostupné. [14 a 15]

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný výkon [kW]	Mezní hodnoty emisí ¹⁾		
			CO	TOC ²⁾³⁾	TZL
			[mg·m ⁻³ _N] při 10% O ₂ ([mg·m ⁻³ _N] při 13% O ₂)		
Ruční	Biologické/ fosilní	≤ 500	700 (509)	30 (22)	60 (40)
Samočinná	Biologické/ fosilní	≤ 500	500 (364)	20 (15)	40 (29)

¹⁾ Vztahuje se k suchým spalinám, teplotě 273,15 K, tlaku 101,325 [kPa] a k referenčnímu obsahu kyslíku 10 %; pro sálavé spalovací stacionární zdroje, určené pro připojení na teplovodní soustavu ústředního vytápění a k instalaci v obytné místnosti, se hodnoty vztahují k referenčnímu obsahu kyslíku 13 %.

²⁾ TOC = celkový organický uhlík, kterým se rozumí úhrnná koncentrace všech organických látek s výjimkou methanu vyjádřená jako celkový uhlík.

³⁾ Nevztahuje se na sálavé spalovací stacionární zdroje, určené pro připojení na teplovodní soustavu ústředního vytápění a k instalaci v obytné místnosti a na zdroje, u nichž ztráty do okolí tohoto zdroje činí více než 6 % celkového tepelného výkonu.

Tabulka 3: Mezní hodnoty spalovacích zařízení napojených na soustavu ústředního vytápění 5. emisní třídy (dle EN 303-5:2012) [14 a 15]

Na některá zařízení, která splňují požadavky emisní třídy 4 a vyšší, je možné v dnešní době znovu zažádat o dotace v rámci programu „Nová zelená úsporám” nebo „Kotlíkové dotace“ Ministerstva životního prostředí administrovaného Státním fondem životního prostředí ČR zaměřený na úspory energie a obnovitelné zdroje energie v rodinných domech. Podmínky pro registraci výrobců jsou však podstatně přísnější, nežli tomu bylo v první etapě tohoto programu v letech 2009 až 2012. [14 a 15]

Do 31. prosince 2016 byla povinnost provozovatelů stacionárních zařízení na tuhá paliva napojených na soustavu ústředního vytápění o celkovém příkonu 10 až 300 [kW], provést první kontrolu technického stavu a provozu spalovacího zařízení prostřednictvím osoby, proškolené výrobcem zařízení a oprávněné k jeho instalaci (odborně způsobilá osoba). Provozovateli je vystavena revizní zpráva s platností na dva kalendářní roky a následně se musí kontrola zopakovat. Pokud na vyžádání obecnímu úřadu obce s rozšířenou působností provozovatel nepředloží doklad o provedení kontroly, od 1. ledna 2017 mu hrozí pokuta až 20 000,- [Kč]. Názorný příklad revizní zprávy je přílohou 2 této diplomové práce. [16]

4.2.2 Normy pro lokální spalovací zařízení

Při uvedení takových zařízení na trh se obecně v Evropě provádí zkoušení dle následujících norem, které stanovují požadavky týkající se instalace, výroby, konstrukce, bezpečnosti a provozních vlastností (účinnost a emise), návodů a značení, včetně souvisejících zkušebních metod: [16]

- **EN 13229** - vestavné spotřebiče k vytápění a krbové vložky na pevná paliva (krbové vložky, kachlová kamna a vestavné dekorativní spotřebiče)
- **EN 13240** - spotřebiče na pevná paliva k vytápění obytných prostorů (kamna, krbová kamna)
- **EN 12815** - varné spotřebiče pro domácnost na pevná paliva a spotřebiče sloužící k tepelné úpravě pokrmů (sporáky)
- **EN 14785** - spotřebiče spalující dřevěné pelety k vytápění obytných prostorů (krbová kamna, krbové vložky)
- **EN 15250** - kamna na pevná paliva s akumulací (akumulační kamna, kachlové pece)

V normě EN 12815 přibývají zkoušky vyplývající z hlavní funkce spotřebičů, kterou je příprava a úprava pokrmů. U těchto spotřebičů se navíc provádí zkouška doby ohřevu varné plotny, zkouška pečení a dále některé bezpečnostní zkoušky. Obecné emisní limity pro EU jsou vyznačeny v tabulce 4. Dále jsou v tabulce uvedeny i hodnoty minimální účinnosti pro dané spotřebiče. V ČR se liší jen nepatrně, a to již zmíněným Zákonem o ochraně ovzduší na spotřebiče zapojené do ústředního topení. Tyto emisní limity jsou ve

srovnání s požadavky na kotle mírnější a minimální účinnosti jsou poměrně nízké. Problém s účinností nastává v případě krbových vložek určených k zastavení s akumulací vlastností. U těchto konstrukcí je požadavek na vyšší odcházející teplotu spalin skrze akumulací prvky zástavby a tím se snižuje celková účinnost krbové vložky. Pro lokální topeniště určené pro připojení na teplovodní soustavu ústředního vytápění (např. krbové vložky, kamna nebo sporáky s vodním výměníkem), platí emisní limity, pro (CO) a prach (TZL), jako pro kotle, které stanovuje příloha 10 Zákona 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší, uvedené také v tabulkách 1, 2, a 3 této práce. [16]

norma	předmět normy ¹⁾	limit pro CO ²⁾	limit pro CO ²⁾	min. účinnost
		[%]	[mg·m ⁻³ ·N]	[%]
EN 13229	krbové vložky	1,0	12500	30
	kachlová kamna a ostatní dekorativní spotřebiče	0,2	2500	75
EN 13240	krbová kamna	1,0	12500	50
EN 12815	sporáky	1,0	12500	60
EN 14785	spotřebiče spalující dřevěné pelety	0,04 / 0,06 ³⁾	500 / 750 ³⁾	75 / 70 ³⁾
EN 15250	akumulační kamna	0,3	3750	70
¹⁾ uvedeny nejběžnější spotřebiče spadající pod danou normu ²⁾ při referenčním obsahu O ₂ = 13 % ³⁾ hodnoty při sníženém výkonu				

Tabulka 4: Obecné emisní limity pro lokální spalovací zařízení bez napojení na systém ústředního vytápění [17, 18, 19, 20 a 21]

Provozovatelé krbových kamen, vložek a sporáků nemusí provádět pravidelné měření emisí, na rozdíl od provozovatelů kotlů a zařízení napojené na systém ústředního vytápění bez ohledu na jejich výkon nebo příkon. Potřeba tepla není po celý rok stejná. U spalovacích zařízení s teplovodním výměníkem je možné řešit napojení na akumulací nádobu na topnou vodu, která umožňuje krbové vložce pracovat při ideálním jmenovitém výkonu a nepřetápět interiér. Při modulaci výkonu (na tzv. snížený výkon), u zařízení bez výměníku, dochází k vyšší produkci emisí a nižší účinnosti. Při výběru kamen je potřeba zbytečně nepředimenzovat výkon a tím docílit co největšího komfortu a pokrytí topné sezóny v provozu na výkon jmenovitý. [6]

4.3 Biomasa

Biomasa je definována jako organická hmota rostlinného nebo živočišného původu (pěstování rostlin v půdě nebo ve vodě, chov živočichů, produkce organického původu, organické odpady). Biomasa je získávána buď záměrně jako výsledek výrobní činnosti, nebo se jedná o využití zbytků ze zemědělské, potravinářské a lesní výroby, z komunálního hospodářství a z údržby a péče o krajinu. Patří do skupiny obnovitelných zdrojů energie stejně jako slunce, voda a vítr. Při jejím dokonalém spalování se uvolňuje relativně malé množství oxidu uhličitého a má tak i příznivý dopad na životní prostředí. Podle propočtů různých odborníků se uvádí roční celosvětová produkce na úrovni 100 miliard tun, jejíž energetický potenciál se pohybuje kolem 1 400 [EJ]. Což je téměř pětkrát více, než je roční světová potřeba fosilních paliv (300 [EJ]). [5]

Tuhá biopaliva dnes stále více nahrazují fosilní paliva, a tím omezují objemy odpadů při jejich těžbě a zpracování, a následně tak přispívají ke zvýšení efektivity zdrojů. Tuhá biopaliva na bázi biomasy omezují emise fosilního uhlíku do atmosféry a současně snižují emise skleníkových plynů z antropogenních činností. [5]

4.3.1 Členění biomasy

Rozdělení a klasifikace jednotlivých tuhých paliv podle normy na tuhá paliva a specifikaci třídy paliv ČSN EN ISO 17225-1 (2014). Tato norma nahrazuje předchozí normu ČSN EN 14961-1 (2010). Obecná klasifikace je založena na původu a zdroji biopaliva. V hierarchickém klasifikačním systému jsou podle původu tyto hlavní skupiny tuhých biopaliv: [22]

- Dřevní biomasa
- Bylinná biomasa
- Ovocná biomasa
- Vodní biomasa
- Homogenní směsi a směsi

Zaměření této diplomové práce je především na dřevní biomasu a její využití k energetickým účelům. K vytápění dřevní biomasou po zpracování se nejčastěji využívá dřevěné uhlí, palivové dřevo, dřevěné brikety, dřevěné pelety, dřevní štěpka, piliny a kůra.

4.3.1.1 Dřevní Biomasa

Rozdělení dřevní biomasy dle ČSN EN ISO 17225-1 (2014): [22]

Lesní, plantážové a jiné původní dřevo – může být upraveno pouze zmenšením velikosti částic, odkorněním, sušením nebo zvlhčením. Lesní plantážové dřevo zahrnuje dřevo z lesů, parků, zahrad, plantáží a plantáží s rychle rostoucími dřevinami a rychle rostoucí dřeviny.

Vedlejší produkty a zbytky z dřevozpracujícího průmyslu – těmito biopalivy mohou být chemicky neupravené dřevní zbytky (např. zbytky z odkornění, piliny, odřezky atd.). Dále to mohou být chemicky upravené dřevní zbytky z výroby nábytku nebo desek, upravené lepidly a různými barvivy, které neobsahují těžké kovy nebo halogenované organické sloučeniny.

Použité dřevo – zahrnuje skupinu dřevního odpadu od zákazníků nebo společnosti, a to původní nebo pouze mechanicky zpracované dřevo, znečištěné pouze na nevýznamné ploše během používání látkami, které nelze běžně nalézt ve dřevě v jeho přirozeném stavu (například palety, transportní bedny, krabice atd.). Opět toto dřevo nesmí obsahovat těžké kovy ve větší míře než původní dřevo nebo halogenované organické sloučeniny.

Homogenní směsi a směsi – zahrnuje homogenní směsi a směsi z dřevní biomasy ve skupinách 1.1 až 1.3 tabulky P1, která je přílohou 1. Mísení může být buď úmyslné – homogenní směsi, nebo neúmyslné – směsi.

Klasifikace původu a zdrojů dřevní biomasy je uvedena v tabulce P1, která je přílohou 1 této diplomové práce. [22]

4.3.2 Specifikace tuhých biopaliv na základě obchodních forem a vlastností

V dnešní době se obchoduje s různými velikostmi a tvary tuhých biopaliv. Velikost a tvar ovlivňují manipulaci s palivem a jeho vlastnosti při hoření. Biopaliva se mohou dodávat například ve formách uvedených v tabulce 5. [22]

Název paliva	Typická velikost částic	Běžná metoda přípravy
Celý strom	> 500 [mm]	Bez přípravy nebo odvětvení
Dřevní štěpka	5 mm až 100 [mm]	Řezáním ostrými nástroji
Drcené dřevní palivo	různá	Drcení tupými nástroji
Kmenové dřevo – kulatina	> 100 [mm]	Řezáním ostrými nástroji
Polena	50 cm až 100 [cm]	Řezáním ostrými nástroji
Palivové dřevo	5 cm až 100 [cm]	Řezáním ostrými nástroji
Odkorky a odřezky	různá	Řezáním ostrými nástroji
Kůra	různá	Odkorněním zbytků stromů (rozřezaných nebo nerozřezaných)
Otep, snop	různá	Podélně orientovaný a svázaný
Palivový jemný prach	< 1 [mm]	Mletím
Piliny	1 mm až 5 [mm]	Řezáním ostrými nástroji
Hoblíny	1 mm až 30 [mm]	Hoblováním ostrými nástroji
Brikety	∅ > 25 [mm]	Mechanické stlačení
Pelety	∅ ≤ 25 [mm]	Mechanické stlačení
Balíky Malé hranolovité balíky Velké hranolovité balíky Kulaté balíky	0,1 [m ³] 3,7 [m ³] 2,1 [m ³]	Stlačením a svázáním do čtvercového průřezu Stlačením a svázáním do čtvercového průřezu Stlačením a svázáním do válcového průřezu
Řezanka ze slámy nebo z energetických travin	10 až 200 [mm]	Rozřezáním během sklizení nebo před spálením
Zrno nebo semeno	různá	Bez přípravy nebo sušení – kromě operací, které jsou nutné pro skladování obilnin
Ovocné pecky nebo jádra	5 až 15 [mm]	Bez přípravy nebo lisování a extrakce chemikáliemi
Vláknité výlisky	různá	Příprava z vláknitého odpadu odvodněním
Dřevěné uhlí	různá	Dřevěné uhlí se připravuje destruktivní destilací a pyrolýzou biomasy
Tepelně upravená biomasa	různá	Krátkodobá předúprava biomasy při teplotě mezi 200 °C a 300 °C (např. 60 min)
POZNÁMKA 1: Mohou se také použít i jiné formy.		
POZNÁMKA 2: Definice různých obchodních forem jsou v souladu ISO 16559.		

Tabulka 5: Hlavní obchodní formy a suroviny tuhých biopaliv [23]

4.3.2.1 Obchodní forma a specifikace vlastností tuhých biopaliv

Pro vzorkování a stanovení vlastností tuhých biopaliv se musí používat mezinárodní normy ISO 16559, ISO 16948, ISO 16967, ISO 16968, ISO 16993, ISO 16994, ISO 17828, ISO 17829, ISO 17831-1 a ISO 17831-2. Byly vyvinuty další části normy ISO 17225

(např. část druhá ISO 17225-2 (2014), část třetí ISO 17225-3 (2014), část čtvrtá ISO 17225-4 (2014) a část pátá ISO 17225-5 (2014)) k popsání výrobků tříděných tuhých biopaliv jakými jsou dřevěné pelety, dřevěné brikety, palivové kusové dřevo a dřevní štěpka. Tyto normy se doporučují právě pro menší spalovací zařízení. Dřevěné pelety, dřevěné brikety, dřevní štěpka a palivové dřevo, jsou obchodní formy, které jsou v malých, spalovacích zařízeních používány běžně. V České republice je stále nejrozšířenější palivové dřevo, dřevěné pelety a dřevěné brikety. [22]

4.3.3 Způsoby využití biomasy k energetickým účelům

Způsob využití biomasy k energetickým účelům je do značné míry předurčen fyzikálními a chemickými vlastnostmi biomasy. Jedním z velmi důležitých parametrů je vlhkost, resp. obsah sušiny v biomase. Hodnota 50 % sušiny je přibližná hranice mezi mokrymi procesy (obsah sušiny je menší než 50 %) a suchými procesy (obsah sušiny je větší než 50 %). Z principiálního hlediska lze rozlišit několik způsobů získávání energie z biomasy, uvedených v tabulce 6 a přípravy biomasy pro energetické využití: [5]

- Termochemická přeměna biomasy (suché procesy pro energetické využití biomasy):
spalování, zplyňování, pyrolýza
- Biochemická přeměna biomasy (mokrý procesy pro energetické využití biomasy):
alkoholové kvašení, metanové kvašení
- Fyzikální a chemická přeměna biomasy:
mechanicky (štípání, drcení, lisování, briketování, peletování, mletí apod.),
chemicky (esterifikace surových bioolejů)
- Získávání odpadního tepla při zpracování biomasy
(např. při kompostování, aerobním čištění odpadních vod, anaerobní fermentaci pevných organických odpadů apod.).

Přestože existuje více způsobů využití biomasy k energetickým účelům, v praxi převládá spalování biomasy ze suchých procesů, a výroba bioplynu anaerobní fermentací z mokrých procesů. Z ostatních způsobů dominuje výroba metylesteru kyselin bioolejů, získávaných v surovém stavu ze semen olejnatých rostlin. [5]

Typ konverze biomasy	Způsob konverze biomasy	Energetický výstup	Odpadní materiál nebo druhotná surovina
termochemická konverze (suché procesy)	spalování	teplo vázané na nosič	popeloviny
	zplyňování	generátorový plyn	dehtový olej, uhlíkaté palivo
	pyrolýza	generátorový plyn	dehtový olej, pevné hořlavé zbytky
biochemická konverze (mokré procesy)	anaerobní fermentace	bioplyn	fermentovaný substrát
	aerobní fermentace	teplo vázané na nosič	fermentovaný substrát
fyzikálně-chemická konverze	esterifikace bio olejů	metylester bio oleje	glycerin

Tabulka 6: Způsoby využití biomasy k energetickým účelům [5]

4.3.4 Dřevní biomasa jako základní palivo pro spalovací zařízení

Dřevní biomasu, která je určena pro spalování a výrobu energie je před jeho použitím potřeba upravit do vhodného tvaru o určité velikosti. Mnohdy jí nelze použít přímo jako palivo do spalovacích zařízení. Zařízení na úpravu dřeva dělíme na řezací a stříhací, štěpkovače a drtiče. Záleží na tom, jak velký je požadovaný výsledný produkt z dřevní biomasy a dřevního odpadu. Výslednými produkty jsou nejčastěji palivové (kusové) dřevo, dřevěné piliny, dřevěný prach a dřevní štěrka. Z dřevěných pilin, prachu a štěrky lze vhodnou úpravou vyrobit dřevěné pelety nebo brikety. Kromě tvarů a velikosti jsou u pelet a briket důležité i mechanické vlastnosti, které nejen ovlivňují způsob jejich manipulace (uskladnění, dávkování), ale i případné ztráty z výše uvedených operací. [5 a 23]

4.3.4.1 Palivové (kusové) dřevo

Dřevo je tradičním palivem již od pradávna. Jedná se o organický materiál přírodního původu. Jeho výhřevnost je v rozmezí 6 až 15 [MJ·kg⁻¹] při relativní vlhkosti 20 %, kdy se již označuje jako tzv. „suché“ dřevo. S vyšším obsahem vody je nižší energetický zisk díky větší spotřebě tepla pro přeměnu vody v páru a vyšší emise výstupních spalin způsobené nedokonalým spalováním. Dřevo se dělí především na měkké (smrk, jedle, borovice, topol),

převážně z jehličnatých stromů a tvrdé ze stromů listnatých (dub, buk, habr, akát, ořech). Měkké dřevo je vhodnější především na první zatopení nebo při vyšší potřebě tepla, protože je schopné hořet rychleji a dosahovat delších plamenů. Tím se rychleji nahřívají spalínové cesty a komín tak dosahuje rychleji požadovaného tahu, který je třeba pro kvalitní spalování. Tvrdé dřevo naopak hoří déle a tím prodlužuje dobu hoření. Podstatná je již zmiňovaná vlhkost dřeva. Pro dosažení požadované vlhkosti do 20 %, je potřeba dřevo uskladnit, případně dosušit, aby se zbavilo co možná největšího podílu vody. Při skladování na vzduchu, může tento proces trvat klidně dva až tři roky, podle druhu dřeva a výsledná hodnota vlhkosti je 5 až 20 %. Při dosoušení paliva je obsah vody maximálně do 5 %. [5 a 23]

4.3.4.2 Dřevěné pelety – peletování

Dřevěné pelety jsou z pravidla granule s kruhovým průřezem o celkovém průměru 6 až 20 [mm] a délce 1 až 5 [cm], které jsou vyrobeny výhradně z dřevní biomasy. Především se jedná o dřevěné piliny a dřevní odpad bez chemických přísad a pojiv. Při lisování pelet není vhodné přidávat velké množství dřevěného prachu, který má za následek zhoršení pevnosti pelet. Optimální rozměry pilin jsou 2 až 3 [mm]. Obsah vody v pilinách by se měl pohybovat kolem hodnoty 10 %. Piliny se tak zákonitě musí před lisováním sušit na požadovanou hodnotu vlhkosti. Piliny v surovém stavu mají vlhkost kolem 45 %. Sušení provádíme v bubnových sušičkách nebo v sušičkách za pomoci horkého vzduchu o teplotě do 160 [°C], aby nedocházelo ke ztrátě hořlavých prchavých látek a aby došlo k odstranění přebytečné vody. [3 a 23]

Peletování je proces, který probíhá na protlačovacích matricových lisech, kde se lisuje vstupní materiál pod vysokým tlakem na požadovaný tvar a velikost pelet. Protlačovací matricové lisy jsou konstrukčně řešeny jako talířové, ploché nebo prstencové. Matrice je vyrobena z ušlechtilé oceli, v níž jsou otvory potřebného průřezu a průměru, a těsně nad ní se odvalují rolly, které piliny protlačují skrze matrici. Při protlačování vzniká značné teplo, které změkčuje a uvolňuje v surovině obsažený lignin. Lignin plní hydrofobní funkci a jeho hlavním úkolem je spojování mezibuněčných vláken a zpevnění celulózových molekul v rámci buněčných stěn. Palivu tak dodává pevnost především v tlaku. Po výstupu pelet z peletovacího stroje je nezbytné pelety chladit a teprve potom dostávají potřebnou pevnost a trvanlivost, neboť lignin jako pojivo ztuhne. [3 a 23]

Kvalitu pelet lze alespoň přibližně určit již na první pohled. Pelety, které jsou světlé a dokáží se mezi prsty jednoduše zlomit, jsou z měkkého dřeva a dají se považovat za kvalitní palivo do kamen, sporáků, kotlů a krbů. Při spalování pelet z tvrdého dřeva, je v některých případech potřeba upravit parametry spalovacího zařízení (dávkování a rychlost odtahového ventilátoru). Jejich odhořívání v hořáku topidla je pomalejší a mnohdy se hořáky mohou peletami zahltit. Pelety z tvrdého dřeva jsou vhodnější jako palivo pro zařízení se spodním dávkováním paliva (s tzv. retortovým hořákem).

Dřevěné pelety mají výhřevnost kolem 18 až 19 [MJ·kg⁻¹]. Při spalování dřevěných pelet se dosahuje vyšších hodnot účinnosti procesu spalování a jejich popelnatost se pohybuje kolem hodnot 0,5 až 1 %. Opět se popel dá využít jako zahradní minerální hnojivo. Pro spalování v malých zařízeních se používají především dřevěné pelety o průměru 6 nebo 8 [mm]. [5 a 23]

V certifikačním systému ENplus, která rozlišuje pelety podle jejich kvality, proběhla v první polovině roku 2015 rozsáhlá novelizace, která začala platit od 1. září 2015. Celý systém se opírá o pravidla v příručce ENplus ver. 3.0, ve které bylo zpřísněno i několik parametrů kvality dřevních pelet. Parametry vycházejí z mezinárodní 17225-2:2014 (2014) s několika zpřísněními kvality a parametrů, které jsou v původní ISO normě buď dobrovolné, mírnější, nebo je norma vůbec nedefinuje. Jakostní třídy ENplus A1, ENplus A2 a ENplus B se od sebe liší hlavně obsahem popela a vlastnostmi při tání popela. Obě vlastnosti jsou důležité pro správnou funkci kamen a provoz kotlů. Třída ENplus A1 je nejvyšší třídou, nejvíce doporučovanou pro malé kotle a kamna. Pelety s jinou třídou ENplus a horšími vlastnostmi jsou pro použití v kotlích s vyššími výkony, ale musí být schváleny výrobcem. [24]

4.3.4.3 Dřevěné brikety – briketování

Dřevěná briketa je palivo uměle upravené lisováním dřevěných pilin nebo štěpky bez přídavných pojiv do formy vhodné pro spalování. Takovou formu úpravy nazýváme briketování. Dřevěné brikety se lisují především do tvaru válců, kostek, šestihranů nebo kvádrů. Brikety jsou vytvořeny stlačením různorodých komponentů a jejich kvalita a vlastnosti závisí především na: [23]

- Tlaku při lisování, který je minimálně 400 [MPa]

- Struktura materiálu – nemělo by být obsaženo více jak 6 až 8 % kůry a 20 % dřevního prachu
- Vlhkosti materiálu, která nesmí přesáhnout hodnotu 15 %, jinak se briketa při procesu lisování nezhutní a rozpadne se
- Druhu lisovacího materiálu – piliny z tvrdého nebo měkkého dřeva

Briketování se provádí na briketovacích lisech, které se liší dle konstrukce pohonu, lisovací komory či lisovacího nástroje. Při briketování dochází k objemové redukci materiálu v poměru 12:1. Brikety používají jako palivo do kotlů, krbových kamen, krbů, sporáků na tuhá paliva a zahradních krbů a grilů. Výhodou jsou malé nároky na skladování, necitlivost na vzdušnou vlhkost a možnost využití jejich popele jako zahradní minerální hnojivo. Obsah popele se u briket pohybuje v rozmezí 0,5 až 2 %. Brikety standardní kvality mají výhřevnost kolem 18 až 20 [MJ·kg⁻¹]. Při použití pilin z tvrdého dřeva a dřevěného prachu lze dosáhnout vyšší měrné hmotnosti a výhřevnosti až 33 [MJ·kg⁻¹]. Po výstupu briket z briketovacího stroje je nezbytné brikety také ochladit, stejně jako u pelet, aby lignin ztuhnul. [5 a 23]

4.3.4.4 Dřevní štěpka – štěpkování

Dřevní štěpka je zcela čistý a obnovitelný zdroj energie bez další přidané energie (např. na sušení nebo lisování), což se projevuje v nízké pořizovací ceně za palivo. Používá se převážně v kotlích s automatickým dávkováním paliva. [5]

Dřevní štěpka ze zbytků lesní těžby – jedná se o strojně zpracované těžební zbytky a kmínky z probírek na délku 50 až 250 [mm]. Obsah vody bezprostředně po těžbě dosahuje více než 55 % a objemová hmotnost se pohybuje okolo 300 [kg·m⁻³]. Obsah vody po přirozeném dosoušení přes léto na slunném a větru vystaveném místě zpravidla klesá na 30 % při objemové hmotnosti kolem 250 [kg·m⁻³]. Výhřevnost takové štěpky se pohybuje v rozmezí 8 až 12 [MJ·kg⁻¹]. [25]

Dřevní štěpka ze zbytků z průmyslového zpracování dřeva – strojně zpracovaný odpad průmyslového zpracování dřeva na délku 3 až 15 [cm]. Obsah vody z pilařských odpadů bývá kolem 45 %, z truhlářské výroby kolem 15 %. Její výhřevnost se pohybuje v rozmezí 9 až 16 [MJ·kg⁻¹]. [25]

Štěpkování se provádí pomocí tzv. štěpkovačů a drtičů. Štěpkovače slouží především k beztržskému dělení dřeva řezným účinkem sekacích nožů napříč vlákny a zároveň dělením na potřebnou tloušťku podél vláken díky klínovému tvaru nože. Dělí se především na diskové, bubnové a šroubové. Drtiče jsou určeny k úpravě takových rozměrů dřeva a dřevního odpadu, které není možné sekát sekačkami. Jedná se především o drobné a netvárné dřevo, jako jsou křoviny, pařezy a stavební odpad. Ty se dělí na nízko otáčkové a vysoko otáčkové drtiče. [5]

4.4 Základní vlastnosti a složení tuhých paliv – biopaliv

Pokud chceme z tuhých biopaliv získávat energii, je potřeba brát zřetel především na fyzikální vlastnosti jako výhřevnost, elementární analýza, prvkový rozbor a měrná hmotnost. Veškerá tuhá paliva, která se vyskytují v surovém stavu, se skládají z celkové vody, popele a hořlavin. Voda a popel je nehořlavou částí paliva, která se také označuje jako balast nebo přítěž. Tyto složky snižují účinnost spalovacího zařízení a výhřevnost paliva. Uhlík, vodík, síra a dusík tvoří hořlavou složku paliva. Spalování se však účastní pouze uhlík, vodík, síra a atmosférický kyslík zde působí jako okysličovadlo. [23 a 26]

Pro složení tuhých biopaliv platí základní vztah:

$$W + C + H + O + S + N + Cl + A = 100 \% \quad (1)$$

W, C, H, O, S, N, Cl, A – jsou procentuální hmotnostní podíly veškeré vody, uhlíku, vodíku, kyslíku, síry, dusíku, chlóru a popela v původním palivu [% hm.]. [23]

4.4.1 Chemické složení tuhých paliv

Uhlík (C) – je hlavním nositelem tepelné energie a nachází se v palivu ve formě organických sloučenin. Výhřevnost uhlíku je 33,9 [MJ·kg⁻¹]. [3 a 5]

Vodík (H) – Je bezbarvý lehký plyn bez zápachu a chuti. Je hořlavý. Barva plamene je namodralá, ale hoření nepodporuje. Je 14,38krát lehčí než vzduch a vede teplo 7krát lépe než vzduch. Při zahřátí je vodík značně reaktivnější. Zejména s kyslíkem a halogeny se slučuje velmi bouřlivě, ale je vždy zapotřebí inicializace této reakce, což je třeba jiskra pro zapálení plamene. Výhřevnost vodíku je 119,7 [MJ·kg⁻¹]. Při hoření dokáže vyvinout 4krát

více tepla na jednotku hmotnosti než uhlík, což se velmi příznivě projeví na výhřevnosti paliva. [3 a 5]

Síra (S) – je nekovový chemický prvek žluté barvy, poměrně hojně zastoupený v přírodě. V palivu je síra nežádoucí i přesto, že zvyšuje výhřevnost. Produkty hoření síry mají totiž nepříznivý vliv na trvanlivost topenišť a celého spalovacího zařízení a také znečišťují okolní atmosféru. Síra hoří na vzduchu modrým plamenem za vzniku oxidu siřičitého SO_2 a v malém množství i oxidu sírového SO_3 . S vodní párou se následně tvoří kyselina sírová H_2SO_4 . Ta má za následek korozi na trubkách a ostatních železných dílech topeniště a spalinových cest. Nespalitelná síra přejde do tuhých zbytků a tvoří tzv. strusky a škváry. Emise síry vzhledem ke stopovému množství síry obsažené v palivu nepředstavují, vzhledem k limitním hodnotám, žádné potíže. Výhřevnost síry je $10,5 \text{ [MJ}\cdot\text{kg}^{-1}]$. [3 a 5]

Dusík (N) – je plynný chemický prvek, tvořící hlavní složku zemské atmosféry. Patří mezi biogenní prvky, které jsou základními stavebními kameny živé hmoty. Je to také plyn bez zápachu a chuti. Není toxický a nijak zvlášť nebezpečný. Dusík je inertní plyn, takže reaguje s jinými chemickými sloučeninami pouze za vysokých teplot a tlaků. S kyslíkem se například slučuje při teplotách okolo $2\,500 \text{ [}^\circ\text{C}]$. Dusík se nezúčastňuje reakcí hoření a zcela přechází samotný do spalin. Svou přítomností snižuje obsah ostatních prvků, což se lehce projevuje ve snížení výhřevnosti. [3 a 5]

Kyslík (O_2) – kyslík je plynný chemický prvek, který tvoří druhou hlavní složku zemské atmosféry. Je to biogenním prvkem a jeho přítomnost je nezbytná pro existenci většiny živých organismů na této planetě. Například při hoření směsi kyslíku s vodíkem lze dosáhnout teploty kolem $3\,000 \text{ [}^\circ\text{C}]$. Tento plamen se používá například při řezání oceli a tavení platinových kovů s vysokým bodem tání. Kyslík je nežádoucí část paliva, poněvadž váže vodík a částečně i uhlík na hydroxidy, vodu a oxidy. [3 a 5]

Chlór (Cl) – je toxický, světle zelený plyn. Chlór rovněž během spalování přechází do plynné fáze. Nejvíce limitujícím faktorem koncentrace chlóru v palivu je jeho korozivní účinek při spolupůsobení s alkalickými prvky. [3 a 5]

Chemické složení paliv zohledňuje tzv. elementární analýza, která má podstatný význam pro stanovení potřebného množství vzduchu, dodávaného k ideálnímu spálení. (stechiometrie paliv). [23]

4.4.2 Výhřevnost a spalné teplo tuhých paliv

Při spalování se hořlavé látky paliva slučují s kyslíkem a vznikají produkty spalování, které nazýváme spaliny. Tento pochod je doprovázen uvolňováním určitého množství tepla, které se u tuhých biopaliv vztahuje na jednotku hmotnosti ($[kJ \cdot kg^{-1}]$; za normálních podmínek: teplota $t = 0 [^{\circ}C]$, tlak $p = 101,3 [kPa]$). V technické praxi se setkáme s dvojným vyjádřením uvolněného tepla, a to jako spalné teplo Q_s , nebo jako výhřevnost paliva Q_i . [27]

Spalné teplo je množství tepla, které se uvolní při dokonalém spálení měrné jednotky paliva za předpokladu, že se spaliny ochladí na $0 [^{\circ}C]$ a veškerá vzniklá pára při spalování zcondenzuje. Výhřevnost paliva udává množství tepla, které se uvolní při dokonalém spalování měrné jednotky paliva, přičemž vzniklá pára ve spalinách nezcondenzuje. Druhé vyjádření množství uvolněného tepla více odpovídá reálným podmínkám. Mírně vyšší výhřevnost kůry, větví a jehličí je potom dána vyšším obsahem pryskyřic, které mají výhřevnost asi dvakrát vyšší než samotné dřevo. [28]

Závislost mezi spalným teplem Q_s a výhřevností Q_i , lze vyjádřit podle ČSN 44 1352 vztahem: [23]

$$Q_i = Q_s - (0,02442 \cdot 1000) \cdot (W + 8,94 \cdot H) [kJ \cdot kg^{-1}, kJ \cdot m^{-3}_N] \quad (2)$$

kde: W – je obsah vody v analytickém vzorku [%]

8,94 - koeficient pro přepočet vodíku na vodu

H – obsah vodíku v analytickém vzorku [%]

0,02442 - hodnota, která odpovídá energii spotřebované na ohřev a vytápění 1 % vody při teplotě $25 [^{\circ}C]$

4.4.3 Obsah vody

Termín používaný v energetice odpovídá podílu vody v [%] na celkové hmotnosti vzorku paliva. V závislosti na typu dřevozpracujícího podniku a technologii výroby se obsah vody v dřevní hmotě pohybuje od 60 % u čerstvého dřeva až po 5 % u dřeva sušeného. Maximální hranice obsahu vody pro termické využití je 55 %. Paradoxně ani spalování

absolutně suchého dřeva, není z hlediska průběhu procesu hoření optimální. Příliš suchá hmota hoří explozivně a velká část energie uniká ve spalinách [23 a 27].

Obsah vody ovlivňuje také vhodnost ke skladování. Obsah vody nad 16 % vede zpravidla k biologickým procesům odbourávání nebo transformace, které jsou spojeny se ztrátami. Odbourávání substance bakteriemi nebo houbami probíhá ale také souběžně se změnou složení paliva. Například vlivem růstu hub dochází příležitostně ke zvýšení obsahu ligninu, vzrůstá též obsah popela, protože anorganická masa zůstává stejná. Vlhké materiály s sebou nesou i nebezpečí požárů způsobených samovznícením. Je zapříčiněno respirací (dýcháním) ještě žijících buněk Parenchymu. Toto nebezpečí existuje především při naskladnění vlhkých balíků sena a u jemně rozdrceného dřeva ve formě pilin nebo kůry, protože vznikající teplo nemůže být odváděno z důvodu zabraňující přirozené konvekce a nepatrného vedení tepla. [28]

Určení přesné vlhkosti v biomase může být problematické, například u dřeva se vlhkost ke středu polena zvyšuje, také vlivem velikosti odparné plochy je odlišná vlhkost v různě velkých kusech. Skutečnou vlhkost v biomase můžeme měřit několika způsoby. [29]

- váhovou zkouškou,
- elektrickými vlhkoměry,
- extrakčním způsobem,
- vakuovým způsobem,
- jinými způsoby.

4.4.4 Prchavá hořlavina V [% hm.] v tuhých palivech

Obsah a průběh uvolňování prchavé hořlaviny z paliva je další důležitou hodnotou pro spalovací proces. Je to množství plynné látky, které se uvolní z hořlaviny paliva při jeho zahřívání za nepřístupu vzduchu – tzv. pyrolýza. Tyto prchavé hořlaviny se projevují jako plamen v topeništi. Obsah prchavé hořlaviny se ze dřeva stárím více a více uvolňuje. Nejmenší podíl prchavých látek má černé uhlí. Dřevo má jeden z nejvyšších obsahů prchavé hořlaviny ve svém objemu. Ve spalovacím procesu podstatně napomáhá procesu vznícování paliva v topeništi a stabilizuje spalovací proces. Jestliže nevyhoří, odchází s kouřovými plyny a vytváří ztrátu nespálenými hořlavými plyny – tzv. ztrátou chemickým nedopalem.

Pokud se tyto hořlavé plyny dostanou do míst, kde se ochladí pod spalovací teplotu, tak se některé jejich složky (např. uhlovodíky) rozkládají a tvoří saze. Ty se částečně usazují na stěnách topenišť, kouřovodů a komínů, tvoří izolant a částečně vystupují komínem v podobě tmavého kouře. Po zahřátí dřevěného paliva (po přiložení do roztopeného topeniště) se začínou prchavé hořlaviny uvolňovat a vzniká dřevěné uhlí. Ve dřevě je obsaženo 75 až 85 % prchavých hořlavin. Při smísení se spalovacím, předehřátým vzduchem, tvoří hořlavou směs, která je hlavním iniciátorem spalovacího procesu v topeništi. [23 a 28]

4.4.5 Popel

Obsah popela ve dřevě je ve srovnání s ostatními pevnými palivy nízký, množství popela ve dřevě je asi 0,6 – 1,6 %, u kůry pak jen zřídka překročí 3 %. Popel z biomasy obsahuje množství živin a stopových prvků, což umožňuje jeho využití jako hnojiva. Určitým problémem mohou být těžké kovy, které se ve dřevě někdy vyskytují ve zvýšeném množství. Mechanismy ukládání těžkých kovů nejsou ještě zcela známy, ukládání Cd v kůře stromů je však již prokázané. [30]

4.4.6 Teploty popela

Při termických procesech přeměny energie dochází na žárovém lůžku k fyzikálním změnám popela. Podle úrovně teploty dochází k deformaci až k úplnému roztavení částic popela. Tyto změny jsou charakterizovány třemi teplotami, které se zaznamenávají při měření teploty tání: [23]

- teplotou počátku měknutí t_A – u dřevních biopaliv 1 100 až 1 160 [°C]
- teplotou tání t_B – u dřevních biopaliv 1 250 až 1 340 [°C]
- teplotou počátku tečení t_C – u dřevních biopaliv 1 300 až 1 350 [°C]

Změkčovací poměry jsou charakterizovány teplotami deformace, měknutí (kulovitěho tvaru), tání (polokulovitěho tvaru) a tečení. Vysoké riziko tvorby nánosů v celém topeništi, především pak na roštu a na stěnách výměníku hrozí především u paliv s nízkou teplotou měknutí popela, mezi které patří např. stébelniny a celé rostliny obilovin. Zamezení nánosů se může provádět nákladnými přídatnými zařízeními, jako jsou vodou chlazené roštové systémy nebo spalovací pánve, zpětná vedení spalin, drtiče popela, víření paliva apod. Paralelně k tomu musí být často také omezena maximální teplota spalování. [28]

5. Praktická část práce

5.1 Metodika stanovení tepelně-emisních vlastností spalovacích zařízení

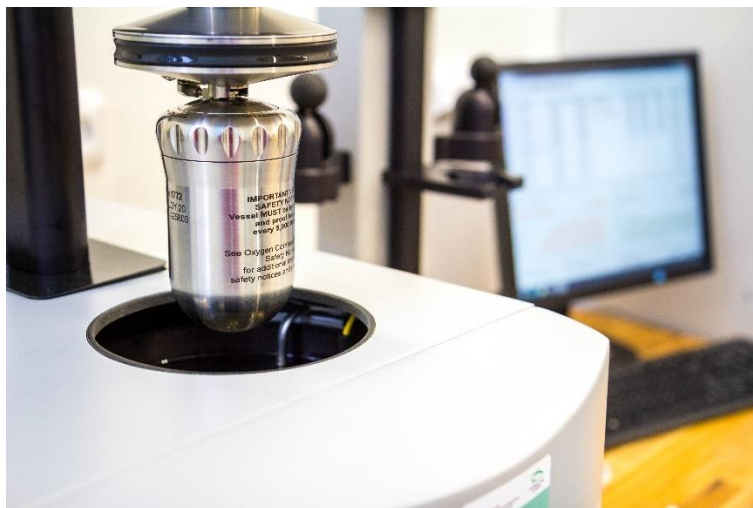
Metodika praktické části vychází z určených klasifikačních, jakostních a specifikačních rámců tuhých biopaliv a charakteristiky souvisejících právních předpisů, typů běžných lisovaných biopaliv a legislativních podmínek v oblasti emisních limitů a kvality paliv z hlediska ochrany ovzduší. Pro stanovení, zpracování a vyhodnocení výsledných hodnot jsou zpracovány jednotlivé metodiky:

5.1.1 Metodika stanovení stechiometrie spalovacích procesů

Základem každého výpočtu tepelné práce u spalovacích zařízení je prvkový rozbor spalovaného paliva. Prvkové složení použitého paliva má vliv na veškeré stechiometrické výpočty, výpočty tepelných účinností a ztrát spalovacích zařízení a významně ovlivňuje tepelnou práci spalovacích zařízení. U tuhých biopaliv se pro zjištění prvkového složení používá tzv. elementární (prvková) analýza, kterou se zjišťuje procentuální hmotnostní podíl uhlíku, vodíku, kyslíku, síry, dusíku a veškeré vody v původním palivu. Nehořlavé látky paliv, tj. obsah popela a obsah veškeré vody, se určí spálením, resp. sušením příslušného vzorku. Prvkové rozborů jednotlivých paliv jsou stanoveny pro normální podmínky (teplota $t = 0$ [°C] a tlak $p = 101,325$ [kPa]). [23 a 28]

Prvkové rozborů jsou vypracovány v nově vybudované laboratoři Technické Fakulty ČZU a následně přepočteny na odpovídající obsah vody ve vzorcích. Vybudovaná laboratoř na TF, je vybavena základní analytickou přístrojovou technikou. Laboratoř umožňuje stanovit tepelně technické parametry vzorků organických materiálů a paliv potřebných pro jejich hodnocení z hlediska možného využití energetického potenciálu. Jedná se zejména o stanovení obsahu vlhkosti, popela, prchavé hořlaviny, pevného uhlíku, teploty vznícení, hodnoty spalného tepla a elementárního složení (C, H, S, N). Znalost těchto základních parametrů je potřebná zejména z důvodů zajištění kontinuity procesů nejen při termickém zpracování organických materiálů, ale také při hodnocení biologických procesů v provozních podmínkách zemědělsko-lesnického, potravinářského a průmyslového zpracování organických surovin. V laboratoři se nacházejí tyto přístroje:

Poloautomatický kalorimetr LECO AC-600 – spalné teplo a výhřevnost je jedním z nejdůležitějších kvalitativních parametrů tuhých i kapalných paliv, jako je uhlí, koks, topné oleje, biomasa, či odpadní materiály určené k energetickému využití (spalování). Výhřevnost vzorku je stanovena přesným měřením tepla uvolněného ze vzorku řízeným spalováním v uzavřeném prostředí. Uvolněné teplo je úměrné výhřevnosti analyzovaného materiálu. Tento kalorimetr je na obrázku 10.



Obrázek 10: poloautomatický kalorimetr LECO AC-600

Elementární analyzátor CHN628 + S – základem každého výpočtu nejen tepelné práce energetického zařízení je prvkový rozbor spalovaného vzorku paliva. Prvkové složení paliv má vliv na veškeré stechiometrické výpočty, výpočty tepelných účinností a ztrát spalovacích zařízení a významně ovlivňuje tepelnou práci energetických zařízení.



Obrázek 11: Elementární analyzátor CHN628+S

U veškerých druhů vzorků pro energetické využití se používá tzv. elementární (prvková) analýza, kterou se zjišťuje procentuální hmotnostní podíl uhlíku, vodíku, kyslíku, síry a dusíku. Elementární analýza je základní metodou pro posouzení vhodnosti využití organických materiálů ve zpracovatelském zařízení (např. bioplynová stanice či kompostárna apod.) nebo při vyhodnocení jakosti vzorků. Analyzátor je na obrázku 11.

Analyzátor LECO TGA (Termogravimetrický analyzátor) – 701 – od aplikací z potravinářství, krmiv pro hospodářská i potavy pro domácí zvířata až po aplikace pro analýzu uhlí, nerostných surovin, cementu, slinků... všude v těchto průmyslových odvětvích se využívá termogravimetrických analýz – tedy analýz váhových úbytků měřených materiálů v závislosti na narůstající teplotě v řízeném prostředí. Tato metoda je běžná pro analýzu obsahu některých prvků, celkové vlhkosti, popelu, prchavých hořlavín, či ztráty žíháním v široké škále organických, anorganických i syntetických materiálů pro různé oblasti použití. Tento analyzátor je na obrázku 12.



Obrázek 12: Analyzátor LECO TGA (termogravimetrický analyzátor)

Stechiometrické výpočty jsou důležité zejména pro řešení celé řady problémů návrhové praxe, stejně jako pro kontrolu práce stávajících spalovacích zařízení. Při těchto výpočtech se stanoví: [3]

- výhřevnost paliva
- množství kyslíku (vzduchu) potřebného k dokonalému spalování paliva
- množství a složení spalin

- měrná hmotnost spalin
- adiabatická, teoretická a praktická spalná teplota

Podle podmínek, které se vytvoří pro spalovací proces, rozeznáváme: [3]

Dokonalé spalování – je takové spalování, při němž dojde ke spálení všech hořlavých složek v palivu, takže ve vzniklých odchozích spalinách již nejsou hořlavé složky obsaženy. Dokonalého spalování s teoretickým přebytkem vzduchu (L_{min}), které se dá vypočítat ze stechiometrických vztahů spalovacích rovnic, lze dosáhnout jen při zcela dokonalém promísení paliva se vzduchem a při ideálních podmínkách spalování. V praktickém provozu však je pro zajištění dokonalého spalování spotřeba vzduchu (kyslíku) větší než teoretická a podstatně závisí na druhu paliva, spalovacího zařízení, oblasti spalování (difúzní nebo kinetická) atd. Mluvíme pak o tzv. přebytku spalovacího vzduchu, který je tím menší, čím dokonaleji se palivo smísí se vzduchem. Poměr mezi skutečnou a teoretickou spotřebou vzduchu se nazývá součinitel přebytku vzduchu (n) a jedná se o bezrozměrnou jednotku. Vzorec pro součinitel přebytku vzduchu je rovný: [3, 23 a 28]

$$n = \frac{L_{skut}}{L_{min}} = \frac{O_{skut}}{O_{min}} \approx \frac{20,95}{20,95 - O_2} \approx \frac{CO_{2max}}{CO_2} \quad [-] \quad (3)$$

Přebytek vzduchu je nutný, aby bylo zaručeno dokonalé spalování. Na druhé straně je však nutno mít na zřeteli škodlivost příliš velkého přebytku. Čím více vzduchu se spalování zúčastní, tím více tepla může být odnášeno spalinami, následně klesá spalná teplota a součinitel využití paliva. [3, 23 a 28]

Nedokonalé spalování – je takové spalování, při němž je určitý obsah hořlavých látek ve výstupních spalinách. Tento způsob spalování vzniká vždy, když hodnota ($n < 1$). Může však nastat i v případě, že hodnota ($n = 0$) nebo ($n > 1$), když dojde k nedokonalému smísení paliva s oxidačním činidlem. Tento způsob spalování zhoršuje tepelnou účinnost spalování, ve většině případů je nežádoucí a používá se z technologických důvodů pro spalování výjimečně. Základní stechiometrický vztah pro nedokonalé spalování uhlíku je:



$$12 [kg] + 16 [kg] = 28 [kg] + 123 [MJ] \quad (5)$$

$$12,01 [kg] + 0,5 \cdot 22,39 [m^3] = 22,37 [m^3] \quad (6)$$

Při spalování uhlíku na CO, se spotřebuje pouze polovina objemu kyslíku než při dokonalém spalování na CO₂. Výhřevnost CO je 12 645 [kJ·m⁻³]. V důsledku značně vyšší rychlosti reakce hoření vodíku proti průběhu hoření uhlíku je prakticky i při (n < 1) ztráta nespáleným vodíkem nulová. [3]

Jestliže bude podíl uhlíku **a**, který shoří na CO, a zároveň podíl uhlíku **b**, který vůbec neshoří, zmenší se při nedokonalém spalování objem CO₂ ve spalinách následovně: [8]

$$\Delta v_{CO_2} = (a + b) \cdot \frac{22,37}{12,01} \cdot C \quad [m^3_N \cdot kg^{-1}] \quad (7)$$

navíc vzniká objem CO:

$$v_{CO} = a \cdot \frac{22,37}{12,01} \cdot C \quad [m^3_N \cdot kg^{-1}] \quad (8)$$

spotřeba kyslíku se zmenší o:

$$\Delta v_{O_2_{min}} = \frac{22,39}{24,02} \cdot a \cdot C + \frac{22,39}{12,01} \cdot b \cdot C \quad [m^3_N \cdot kg^{-1}] \quad (9)$$

a množství spalovacího vzduchu klesne o:

$$\Delta v_{sp_{min}}^5 = \frac{100}{21} \cdot \Delta v_{O_2_{min}} \quad [m^3_N \cdot kg^{-1}] \quad (10)$$

Obsah kyslíku ve spalinách je měřítkem přebytku vzduchu pouze v případě, že spalování je dokonalé. Obsahují-li výstupní spaliny jak oxid uhličitý CO₂, tak oxid uhelnatý CO, hovoříme o tzv. **smíšeném spalování**. [3, 23 a 28]

Výpočet spotřeby vzduchu a množství spalin je možno uskutečnit těmito 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 vybraných látek přichází v úvahu pouze první z uvedených způsobů, tedy na základě stechiometrických výpočtů. [3]

Jako oksyličovadlo se dále uvažuje suchý vzduch o zjednodušeném složení: [3]

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

$$O_2 : N_2 : vzduch = \frac{21}{21} : \frac{78,05}{21} : \frac{100}{21} = 1 : 3,716 : 4,76 \quad (11)$$

- Hmotnostně: 23,2 % O₂, 75,47 % N₂. Obdobně určíme poměr ze vztahu:

$$O_2 : N_2 : vzduch = \frac{23,2}{23,2} : \frac{75,47}{23,2} : \frac{100}{23,2} = 1 : 3,253 : 4,31 \quad (12)$$

Objemové a hmotnostní složení suchého vzduchu bez vodní páry, při zanedbání vzácných plynů, obsažených v nepatrných množstvích, je uvedeno v tabulce 7.

Plyn	Objemové složení [%]	Hmotnostní složení [%]
O ₂	21	23,2
N ₂	78,05	75,474
Ar	0,92	1,28
CO ₂	0,03	0,046

Tabulka 7: Objemové a hmotnostní složení suchého vzduchu [3]

Ke spalování použitý atmosférický vzduch však obsahuje určité množství vodní páry, které je závislé na teplotě okolí t_v a na relativní vlhkosti vzduchu (φ) v okolí. Objem vodní páry připadající na 1 [m³] suchého vzduchu o teplotě t_v : [3]

$$v_{H_2O} = \varphi \cdot \frac{p_s}{p_c - p_s \cdot \varphi} \quad [m^3 \cdot N \cdot kg^{-1}] \quad (13)$$

kde: p_s – je tlak vodní páry při okolní teplotě t_v [kPa],
 p_c – celkový tlak vlhkého vzduchu [kPa].

Součinitel, který vyjadřuje objemové množství vodní páry obsažené ve vzduchu, má při dané relativní vlhkosti a teplotě vzduchu následující velikost: [3]

$$v = 1 + \varphi \cdot \frac{p_s}{p_c - p_s \cdot \varphi} \quad [m^3 \cdot N \cdot kg^{-1}] \quad (14)$$

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

Při přesných výpočtech objemových množství produktů spalování (kouřových plynů) a potřebného objemu vzduchu pro spalování, se vychází z molekulové hmotnosti jednotlivých prvků hořlaviny. Molekulové hmotnosti prvků jsou uvedeny v tabulce 8. [3]

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

Tabulka 8: Molekulové hmotnosti prvků v hořlavině [3]

5.1.1.1 Spalování tuhých a kapalných paliv

Použitím molekulových hmotností jednotlivých prvků lze vyjádřit vztahy pro oxidační reakce při spalování stechiometrickými rovnicemi: [23]

Spalování uhlíku na oxid uhličitý:

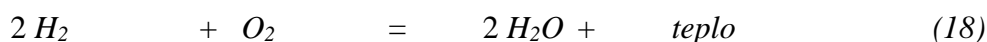


$$12 \text{ [kg]} + 32 \text{ [kg]} = 44 \text{ [kg]} + 406,3 \text{ [MJ]} \quad (16)$$

$$12,01 \text{ [kg]} + 22,39 \text{ [m}^3\text{]} = 22,27 \text{ [m}^3\text{]} \quad (17)$$

Výhřevnost 1 [kg] čistého uhlíku je 33,85 [MJ·kg⁻¹].

Spalování vodíku na vodní páru:



$$2 \text{ [kg]} + 16 \text{ [kg]} = 18 \text{ [kg]} + 241 \text{ [MJ]} \quad (19)$$

$$4,032 \text{ [kg]} + 22,39 \text{ [m}^3\text{]} = 44,81 \text{ [m}^3\text{]} \quad (20)$$

Výhřevnost 1 [kg] vodíku je 120,5 [MJ·kg⁻¹].

Spalování síry na oxid siřičitý:



$$32 \text{ [kg]} + 32 \text{ [kg]} = 64 \text{ [kg]} + 290 \text{ [MJ]} \quad (22)$$

$$32,06 \text{ [kg]} + 22,39 \text{ [m}^3\text{]} = 21,89 \text{ [m}^3\text{]} \quad (23)$$

Výhřevnost 1 [kg] síry je 9,0625 [MJ·kg⁻¹].

Pro převod ostatních prvků a vlhkosti (vody) do plynné fáze platí: [23]

Pro dusík:



$$28,013 \text{ [kg]} = 28,013 \text{ [kg]} \quad (25)$$

$$28,013 \text{ [kg]} = 22,39 \text{ [m}^3\text{]} \quad (26)$$

Pro kyslík:



$$31,999 \text{ [kg]} = 31,999 \text{ [kg]} \quad (28)$$

$$31,999 \text{ [kg]} = 22,39 \text{ [m}^3\text{]} \quad (29)$$

Pro vlhkost platí:

$$H_2O_{kap} = H_2O_{pára} \quad (30)$$

$$18,015 \text{ [kg]} = 18,015 \text{ [kg]} \quad (31)$$

$$18,015 \text{ [kg]} = 22,41 \text{ [m}^3\text{]} \quad (32)$$

Všechny objemy a hmotnosti spalovacího vzduchu a spalin v rovnicích jsou udávány za tzv. normálních podmínek, tj. při teplotě $t = 0 \text{ [}^\circ\text{C]}$ a tlaku $p = 101,325 \text{ [kPa]}$. [3]

Veškeré výsledné rovnice pro výpočet hmotnostního spalování a pro výpočet objemového spalování (hodnoty reálných molárních objemů plynů) jsou uvedeny v publikaci [3] použitých zdrojů.

5.1.2 Metodika přepočtu koncentrace znečišťujících látek

Pro vlastní zhodnocení výsledků měření spalovacích zařízení je nevyhnutelné provést přepočet koncentrace znečišťujících látek. [23]

Koncentrace plynů a par se vyjadřuje: [23]

- podílovým složením v [% objemu; % hmotnosti],
- hmotnostní koncentrací vztaženou k jednotce objemu [$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$; $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$],
- podílovým složením v jednotkách ppm nebo ppb (objemu nebo hmotnosti); jednotky ppm a ppb značí množství částic proti celkovému počtu (parts per million nebo billion)

$$1 \text{ ppm}_{\text{obj}} = 1 \text{ [cm}^3\cdot\text{m}^{-3}\text{]} = 0,0001 \text{ \% objemu,}$$

$$1 \text{ ppm}_{\text{hm}} = 1 \text{ [mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{]} = 0,0001 \text{ \% hmotnosti.}$$

$$\text{ppm}_{\text{obj}} = \text{ppmv} - \text{odpovídá objemovému poměru } 1 : 10^6 \text{ (1 cm}^3\cdot\text{m}^{-3}\text{),}$$

$$\text{ppb}_{\text{obj}} = \text{ppbv} - \text{odpovídá objemovému poměru } 1 : 10^9 \text{ (1 mm}^3\cdot\text{m}^{-3}\text{),}$$

$$\text{ppt}_{\text{obj}} = \text{pptv} - \text{odpovídá objemovému poměru } 1 : 10^{12} \text{ (10}^{-3}\text{ mm}^3\cdot\text{m}^{-3}\text{),}$$

(Termín billion v USA má hodnotu 10⁹ a trillion 10¹²).

Veškeré naměřené hodnoty emisních koncentrací jsou udávány v ppm a v %. Koncentrace v ppm jsou přepočteny na hmotnostní koncentrace v [$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$]. Pro přepočty podílového složení v ppm ($1 \text{ ppm} = 1 \text{ [cm}^3\text{]} \text{ škodliviny v } 1 \text{ [m}^3\text{]} \text{ ovzduší}$) na hmotnostní

koncentraci v $[\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}]$ (hmotnostní množství l $[\text{cm}^3]$ škodliviny v $[\text{mg}]$ v l $[\text{m}^3]$ ovzduší)
platí následující vztah:

$$1 \text{ ppm} = \frac{M}{m} = \frac{M}{22,414} = 0,446 M \quad [\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}] \quad (33)$$

kde: M – je molekulová hmotnost škodliviny $[\text{mg}\cdot\text{mol}^{-1}]$;
 m – je molární objem škodliviny $(22,414 [\text{cm}^3\cdot\text{mol}^{-1}])$.

V praxi se pro přepočty používají hodnoty reálných molárních objemů plynů, a to následující: [23]

$$1 \text{ ppm } SO_2 = \frac{64,05}{22,414} = 2,86 \quad [\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}] \quad (34)$$

$$1 \text{ ppm } NO_2 = \frac{46,01}{22,414} = 2,05 \quad [\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}] \quad (35)$$

$$1 \text{ ppm } CO = \frac{28,01}{22,414} = 1,25 \quad [\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}] \quad (36)$$

$$1 \text{ ppm } NO = \frac{30,01}{22,414} = 1,34 \quad [\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}] \quad (37)$$

Pro přepočty naměřených množství škodlivin ve vlhkých spalinách (vzdušně) při teplotě (t) a tlaku (p) na normální podmínky ($0 [^\circ\text{C}]$; $101,325 [\text{kPa}]$) a pro přepočet na referenční obsah kyslíku ve spalinách používáme následujících vztahů: [23]

Výpočet emisního faktoru pro normální stav vlhkých spalin: [23]

$$E_v = \frac{273,15+t}{273,15} \cdot \frac{101325}{101325+p} \cdot E_n \quad [\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}\text{N}] \quad (38)$$

Výpočet emisního faktoru pro normální stav suchých spalin: [23]

$$E_s = \frac{273,15+t}{273,15} \cdot \frac{101325}{101325+p} \cdot \frac{100}{100+w} \cdot E_n \quad [\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}\text{N}] \quad (39)$$

Výpočet emisního faktoru pro normální stav suchých spalin a referenční obsah kyslíku ve spalinách: [23]

$$E_{sr} = \frac{273,15+t}{273,15} \cdot \frac{101325}{101325+p} \cdot \frac{100}{100+w} \cdot \frac{21-o_r}{21-o_p} \cdot E_n \quad [\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}\text{N}] \quad (40)$$

Nebo:

$$E_{sr} = \frac{21-o_r}{21-o_p} \cdot E_s \quad [\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}\text{N}] \quad (41)$$

kde: E_n – je naměřený obsah škodlivin v l $[\text{m}^3]$ spalin za provozních podmínek
 E_v – je obsah škodliviny v l $[\text{m}^3]$ vlhkých spalin za normálních podmínek
 E_s – je obsah škodliviny v l $[\text{m}^3]$ suchých spalin za normálních podmínek

E_{sr} – je obsah škodliviny v 1 [m³] suchých spalin za normálních podmínek a pro referenční obsah kyslíku ve spalinách
 t_1 – je provozní teplota spalin [°C],
 p – je tlakový rozdíl provozního tlaku k normálnímu tlaku [Pa],
 w – je obsah vodní páry ve spalinách [% objemu],
 O_p – je obsah kyslíku ve spalinách odpovídající provozním podmínkám [% objemu],
 O_r – je referenční obsah kyslíku ve spalinách [% objemu].

Emisní limity jsou stanoveny pro normální podmínky spalin (0 [°C]; 101,325 [kPa]; suché spaliny) a za určitý referenční obsah kyslíku ve spalinách (v této diplomové práci na hodnotu 13 %, pokud není stanoveno jinak). [3]

5.1.3 Metodika měření emisních koncentrací

Pro stanovení hmotnostních toků, emisních faktorů a charakteristiky tuhých částic při termickém zpracování vybraných vzorků biopaliv je použit přístroj **Flue gas analyser GA-60** od firmy Madur electronics. Tento přístroj je víceúčelový analyzátor kouřových plynů. Jeho princip je založen na využití elektrochemických převodníků. Přístroj je standardně vybaven pěti převodníky s možností zabudovat šestý převodník. Standardní vybavení představuje převodníky na analýzu těchto složek spalin: kyslík (O₂), oxid uhelnatý (CO), oxid dusnatý (NO), oxid dusičitý (NO₂), oxid siřičitý (SO₂) a chlorovodík (HCl) viz. tabulka 9. [31]

Převodník	Typ	Měřicí rozsah [ppm]
CO	3F/F	0 – 20 000
NO	3NF/F	0 – 5 000
NO ₂	3NDH	0 – 800
SO ₂	3SF	0 – 2 000
H ₂ S	3H	0 – 1 000
H ₂	3HYT	0 – 2 000
HCN	3HN	0 – 200
HCl	3HL	0 – 100
Cl ₂	3CLH	0 – 250

Tabulka 9: Přehled převodníků analyzátoru spalin GA-60 [31]

Oxid uhličitý je dopočítáván na základě naměřené koncentrace kyslíku a charakteristiky paliva, ostatní komponenty spalin jsou přímo měřeny převodníky. Kyslík a oxid uhličitý jsou uváděny v procentech, ostatní složky pak ve třech koncentracích: [31]

- objemová koncentrace v ppm,

- hmotnostní koncentrace za normálních podmínek (0 [°C], 101,332 [kPa]) [$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$],
- hmotnostní koncentrace za normálních podmínek vztažená na zadaný obsah O_2 (v našem případě $\text{O}_2 = \text{O}_r = 13\%$).

Přístroj GA-60 umožňuje dále měřit jak teplotu okolí, tak teplotu spalin. Na základě těchto teplot a chemických parametrů provádí přístroj výpočet charakteristik spalování v rozsahu: [31]

- komínová ztráta,
- účinnost spalování tepelně-technická,
- přebytek vzduchu,
- dílčí ztráty.

Pomocí přístroje je možné měřit přetlak i podtlak a zároveň diferenční tlak, a tím i rychlost proudění spalin v kouřovodu. Dále přístroj umožňuje, na základě Bacharachovy metody, měřit i sazové číslo. Plyny jsou odsávány sondou s integrovaným termočlánkem a vedeny přes vytápěnou rukojeť hadicí k filtračnímu bloku. Vytápěná rukověť umožňuje bezproblémové měření sazového čísla Bacharachovou metodou. Ve filtračním bloku jsou plyny zbavovány pevných částic a vodní páry, která zkondenzuje za teploty okolí, na soustavě předfiltr (20 [μm]) s odlučovačem kondenzátu, průtokoměr (rotametr), jemný filtr (5 [μm]) s odlučovačem kondenzátu. Dále jsou plyny vedeny hadičkou ke vstupu do vlastního analyzátoru na ovládacím panelu. Pak následuje třicestný elektromagnetický ventil, kterým je možné přivádět k převodníkům buď odsávané plyny (při režimu měření) nebo čerstvý vzduch z prostoru transportního kufru (při režimu kalibrace). Za ventilem je čerpadlo, které dopravuje plyny do komory převodníků. Komora je standardně osazena převodníky pro kyslík, oxid uhelnatý, oxid siřičitý, oxid dusnatý a oxid dusičitý. [31]

Po spuštění komory převodníků jsou plyny vedeny nátrubkem mimo prostor transportního kufru s možností připojení hadičky na odvod plynů mimo místo obsluhy (z důvodu bezpečnostních a korozních). Mimo to je v přístroji zabudováno čidlo diferenčního tlaku. Tlakový převodník není zabudován v hlavní cestě měřených plynů, musí se proto spojovat zvlášť hadičkami s měřeným prostředím.

Pro měření teplot jsou v přístroji zapojeny tyto obvody: [31]

- termočlánek Ni / CrNi nebo PtRh / Pt pro měření teploty spalin, umístěný v odsávací sondě,

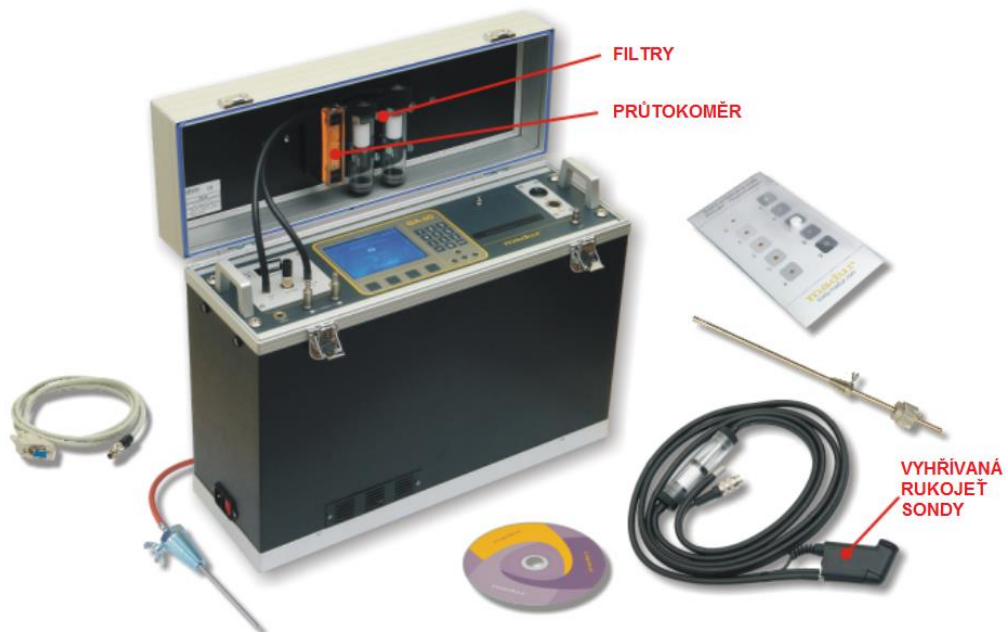
- teploměr Pt-500 pro měření vstupní teploty spalin do přístroje,
- teploměr Pt-500 pro měření teploty okolí,
- teploměr Pt-500 pro měření teploty plynů v komoře převodníků.

Měření teploty slouží jednak k výpočtům termických parametrů, jednak k výpočtu fyzikálních parametrů a teplotní kompenzaci převodníků. Řídící systémy jsou založeny na bázi dvou CMOS mikroprocesorů. Ty sbírají všechny signály přicházející od měřících čidel (elektrochemické převodníky, teplota, tlak), a řídí pak systémy klávesnice, displeje, tiskárny, prvky hlavní cesty plynů. Mimo to provádějí všechny nezbytné výpočty pro stanovení výstupních hodnot. [31]

Během přímého měření jsou měřeny hodnoty teploty okolí, teploty spalin a chemické složení plynů v rozsahu O₂, CO, SO₂, NO, NO₂. Signál převodníků je úměrný objemové koncentraci měřené složky v jednotkách ppm.

Převodník pro stanovení kyslíku vykazuje zanedbatelnou závislost na jednotlivých komponentách měřených plynů. Podobně se chovají převodníky pro stanovení CO a NO, které mají zabudovány vnitřní filtry, které absorbují rušivé složky. Ostatní převodníky reagují na koncentrace ostatních složek. [31]

Na obrázku 13 je ilustrační obrázek novějšího modelu analyzátoru spalin pod stejným modelovým označením Madur GA-60.



Obrázek 13: Ilustrační obrázek novějšího modelu analyzátoru spalin Madur GA-60 [32]

5.1.4 Statistická analýza vztahů mezi veličinami – regresní analýza

Žádný jev přírodě ani ve společnosti neprobíhá ani nevzniká libovolně, ale je vždy ve vztahu k jiným jevům a nemůže být pochopen správně, je-li z těchto vztahů a souvislostí vytržen. Soubor postupů a metod, dovolující řešení otázky závislosti dvou nebo většího počtu veličin, se nazývá regresní a korelační analýza. Tato analýza umožňuje řešit dva základní úkoly:

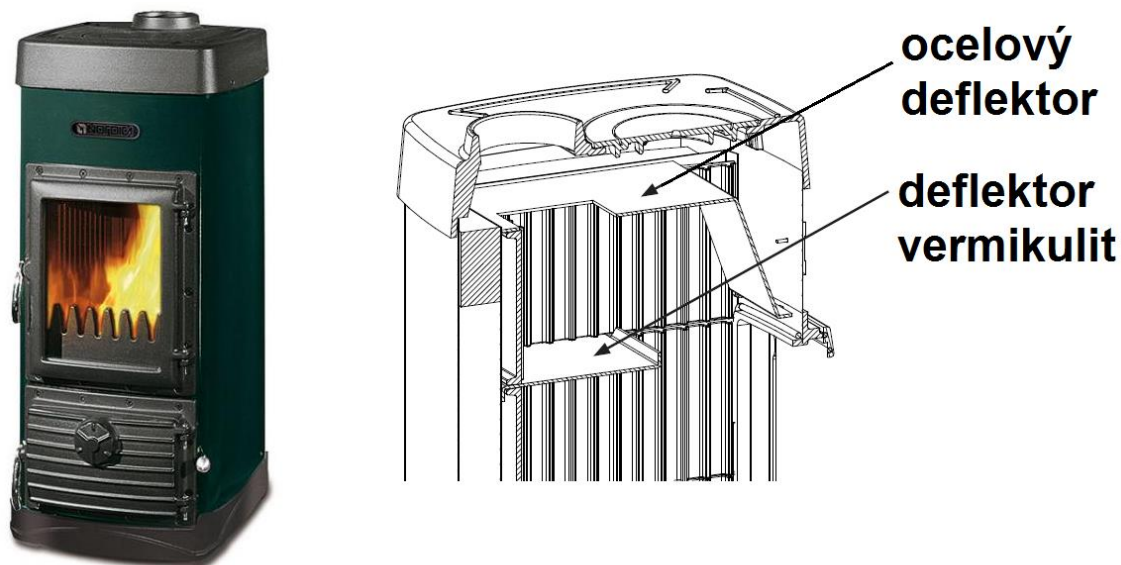
- zajistit formu závislosti a vyjádřit ji matematickou funkcí (tzv. regresní funkcí – regresní úloha),
- určit stupeň síly, s jakou se daná závislost projevuje uprostřed různých rušících vedlejších faktorů – korelační analýza.

Nástrojem regresní analýzy je spojitá regresní funkce jedné či více nezávisle proměnných, udávající střední hodnotu závislé proměnné Y , odpovídající daným hodnotám nezávislých X_j , $j=1, 2, \dots k$. Logika příčinnosti zkoumaného vztahu je základem specifikace regresní funkce, sledující co nejdůležitější zobrazení mechanismu účinku faktoru na výsledek. Měřítkem výstižnosti je stupeň přiblížení hodnot závislé proměnné, předpověděných regresních funkcí, skutečným hodnotám této proměnné pozorovaným ve výběrovém souboru.

5.1.5 Použité spalovací zařízení

Tepelně-emisní měření je uskutečněno na teplovzdušném roštovém spalovacím zařízení s ručním podáváním paliva LaNordica – Max. Konstrukce kamen je jednoplášťová, sálavá. Spalovací prostor je obložen šamotovými deskami. Konstrukce roštu je litinová s otvory pro odvod popela do odnímatelného popelníku. Konstrukce kamen byla upravena výměnou ocelového deflektoru za deflektor z materiálu vermikulit a spalovací komora kamen byla doplněna o terciální vzduch vstupující v zadní části mezi šamotovými deskami. Vybraná kamna jsou znázorněná na obrázku 14, kde je také pohled na řez horní částí topeniště a systém dvou deflektorů. Plášť kamen je ze smaltované oceli, dvířka a horní plotna ze smaltované litiny. Technické parametry kamen jsou uvedeny v tabulce 10.

Spalovací zařízení je připojeno ocelovým kouřovodem pro vedení spalin na tříslůžkový nerezový komín o průměru 180 [mm] a účinné délce 8 [m].



Obrázek 14: Obrázek zkoušených kamen MAX a konstrukce deflektorů v řezu topeniště [33]

Parametr a jednotky	Hodnota parametru
Výkon do vzduchu [kW]:	9,4
Spotřeba paliva [kg·h ⁻¹]:	2,7
Velikost kouřovodu [mm]:	120
Vývod kouřovodu:	horní
Účinnost [%]:	72
Hmotnost [kg]:	88
Výhřevnost prostoru při zateplení 35 W·m ⁻³ [m ³]:	270
Velikost externího vzduchu [mm]:	bez přímého napojení
Výška [mm]:	920
Šířka [mm]:	422
Hloubka [mm]:	477
Typ spalování:	zplyňování
Obklad:	smaltovaný plášť
Konstrukce spalovacího prostoru:	Litina + šamot
Typ roštu:	Otočný
Popelník:	odnímatelný
Velikost polen [mm]:	300
Rozměr vstupního otvoru do spalovacího prostoru [mm]:	255x300
Rozměry spalovacího prostoru [mm]:	265x310x275
Přenos tepla:	Sáláním
Doporučený tah komínu [Pa]:	12
Hmotnostní průtok spalin [g·s ⁻¹]:	6,88
Výstupní teplota spalin [°C]:	360

Tabulka 10: Technické parametry krbových kamen MAX udávané výrobcem [33]

5.1.6 Vybrané vzorky tuhých biopaliv

V následující části projektu jsou charakterizovány vybrané vzorky dřevní biomasy, použité pro analýzu tepelně-emisních vlastností spalovacího zařízení. Pro tuto část práce byly vybrány následující 4 vzorky dřevní biomasy, a to:

- Dřevní štěpka – Topol, brikety \varnothing 80 [mm]
- Dřevní štěpka – Smrk, brikety \varnothing 80 [mm]
- Dřevní štěpka – Kůra jehličnatých stromů, brikety \varnothing 80 [mm]
- Kmenové dřevo – Smrk, polena délky 250 [mm]

Jednotlivé vzorky jsou kladívkovým drtičem nadrceny a nalisovány do formy briket. Pro lisování briket se použil briketovací lis BrickStar 150 s hydraulickým agregátem. Měrná hmotnost takto vylisované brikety je do 1100 [kg·m⁻³] při provozním tlaku do 18 [MPa] a provozní teplotě 60 [°C]. Brikety mají tvar válce o průměru 80 [mm], délku 100 [mm].

5.1.6.1 Vyhodnocení prvkové a stechiometrické analýzy vybraných vzorků biopaliv

U vzorků byl stanoven prvkový rozbor chemického složení s ohledem na základní parametry paliv. Především byl sledován: obsah vody [% hm.], popel [% hm.], prchavá hořlavina [% hm.], neprchavá hořlavina [% hm.], spalné teplo [MJ·kg⁻¹], uhlík C [% hm.], vodík H [% hm.], dusík N [% hm.], síra S [% hm.], kyslík O [% hm.] a chlór Cl [% hm.]. V následující tabulce 11 je znázorněn prvkový rozbor vybraných vzorků v původním složení a v tabulce 12 jsou jednotlivé podíly složek v sušině vzorků v sušině vybraných biopaliv.

Jednotlivé vzorky biopaliv jsou postupně v tomto zařízení spalovány v oblastech hoření. Pro fázi zapálení, rozhoření a zhášení nebyly tepelně-emisní koncentrace sledovány. Při spalování každého vzorku je interval záznamu nastaven po 1 minutě po dobu 30 minut. Záznam byl spuštěn bezprostředně po přiložení palivového vzorku do roztopeného spalovacího otvoru.

Důležitým parametrem je jmenovitý tepelný výkon, který je pro toto spalovací zařízení 9,4 [kW] s účinností 72 [%] podle výrobního štítku. K těmto parametrům odpovídá hodinový přísun paliva 2,7 [kg·h⁻¹] od každého vzorku.

Vzorek	Obsah vody [% hm.]	Popel [% hm.]	Hořlavina prchavá [% hm.]	Hořlavina neprchavá [% hm.]	Spalné teplo [MJ·kg ⁻¹]	Výhřevnost [MJ·kg ⁻¹]	Uhlík C [% hm.]	Vodík H [% hm.]	Dusík N [% hm.]	Síra S [% hm.]	Kyslík O [% hm.]	Chlór Cl [% hm.]
Značka	W _t ^r	A ^r	V ^r	(NV) ^r	Q _s ^d	Q _i ^r	C _t	H _t ^r	N _t ^r	S _t ^r	O _t ^r	Cl _t ^r
Lesní štěpka Topol brikety Ø 80 [mm]	6,2	4,04	75,43	12,2	18,2	17	47,16	5,51	0,52	0,03	36,54	0,03
Lesní štěpka Smrk brikety Ø 80 [mm]	6,5	3,5	77,61	12,44	18,96	17,86	47,53	5,04	0,19	0,02	37,2	0,03
Lesní štěpka Kůra brikety Ø 80 [mm]	8,52	4	67,78	20,37	16,18	15,09	43,7	4,98	0,13	0,04	39,28	0,04
Kmenové dřevo Smrk polena l=250 [mm]	6,63	3,6	78,2	11,33	18,97	17,87	46,91	5,05	0,11	0,02	37,8	0,02

Tabulka 11: Chemická analýza vzorků biopaliv v původním stavu

Vzorek	Obsah vody [% hm.]	Popel [% hm.]	Hořlavina prchavá [% hm.]	Hořlavina neprchavá [% hm.]	Spalné teplo [MJ·kg ⁻¹]	Výhřevnost [MJ·kg ⁻¹]	Uhlík C [% hm.]	Vodík H [% hm.]	Dusík N [% hm.]	Síra S [% hm.]	Kyslík O [% hm.]
Schematická značka	A ^r	V ^r	(NV) ^r	Q _s ^d	Q _i ^r	C _t	H _t ^r	N _t ^r	S _t ^r	O _t ^r	Cl _t ^r
Lesní štěpka Topol brikety Ø 80 [mm]	4,31	86,34	4,9	19,4	18,28	50,28	5,13	0,55	0,03	39,69	0,04
Lesní štěpka Smrk brikety Ø 80 [mm]	3,74	87,2	4,2	20,28	19,27	50,83	4,61	0,2	0,02	40,59	0,03
Lesní štěpka Kůra brikety Ø 80 [mm]	4,37	78,44	6,8	17,68	16,72	47,77	4,4	0,14	0,04	43,27	0,04
Kmenové dřevo Smrk polena l=250 [mm]	3,86	86,3	5,1	20,32	19,31	50,24	4,61	0,12	0,02	41,15	0,02

Tabulka 12: Chemická analýza sušiny vzorků biopaliv

Pro určení stechiometrických a tepelných vlastností zkoumaných vzorků je prvková analýza nezbytnou součástí. Na chemické vlastnosti navazuje stechiometrická analýza spalovacích procesů, která doplňuje charakteristiky paliva a je základem pro jakýkoliv

tepelný výpočet. Tato analýza je důležitá zejména pro řešení celé řady problémů návrhové praxe, stejně jako při kontrole práce stávajících spalovacích zařízení. Tato analýza určí:

- výhřevnost vzorku Q_i [$\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$];
- množství kyslíku (vzduchu) potřebného k dokonalému spalování vzorku [$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$], [$\text{m}^3\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$];
- množství a složení spalin [$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$], [$\text{m}^3\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$];
- měrnou hmotnost spalin [% hmotnosti, % objemu].

Stechiometrie spalovacích procesů		Lesní štěpka Topol brikety \varnothing 80 [mm]	Lesní štěpka Smrk brikety \varnothing 80 [mm]
Q_n	Výhřevnost paliva podle ČSN 44 1352 [$\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$]	16,64	17,70
Q_v	Spalné teplo [$\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$]	18,20	18,96
Hmotnostní spalování			
O_{\min}	Teoretické množství kyslíku pro dokonalé spalování [$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$]	1,33	1,30
L_{\min}	Teoretické množství vzduchu pro dokonalé spalování [$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$]	5,75	5,60
L_{skut}	Skutečné množství vzduchu pro dokonalé spalování [$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$]	10,98	10,69
n	Součinitel přebytku vzduchu (-)	1,91	1,91
v_{sp}^v	Hmotnostní množství vlhkých spalin [$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$]	12,25	11,96
v_{sp}^s	Hmotnostní množství suchých spalin [$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$]	11,25	11,02
v_{spmin}^s	Teoretické hmotnostní množství suchých spalin [$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$]	8,07	7,97
v_{CO_2}	Hmotnostní množství CO_2 [$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$]	1,73	1,75
v_{SO_2}	Hmotnostní množství SO_2 [$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$]	0,00	0,00
$v_{\text{H}_2\text{O}}$	Hmotnostní množství H_2O [$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$]	1,00	0,95
v_{N_2}	Hmotnostní množství N_2 [$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$]	8,29	8,07
v_{O_2}	Hmotnostní množství O_2 [$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$]	1,21	1,18
Vyjádření jednotlivých složek spalin v % obj.			
$\text{CO}_{2\text{max}}$	Teoretická hmotnostní koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách [% obj.]	21,42	21,87
$\text{SO}_{2\text{max}}$	Teoretická hmotnostní koncentrace oxidu siřičitého v suchých spalinách [% obj.]	0,01	0,01
CO_2	Oxid uhličitý [% obj.]	15,41	15,86
SO_2	Oxid siřičitý [% obj.]	0,01	0,00
H_2O	Voda [% obj.]	8,86	8,59
N_2	Dusík [% obj.]	73,67	73,28
O_2	Kyslík [% obj.]	10,78	10,73

Tabulka 13: Stechiometrická analýza původních vzorků biopaliv

Veškeré objemy a hmotnosti spalovacího vzduchu a spalin jsou udávány za tzv. normálních podmínek, tj. při teplotě $t = 0$ [°C] a tlaku $p = 101,325$ [kPa] a na referenční obsah kyslíku ve spalinách $O_r = 13$ %.

Výsledky stechiometrické analýzy vybraných vzorků biopaliv jsou v následujících tabulkách 13, 14, 15 a 16.

Stechiometrie spalovacích procesů		Lesní štěpka Topol brikety \varnothing 80 [mm]	Lesní štěpka Smrk brikety \varnothing 80 [mm]
Objemové spalování			
O_{min}	Teoretické množství kyslíku pro dokonalé spalování [$m^3_N \cdot kg^{-1}$]	0,93	0,91
L_{min}	Teoretické množství vzduchu pro dokonalé spalování [$m^3_N \cdot kg^{-1}$]	4,43	4,31
L_{skut}	Skutečné množství vzduchu pro dokonalé spalování [$m^3_N \cdot kg^{-1}$]	11,64	11,34
n	Součinitel přebytku vzduchu (-)	2,63	2,63
V^v_{sp}	Objemové množství vlhkých spalin [$m^3_N \cdot kg^{-1}$]	12,75	12,42
V^s_{sp}	Objemové množství suchých spalin [$m^3_N \cdot kg^{-1}$]	11,59	11,32
V^s_{spmin}	Teoretické objemové množství suchých spalin ($m^3_N \cdot kg^{-1}$)	4,33	4,25
V_{CO_2}	Objemové množství CO_2 [$m^3_N \cdot kg^{-1}$]	0,88	0,88
V_{SO_2}	Objemové množství SO_2 [$m^3_N \cdot kg^{-1}$]	0,00	0,00
V_{H_2O}	Objemové množství H_2O [$m^3_N \cdot kg^{-1}$]	1,16	1,09
V_{N_2}	Objemové množství N_2 [$m^3_N \cdot kg^{-1}$]	9,09	8,86
V_{O_2}	Objemové množství O_2 [$m^3_N \cdot kg^{-1}$]	1,52	1,48
Vyjádření jednotlivých složek spalin [% obj.]			
CO_{2max}	Teoretická objemová koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách [% obj.]	20,18	20,74
SO_{2max}	Teoretická objemová koncentrace oxidu siřičitého v suchých spalinách [% obj.]	0,00	0,00
CO_2	Oxid uhličitý [% obj.]	7,57	7,81
SO_2	Oxid siřičitý [% obj.]	0,00	0,00
H_2O	Voda [% obj.]	9,97	9,67
N_2	Dusík [% obj.]	78,43	78,22
O_2	Kyslík [% obj.]	13,07	13,04
n	Přibližný výpočet součinitele přebytku vzduchu z poměru CO_{2max} a CO_2 [-]	2,66	2,65

Tabulka 14: Stechiometrická analýza původních vzorků biopaliv

Stechiometrie spalovacích procesů		Lesní štěpka Kůra brikety Ø 80 [mm]	Kmenové dřevo Smrk polena l=250 [mm]
Q_n	Výhřevnost paliva podle ČSN 44 1352 [MJ·kg ⁻¹]	14,88	17,71
Q_v	Spalné teplo [MJ·kg ⁻¹]	16,18	18,97
Hmotnostní spalování			
O_{min}	Teoretické množství kyslíku pro dokonalé spalování [kg·kg ⁻¹]	1,17	1,28
L_{min}	Teoretické množství vzduchu pro dokonalé spalování [kg·kg ⁻¹]	5,04	5,50
L_{skut}	Skutečné množství vzduchu pro dokonalé spalování [kg·kg ⁻¹]	9,63	10,51
n	Součinitel přebytku vzduchu (-)	1,91	1,91
V_{sp}^v	Hmotnostní množství vlhkých spalin [kg·kg ⁻¹]	10,88	11,78
V_{sp}^s	Hmotnostní množství suchých spalin [kg·kg ⁻¹]	9,96	10,84
V_{spmin}^s	Teoretické hmotnostní množství suchých spalin [kg·kg ⁻¹]	7,41	7,88
V_{CO_2}	Hmotnostní množství CO ₂ [kg·kg ⁻¹]	1,61	1,72
V_{SO_2}	Hmotnostní množství SO ₂ [kg·kg ⁻¹]	0,00	0,00
V_{H_2O}	Hmotnostní množství H ₂ O [kg·kg ⁻¹]	0,92	0,94
V_{N_2}	Hmotnostní množství N ₂ [kg·kg ⁻¹]	7,27	7,94
V_{O_2}	Hmotnostní množství O ₂ [kg·kg ⁻¹]	1,06	1,16
Vyjádření jednotlivých složek spalin v % obj.			
CO_{2max}	Teoretická hmotnostní koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách [% obj.]	21,61	21,84
SO_{2max}	Teoretická hmotnostní koncentrace oxidu siřičitého v suchých spalinách [% obj.]	0,01	0,01
CO_2	Oxid uhličitý [% obj.]	16,13	15,92
SO_2	Oxid siřičitý [% obj.]	0,01	0,00
H_2O	Voda [% obj.]	9,23	8,69
N_2	Dusík [% obj.]	73,04	73,23
O_2	Kyslík [% obj.]	10,70	10,72

Tabulka 15: Stechiometrická analýza původních vzorků biopaliv

Stechiometrie spalovacích procesů		Lesní štěpka Kůra brikety Ø 80 [mm]	Kmenové dřevo Smrk polena l=250 [mm]
Objemové spalování			
O_{min}	Teoretické množství kyslíku pro dokonalé spalování [m ³ _N ·kg ⁻¹]	0,82	0,89
L_{min}	Teoretické množství vzduchu pro dokonalé spalování [m ³ _N ·kg ⁻¹]	3,89	4,24
L_{skut}	Skutečné množství vzduchu pro dokonalé spalování [m ³ _N ·kg ⁻¹]	10,22	11,15
n	Součinitel přebytku vzduchu (-)	2,63	2,63
V^v_{sp}	Objemové množství vlhkých spalin [m ³ _N ·kg ⁻¹]	11,28	12,22
V^s_{sp}	Objemové množství suchých spalin [m ³ _N ·kg ⁻¹]	10,21	11,13
V^s_{spmin}	Teoretické objemové množství suchých spalin (m ³ _N ·kg ⁻¹)	3,84	4,18
V_{CO2}	Objemové množství CO ₂ [m ³ _N ·kg ⁻¹]	0,81	0,87
V_{SO2}	Objemové množství SO ₂ [m ³ _N ·kg ⁻¹]	0,00	0,00
V_{H2O}	Objemové množství H ₂ O [m ³ _N ·kg ⁻¹]	1,07	1,09
V_{N2}	Objemové množství N ₂ [m ³ _N ·kg ⁻¹]	7,98	8,71
V_{O2}	Objemové množství O ₂ [m ³ _N ·kg ⁻¹]	1,33	1,45
Vyjádření jednotlivých složek spalin v % obj.			
CO_{2max}	Teoretická objemová koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách [% obj.]	21,07	20,80
SO_{2max}	Teoretická objemová koncentrace oxidu siřičitého v suchých spalinách [% obj.]	0,01	0,00
CO₂	Oxid uhličitý [% obj.]	7,96	7,84
SO₂	Oxid siřičitý [% obj.]	0,00	0,00
H₂O	Voda [% obj.]	10,46	9,79
N₂	Dusík [% obj.]	78,10	78,20
O₂	Kyslík [% obj.]	13,02	13,04
n	Přibližný výpočet součinitele přebytku vzduchu z poměru CO _{2max} a CO ₂	2,65	2,65

Tabulka 16: Stechiometrická analýza původních vzorků biopaliv

Z výsledků prvkových rozborů na vybraných vzorcích je nejvíce určující z hlediska emisních koncentrací množství kyslíku (O), uhlíku (C) a dusíku (N) v biopalivech. Ve vybraných vzorcích byla uskutečněna analýza množství těchto látek v původním palivu. U biopaliv je patrný vysoký nárůst emisí dusíku, neboť samotná dřevní biomasa vykazuje vyšší hodnoty dusíku již v palivu. Zejména zvýšený obsah těchto prvku omezuje využití těchto paliv. Vyšší hodnoty dusíku byly zaznamenány u briket z Topolového dřeva a u briket ze smrkového dřeva. [23]

Chlór přechází v průběhu spalování z velké části do plynné fáze. Vyšší koncentrace chlóru posuzovaných vzorků v původním stavu, kde hodnota přesahovala 0,04 [% hm.] v palivu, jsou u briketách z kůry jehličnanů. Průměrná koncentrace chlóru v dřevní biomase u posuzovaných vzorků se pohybuje kolem 0,02 [% hm.] v původním stavu. Význam chlóru spočívá na jedné straně v emisích HCl – jejich možného vlivu na tvorbu polychlorovaných dibenzo/dioxinů a furanů (PCDD/F) a také na druhé straně v korozivních účincích těchto elementů, případě jejich dalších sloučenin [23]

Síra v průběhu spalování odchází rovněž z větší části do plynné fáze jako SO₂ nebo SO₃. Emise síry u tepelných zařízení na využití pevných paliv z dřevní biomasy nepředstavují, co se týče limitních hodnot, zpravidla žádný problém, což potvrzují vybrané vzorky. Vyšší množství obsažené síry bylo akorát zaznamenáno u briket z kůry jehličnanů. Veškeré testované vzorky jsou převážně z čisté dřevní biomasy, a nejsou zde tedy patrné extrémní odchylky jednotlivých hodnot. [23]

Nejvíce ovlivňující parametr pro termické použití vybraných paliv je obsah vody a popele. Koncentrace veškeré vody obsažené ve vzorcích je dost nízká, což má pozitivní přínos ve vyšší výhřevnosti paliv. Obsah popele ve vzorcích je rovněž nízký, jak je patrné z prvkových rozborů vybraných vzorků. Největší množství popela je stanoveno u vzorků briket z topolového dřeva a kůry jehličnanů. Množství vody a popela významně ovlivňuje tepelné vlastnosti posuzovaných vzorků a následně ovlivňuje jak výběr, tak i nastavení spalovacího zařízení. Vlhkost paliva podstatně ovlivňuje průběh samotného spalování a objem spalin produkovaných na jednotku energie. Pokud by se vybrané vzorky, před jejich použitím, nechaly ještě dosušit, množství obsažené vody klesne a tím dojde k nárůstu množství prchavé hořlaviny, k dokonalejšímu spalování a k vyšší výhřevnosti a účinnosti zařízení. [23]

Z dalších sledovaných vlastností vzorků je podíl prchavé a neprchavé hořlaviny u dřevní biomasy. U testovaných vzorků dřevní biomasy je průměrný podíl prchavé hořlaviny 74,75 [% hm.] a neprchavé hořlaviny 14,08 [% hm.] v původním stavu. Výsledné hodnoty ze stechiometrické analýzy ukazují na velmi dobré tepelně-emisní parametry testovaných vzorků. Jak vyplývá ze stechiometrie sledovaných paliv, parametry výhřevnosti, obsah vody a hustoty energie ovlivňují výběr a návrh spalovacího zařízení. Koncentrace dusíku (N), síry (S) a chlóru (Cl) ve vzorcích, jak potvrzují prováděné rozborů vzorků, jsou s minimální diferencí. Kyslík je problematická součást paliva, jelikož váže vodík a částečně i uhlík na hydroxidy, vodu a oxidy, zejména dusíku (N – ve formě aminů a proteinů v palivu) a chlóru (Cl), spočívá v jejich interakci s konverzním zařízením, zvláště pak tepelným. Hodnoty stechiometrické analýzy slouží pro další nezbytné výpočty tepelných účinností a tepelných ztrát spalovacích zařízení, ale hlavně slouží ke kontrole a optimalizaci spalovacího zařízení. [23]

5.1.6.2 Tepelně-emisní měření vybraných vzorků biopaliv

Tepelně-emisní měření práce vychází z rozboru paliv. Výsledné hodnoty stechiometrické analýzy jsou dosazeny do rovnic přepočtu koncentrace znečišťujících látek a do rovnic pro určení součinitele přebytku vzduchu. V těchto vztazích se dosazuje ze stechiometrického rozboru především teoretická objemová koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách, teoretické objemové množství suchých spalin a teoretické množství vzduchu pro dokonalé spalování. [3]

Výsledné koncentrace spalin v jednotkách ppm z analyzátoru Madur GA-60 jsou převedeny na normální podmínky a přepočteny jednak na jednotky [$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$] a na referenční množství kyslíku ve spalinách n , které je pro použité zařízení podle dané vyhlášky a směrnice $O_r = 13 \%$.

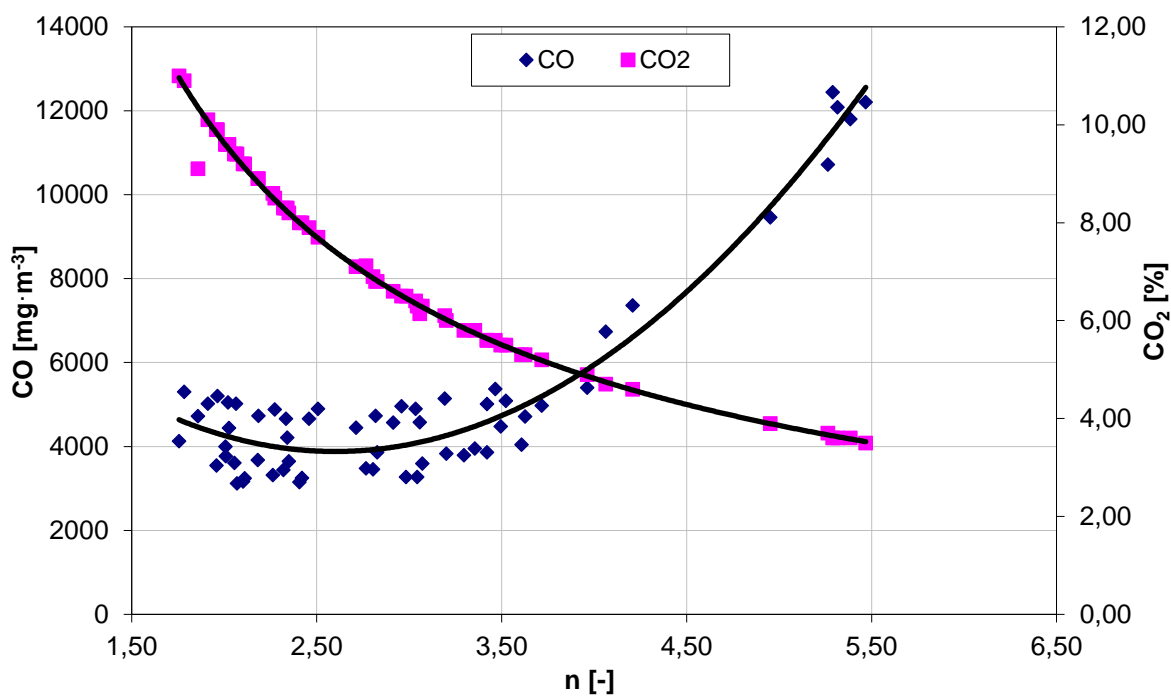
Pro další analýzu spalovacího procesu posuzovaných vzorků jsou stanoveny grafické závislosti oxidu uhelnatého (CO), oxidu uhličitého (CO₂), oxidů dusíku (NO_x) a teploty (t) spalin v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu, který nejvíce ovlivňuje jak chování spalovacího zařízení, tak i samotný průběh spalování.

Průměrné výsledné koncentrace měření topolových briket jsou uvedeny v tabulce 17.

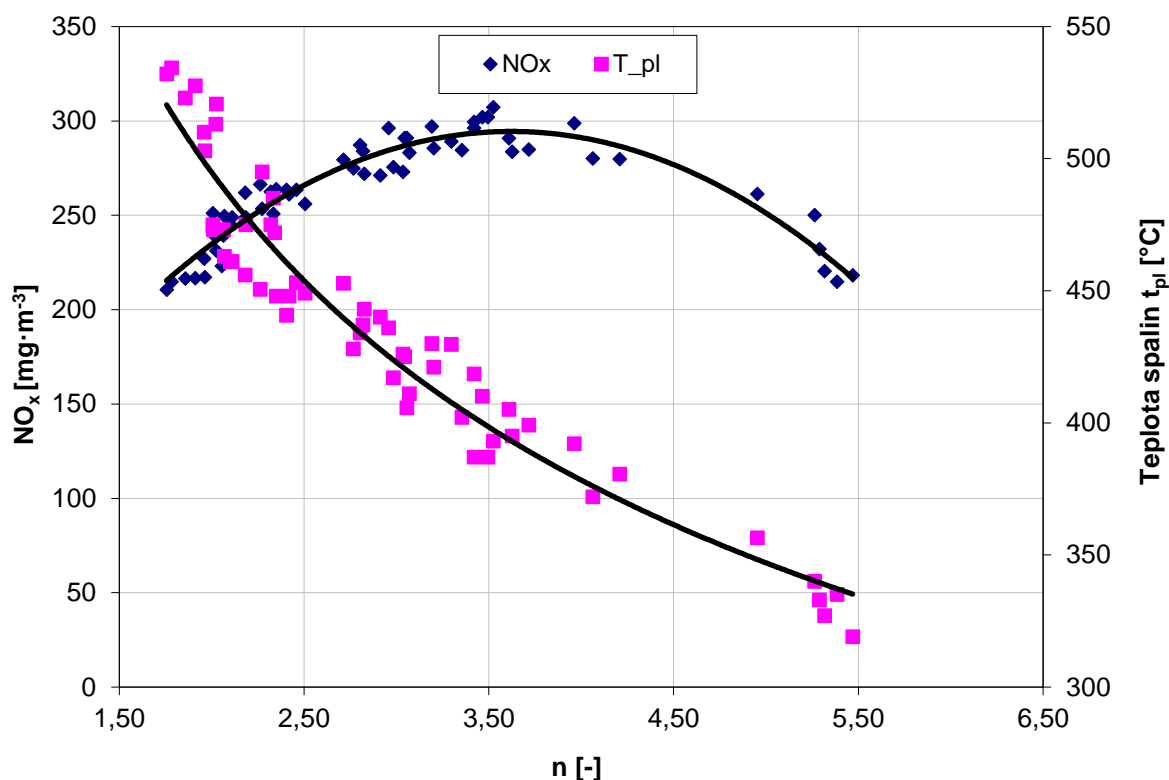
Lesní štěpka		Průměr	s ²	s	V
Topol brikety Ø 80 [mm]					
Teplota spalin	[°C]	448,88	443,69	21,06	0,05
O ₂	[%]	12,68	13,47	3,67	0,29
n z O ₂	[-]	2,64	3,02	1,74	0,66
CO ₂	[%]	7,65	7,26	2,7	0,35
n z CO ₂	[-]	2,9	3,32	1,82	0,63
CO	[ppm]	3574,84	3883,97	62,32	0,02
CO	[mg·m ⁻³]	4470,14	4856,69	69,69	0,02
CO (O _r =13%)	[mg·m ⁻³]	4116,73	5142,82	71,71	0,02
NO	[ppm]	134,03	127,61	11,3	0,08
NO	[mg·m ⁻³]	179,49	170,89	13,07	0,07
NO (O _r =13%)	[mg·m ⁻³]	176,25	179,04	13,38	0,08
SO ₂	[ppm]	0	---	---	---
NO ₂	[ppm]	0	---	---	---
HCl	[ppm]	134,03	127,61	11,3	0,08
HCl	[mg·m ⁻³]	222,59	211,92	14,56	0,07
HCl (O _r =13%)	[mg·m ⁻³]	218,58	222,04	14,9	0,07
NO _x	[ppm]	134,03	127,61	11,3	0,08
NO _x	[mg·m ⁻³]	275,18	262	16,19	0,06
NO _x (O _r =13%)	[mg·m ⁻³]	263,87	266,85	16,34	0,06

Tabulka 17: Průměrné koncentrace tepelně-emisního měření pro topolové brikety

Výsledný průběh tepelně-emisního měření pro topolové brikety původního vzorku v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu je uveden v grafu 1 a 2.



Graf 1: Výsledný průběh tepelně-emisního měření pro topolové brikety



Graf 2: Výsledný průběh tepelně-emisního měření pro topolové brikety

Pro další výpočty tepelných účinností a ztrát spalovacího zařízení je nutné matematicky vyjádřit jednotlivé složky spalín v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu. Pro toto vyjádření se použije statistická analýza vztahů mezi veličinami – regresní analýza. Tato analýza umožňuje řešit dva základní úkoly, zjistit formu závislosti a vyjádřit ji matematickou funkcí a určit stupeň přiblížení hodnot závislé proměnné, předpověděných regresních funkcí, skutečným hodnotám této proměnné pozorovaným ve výběrovém souboru. Jednotlivé regresní rovnice s hodnotou spolehlivosti pro topolové brikety jsou uvedeny níže.

$$CO = 1055,1 \cdot n^2 - 5488,8 \cdot n + 11020 ; R^2 = 0,922 \quad (42)$$

$$CO_2 = 19,221 \cdot n^{-0,998} ; R^2 = 0,9964 \quad (43)$$

$$NO_x = -22,714 \cdot n^2 + 164,47 \cdot n - 3,3104 ; R^2 = 0,9077 \quad (44)$$

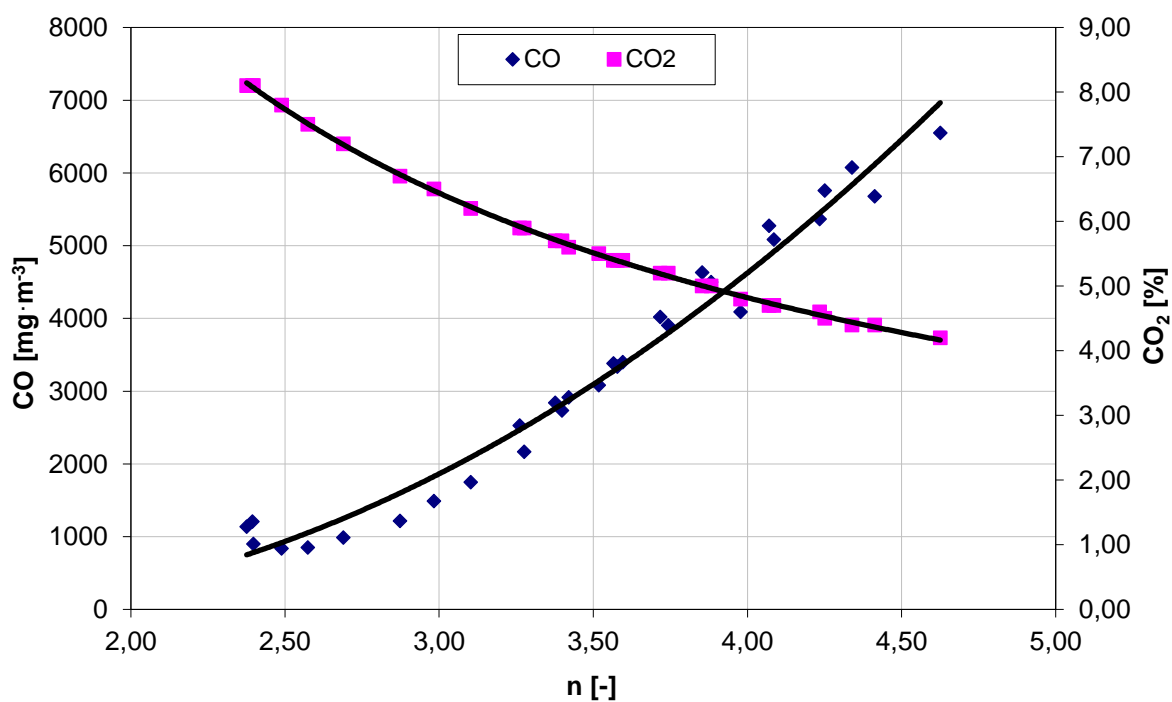
$$t_{pl} = 647,1 \cdot n^{-0,387} ; R^2 = 0,9349 \quad (45)$$

Průměrné výsledné koncentrace měření smrkových briket jsou uvedeny v tabulce 18.

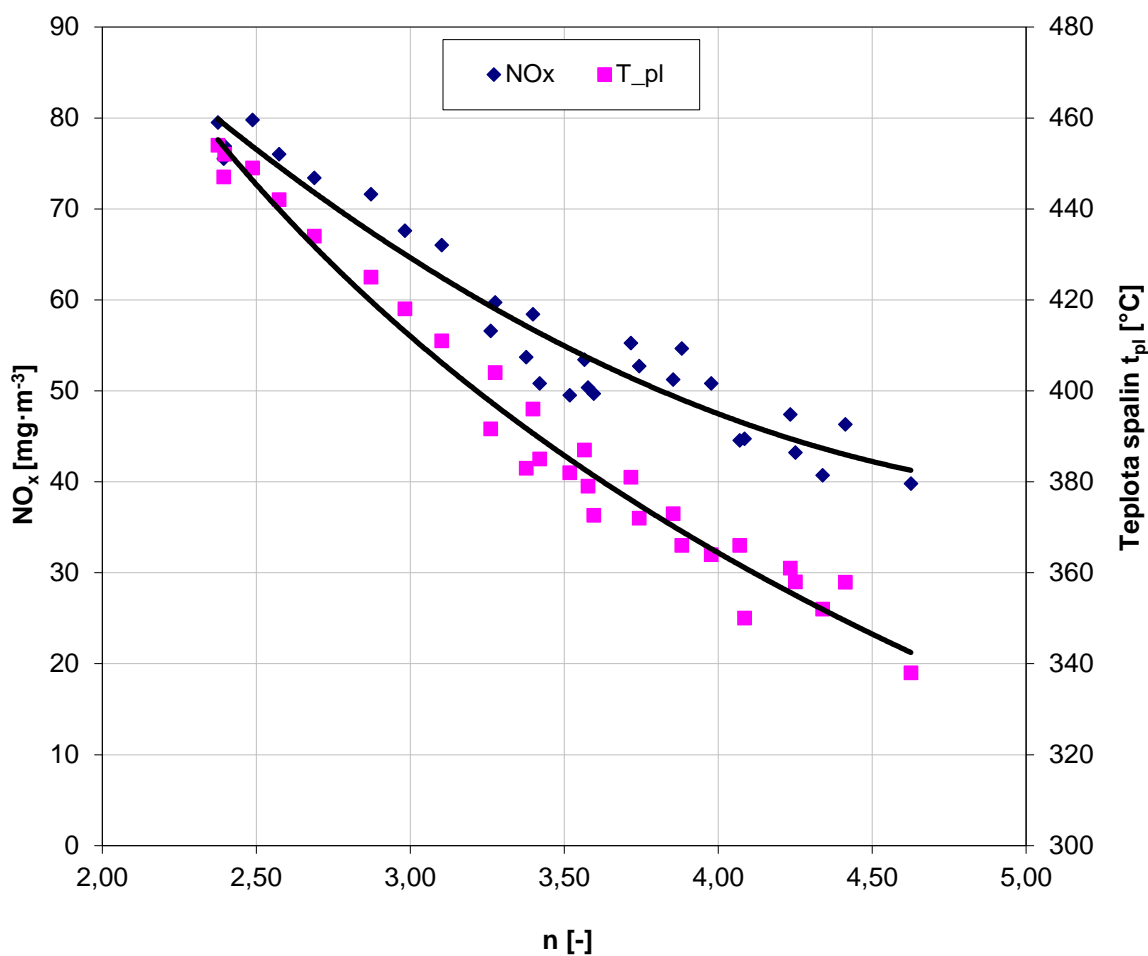
Lesní štěpka		Průměr	s ²	s	V
Smrk brikety Ø 80 [mm]					
Teplota spalín	[°C]	391,7	405,21	20,13	0,05
O ₂	[%]	14,71	15,22	3,9	0,27
n z O ₂	[-]	3,47	3,59	1,89	0,55
CO ₂	[%]	5,78	5,98	2,45	0,42
n z CO ₂	[-]	3,93	4,06	2,02	0,41
CO	[ppm]	1850,2	1914	43,75	0,02
CO	[mg·m ⁻³]	2313,58	2393,35	48,92	0,02
CO (O _r =13%)	[mg·m ⁻³]	3255,79	3368,06	58,04	0,02
NO	[ppm]	23,5	24,31	4,93	0,21
NO	[mg·m ⁻³]	31,47	32,56	5,71	0,18
NO (O _r =13%)	[mg·m ⁻³]	38,65	39,98	6,32	0,16
SO ₂	[ppm]	0	---	---	---
NO ₂	[ppm]	0	---	---	---
HCl	[ppm]	23,5	24,31	4,93	0,21
HCl	[mg·m ⁻³]	39,03	40,37	6,35	0,16
HCl (O _r =13%)	[mg·m ⁻³]	47,93	49,58	7,04	0,15
NO _x	[ppm]	23,5	24,31	4,93	0,21
NO _x	[mg·m ⁻³]	48,25	49,91	7,07	0,15
NO _x (O _r =13%)	[mg·m ⁻³]	57,33	59,31	7,7	0,13

Tabulka 18: Průměrné koncentrace tepelně-emisního měření pro smrkové brikety

Výsledný průběh tepelně-emisního měření pro smrkové brikety původního vzorku v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu je uveden v grafu 3 a 4.



Graf 3: Výsledný průběh tepelně-emisního měření pro smrkové brikety



Graf 4: Výsledný průběh tepelně-emisního měření pro smrkové brikety

Jednotlivé regresní rovnice s hodnotou spolehlivosti pro smrkové brikety jsou uvedeny níže.

$$CO = 602,54 \cdot n^2 - 1456,2 \cdot n + 809,42 ; R^2 = 0,9747 \quad (46)$$

$$CO_2 = 19,44 \cdot n^{-1,006} ; R^2 = 0,9992 \quad (47)$$

$$NO_x = 4,4447 \cdot n^2 - 48,268 \cdot n + 169,44 ; R^2 = 0,9379 \quad (48)$$

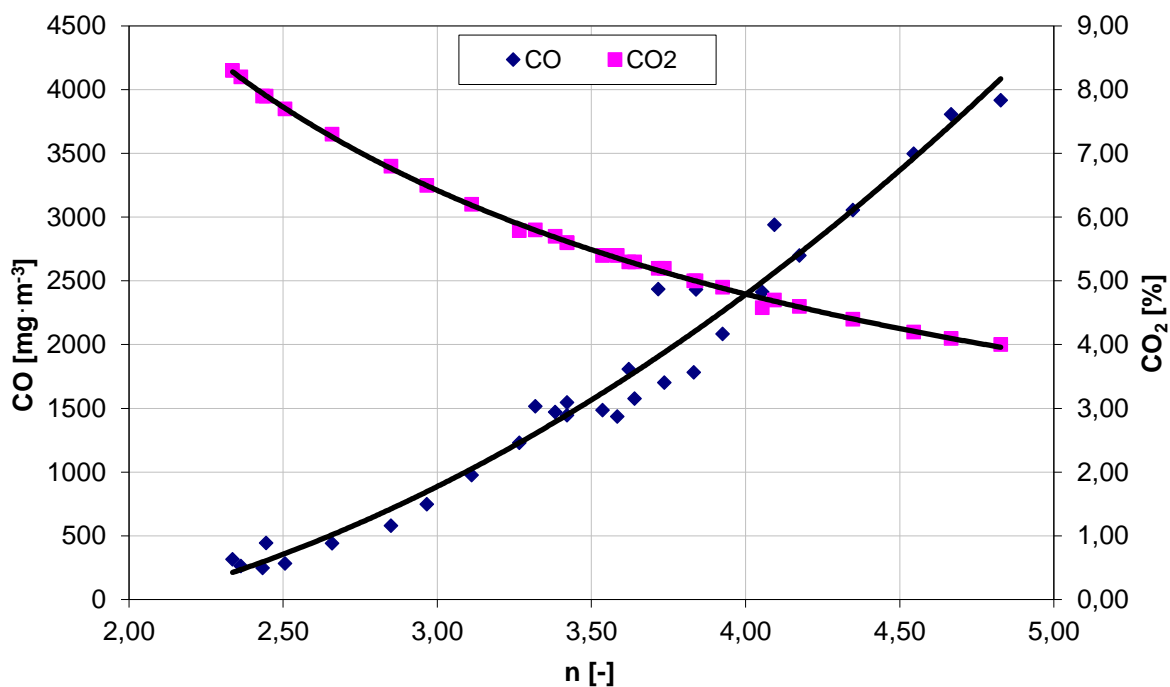
$$t_{pl} = 658,63 \cdot n^{-0,427} ; R^2 = 0,9742 \quad (49)$$

Průměrné výsledné koncentrace měření kůrových briket jsou uvedeny v tabulce 19.

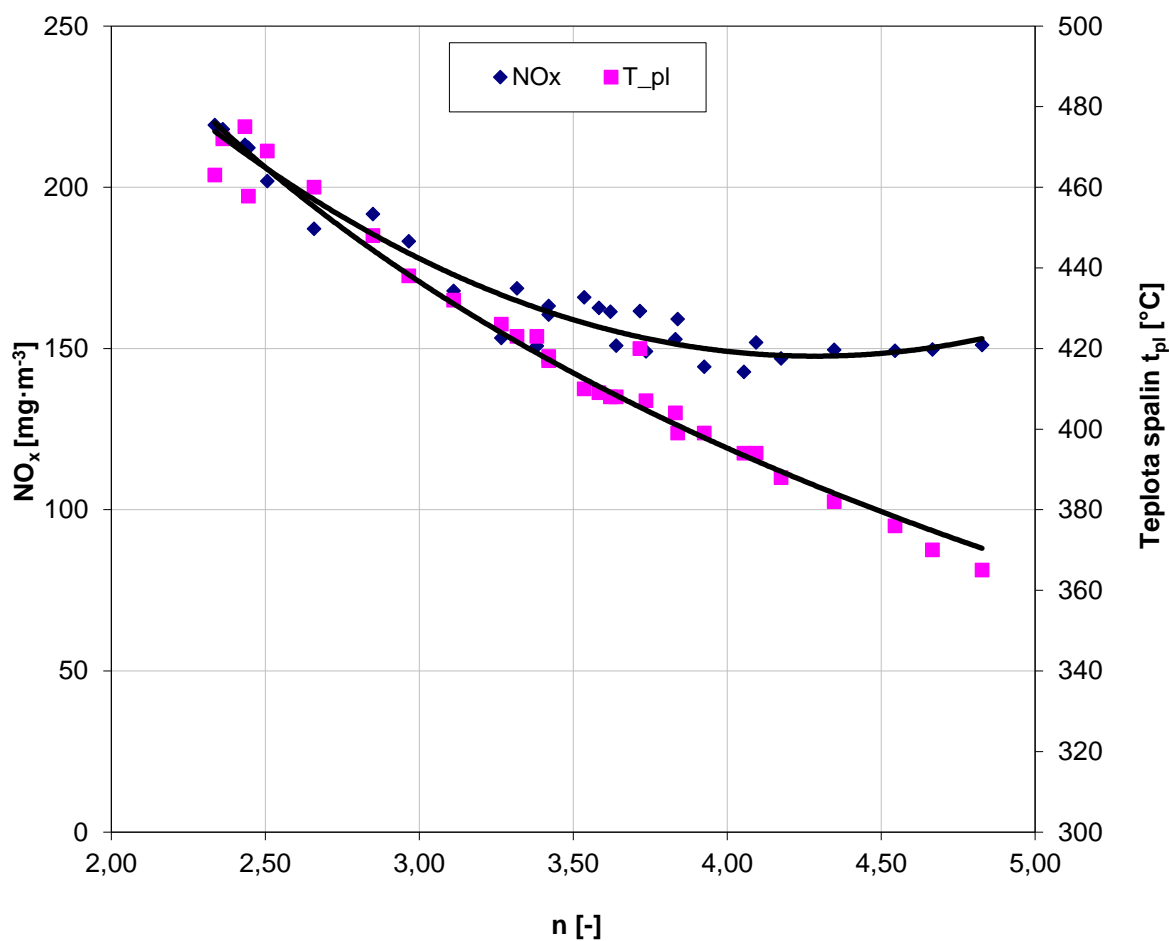
Lesní štěpka Kůra brikety Ø 80 [mm]		Průměr	s ²	s	V
Teplota spalin	[°C]	418,49	432,92	20,81	0,05
O ₂	[%]	14,72	15,23	3,9	0,27
n z O ₂	[-]	3,49	3,61	1,9	0,54
CO ₂	[%]	5,75	5,95	2,44	0,42
n z CO ₂	[-]	3,78	3,91	1,98	0,52
CO	[ppm]	928,93	960,97	31	0,03
CO	[mg·m ⁻³]	1161,58	1201,64	34,67	0,03
CO (O _r =13%)	[mg·m ⁻³]	1686,03	1744,18	41,76	0,02
NO	[ppm]	66,37	68,66	8,29	0,12
NO	[mg·m ⁻³]	88,87	91,94	9,59	0,11
NO (O _r =13%)	[mg·m ⁻³]	110,24	114,04	10,68	0,1
SO ₂	[ppm]	0	---	---	---
NO ₂	[ppm]	0	---	---	---
HCl	[ppm]	66,38	68,66	8,27	0,12
HCl	[mg·m ⁻³]	110,21	114,02	10,68	0,1
HCl (O _r =13%)	[mg·m ⁻³]	136,71	141,42	11,89	0,09
NO _x	[ppm]	66,37	68,66	8,29	0,12
NO _x	[mg·m ⁻³]	136,26	140,96	11,87	0,09
NO _x (O _r =13%)	[mg·m ⁻³]	167,99	173,78	13,18	0,08

Tabulka 19: Průměrné koncentrace tepelně-emisního měření pro kůrové brikety

Výsledný průběh tepelně-emisního měření pro kůrové brikety původního vzorku v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu je uveden v grafu 5 a 6.



Graf 5: Výsledný průběh tepelně-emisního měření pro kůrové brikety



Graf 6: Výsledný průběh tepelně-emisního měření pro kůrové brikety

Jednotlivé regresní rovnice s hodnotou spolehlivosti pro kůrové brikety jsou uvedeny níže.

$$CO = 294,79 \cdot n^2 - 557,34 \cdot n - 94,188; R^2 = 0,9692 \quad (50)$$

$$CO_2 = 19,608 \cdot n^{-1,016}; R^2 = 0,9985 \quad (51)$$

$$NO_x = 18,363 \cdot n^2 - 157,36 \cdot n + 484,75; R^2 = 0,9435 \quad (52)$$

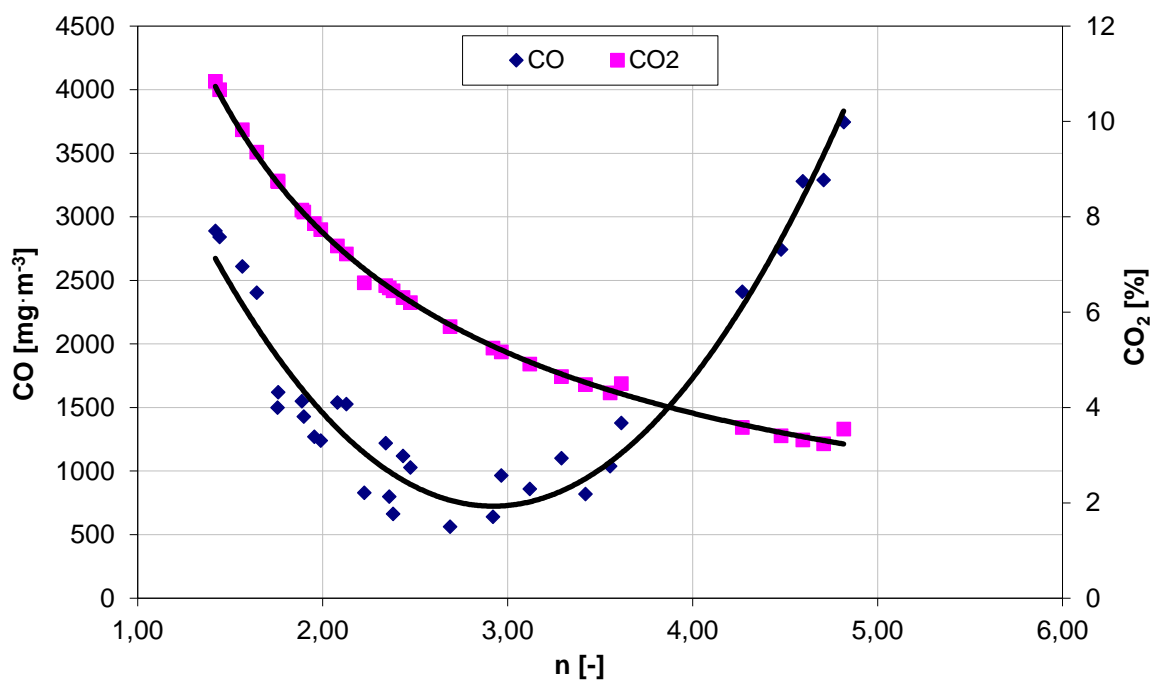
$$t_{pl} = 638 \cdot n^{-0,345}; R^2 = 0,9755 \quad (53)$$

Průměrné výsledné koncentrace měření smrkového palivového dřeva jsou uvedeny v tabulce 20.

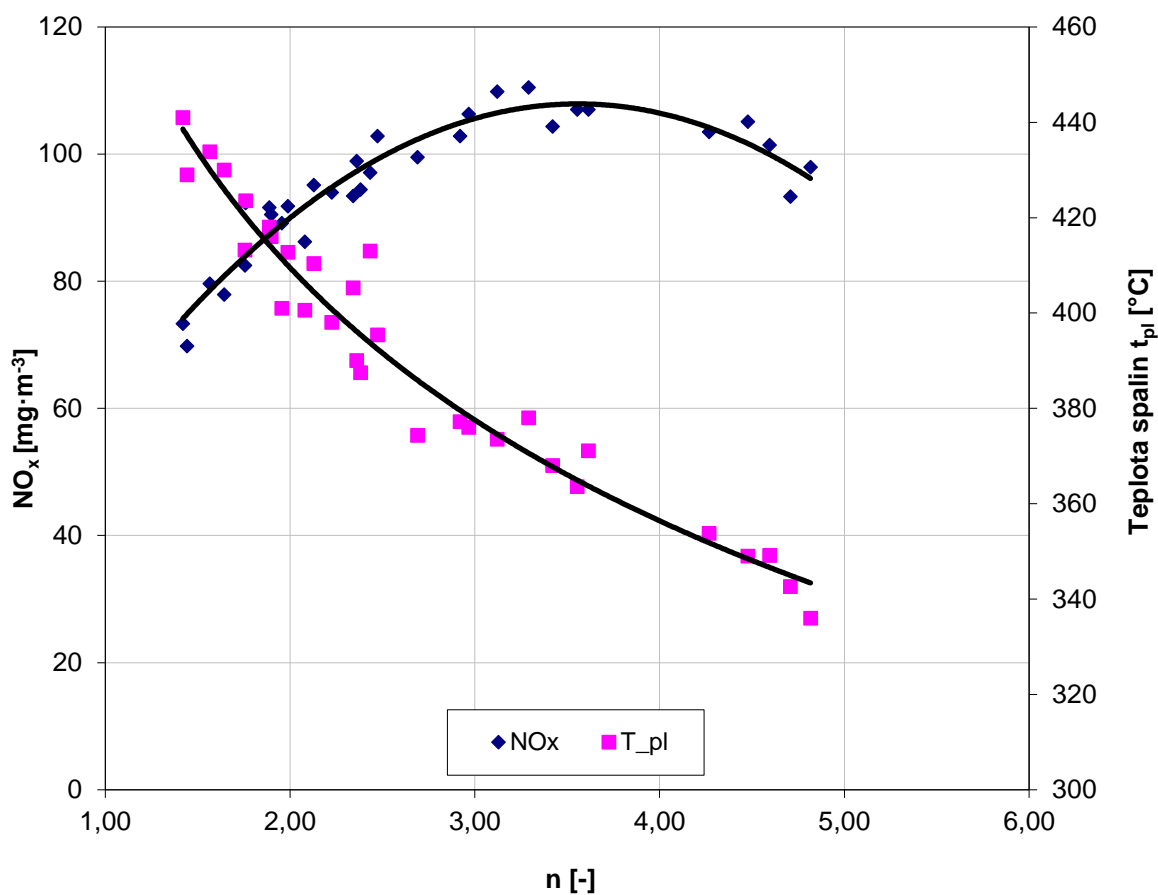
Kmenové dřevo		Průměr	s ²	s	V
Smrk polena l=250 [mm]					
Teplota spalin	[°C]	391,31	404,35	20,11	0,05
O ₂	[%]	12,22	12,63	3,55	0,29
n z O ₂	[-]	2,72	2,81	1,68	0,62
CO ₂	[%]	6,43	6,65	2,58	0,4
n z CO ₂	[-]	3,62	3,74	1,93	0,53
CO	[ppm]	1460,84	1509,53	38,85	0,27
CO	[mg·m ⁻³]	1826,7	1887,59	43,45	0,24
CO (O _r =13%)	[mg·m ⁻³]	1642,87	1697,63	41,2	0,25
NO	[ppm]	50,16	51,83	7,2	0,14
NO	[mg·m ⁻³]	67,17	69,41	8,33	0,12
NO (O _r =13%)	[mg·m ⁻³]	62,69	64,78	8,05	0,13
SO ₂	[ppm]	0	---	---	---
NO ₂	[ppm]	0	---	---	---
HCl	[ppm]	46,7	48,38	9,66	0,11
HCl	[mg·m ⁻³]	78,2	81,2	11,98	0,09
HCl (O _r =13%)	[mg·m ⁻³]	94,83	99,16	13,95	0,1
NO _x	[ppm]	50,26	51,93	7,21	0,14
NO _x	[mg·m ⁻³]	103,19	106,62	10,33	0,1
NO _x (O _r =13%)	[mg·m ⁻³]	95,12	98,29	9,91	0,1

Tabulka 20: Průměrné koncentrace tepelně-emisního měření pro smrkové palivové dřevo

Výsledný průběh tepelně-emisního měření pro kůrové brikety původního vzorku v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu je uveden v grafu 7 a 8.



Graf 7: Výsledný průběh tepelně-emisního měření pro smrkové palivové dřevo



Graf 8: Výsledný průběh tepelně-emisního měření pro smrkové palivové dřevo

Jednotlivé regresní rovnice s hodnotou spolehlivosti pro smrkové palivové dřevo jsou uvedeny níže.

$$CO = 864,69 \cdot n^2 - 5051,1 \cdot n + 8100,9; R^2 = 0,9406 \quad (54)$$

$$CO_2 = 15,146 \cdot n^{-0,982}; R^2 = 0,996 \quad (55)$$

$$NO_x = -7,389 \cdot n^2 + 52,576 \cdot n + 14,372; R^2 = 0,9078 \quad (56)$$

$$t_{pl} = 470,49 \cdot n^{-0,2}; R^2 = 0,9519 \quad (57)$$

5.2 Výsledky a diskuse

Grafické znázornění průběhu oxidu uhelnatého a oxidu uhličitého v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu je významné vzhledem k jejím průběhům. Především závislosti oxidu uhličitého, produkt dokonalého spalování, v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu je ve všech případech shodný. S rostoucím množstvím vzduchu dochází k poklesu koncentrace oxidu uhličitého z maximální koncentrace až do minimální, kde následně dochází k ochlazení plamene a naředění spalin spalovacím vzduchem.

Oxid uhelnatý, produkt nedokonalého spalování, nejdříve v oblasti velmi nízkého součinitele přebytku vzduchu klesá až do optimálních hodnot. Po překročení těchto optimálních hodnot součinitele přebytku vzduchu dochází k postupnému nárůstu oxidu uhelnatého až do maximální koncentrace. Tento průběh lze sledovat u všech paliv. Pouze u palivového dřeva je průběh odlišný. Důvod, proč nastal jiný průběh spalování u tohoto vzorku, lze hledat ve více faktorech, jako je např. vlhkost, výhřevnost, podíl prchavé hořlaviny ve vzorku, množství spalovacího vzduchu přiváděného do spalovacího prostoru a rychlost hoření.

V oblastech nízkého součinitele přebytku vzduchu ($n < 2,5$) dochází k nedokonalému prohoření hořlaviny, jsou stanoveny vysoké koncentrace oxidu uhelnatého. Naopak při vyšším součiniteli přebytku vzduchu ($n > 3$) emisní koncentrace oxidu uhelnatého rostou. Tyto průběhy jsou zaznamenány u všech použitých vzorků. U smrkových briket byl stanoven vysoký součinitel přebytku vzduchu a v těchto oblastech se dostal až na hodnotu $6500 \text{ [mg}\cdot\text{m}^{-3}]$ oxidu uhelnatého ve spalinách, na rozdíl od ostatních testovaných paliv. U topolových briket se hodnoty oxidu uhelnatého dostaly až na $13\,000 \text{ [mg}\cdot\text{m}^{-3}]$ ve spalinách při nízkém součiniteli přebytku vzduchu. To může být zapříčiněno rychlým průběhem hoření z hlediska vyšších hodnot teploty spalin.

Většina vzorků paliv mají optimální koncentraci oxidů dusíku do maximální hodnoty $250 \text{ [mg}\cdot\text{m}^{-3}]$, pouze u topolových briket se při nízké hodnotě součinitele přebytku vzduchu dosahovalo hodnot $330 \text{ [mg}\cdot\text{m}^{-3}]$. V samotném topeništi spalovacích zařízení u sledovaných vzorků dochází k velmi dobrému promísení prchavých hořlavých látek se spalovacím vzduchem a prohoření na litinovém roštu. Následně nedochází k unášení nespálených hořlavých látek, které zůstanou na roštu. Nejvyšších hodnot teploty spalin ($> 450 \text{ [}^\circ\text{C}]$) bylo

dosahováno při spalování topolových briket a briket z kůry jehličnanů. To může být zapříčiněno různými faktory jako výhřevnost, podíl prchavé hořlaviny ve vzorku a množství spalovacího vzduchu přiváděného do spalovacího prostoru. Ale také to může být zapříčiněno nadměrným tahem, který je u nových komínových těles celkem běžný. Proto dnes výrobci doporučují instalaci komínové redukční klapky do kouřovodu. Také řízením optimálního množství vzduchu (regulací sekundárního vzduchu) u spalovacího zařízení lze u každého vybraného vzorku spalovaného biopaliva zabránit jednotlivým tepelným ztrátám a tím zvýšit účinnost spalovacího zařízení.

Vybrané spalovací zařízení splňuje ve většině případů testovaných vzorků požadované emisní limity spojené s podmínkou provozu.

Celkový průběh měření a analýzy vybraných vzorků byly porovnány s měřením v použité literatuře Malat'ák, Vaculík – Biomasa pro výrobu energie, kde se výsledné hodnoty shodovaly. [23]

5.3 Ekonomické zhodnocení použití spalovacího zařízení jako doplňkový zdroj tepla v domácnosti

Jak již bylo řečeno, spousta domácností je vybavena různými typy spalovacích zařízení na tuhá biopaliva. V této části práce je provedeno ekonomické zhodnocení a možnosti finanční úspory při použití malého spalovacího zařízení na palivové dřevo a dřevěné brikety v domácnosti.

Při výběru vhodného zdroje tepla na vytápění je potřeba si uvědomit, do jakého objektu je zařízení pořizováno. Základním rozdělením jsou objekty na trvalé bydlení a rekreační objekty. Dále se dělí dle materiálu konstrukce (kámen, cihla, tvárnice, dřevostavba apod.) a stupněm izolovanosti objektu. Nejdůležitějším parametrem pro rozhodování ve výběru zařízení je nominální výkon. Je potřeba brát v úvahu, jak velké jsou místnosti, kde bude zařízení umístěno v závislosti na celkových energetických ztrátách objektu. Vyhneme se tím nežádoucím situacím, jako je poddimenzování nebo předdimenzování výkonu zařízení a budeme mít v místnostech optimální množství tepla a zařízení bude pracovat v optimálních podmínkách. Dále je nutné přihlédnout na to, jakou máme dostupnost ke zmiňovanému palivu.

Náklady jsou porovnány u dvoupodlažního objektu v regionu Praha s obytnou plochou 130 [m²], což by se dalo považovat za běžný rodinný dům pro čtyřčlennou rodinu s dětmi. Objekt je trvale obýván a doposud vytápěn pomocí elektrického kotle. V objektu se bude topit v průměru 6 hodin denně, 275 dní v roce. Celkové energetické ztráty objektu jsou stanoveny na hodnotu 20 [kW]. Objekt tedy není zcela zateplen jeho energetická náročnost (E_{nr}) je podle vztahu:

$$E_{nr} = \frac{20 \cdot 365}{130} = 56,15 \quad [kW \cdot (m^2 \cdot rok)^{-1}] \quad (58)$$

Roční spotřeba (S_r) energie je vypočtena následujícím způsobem:

$$S_r = 20 \cdot 6 \cdot 275 = 33\,000 \quad [kWh \cdot rok^{-1}] \quad (59)$$

Elektrická energie je do objektu dodávána tuzemským distributorem, společností Bohemia energy a. s., kde průměrná cena jednotky, za dodávku v sazbě D02d, s jističem nad 3 x 20 [A] do 3 x 25 [A] vč., vychází na 3,84 [(Kč vč. DPH) · kWh⁻¹]. Celkové roční náklady (N_r) na vytápění objektu vychází dle následujícího vztahu na:

$$N_r = 33\,000 \cdot 3,84 = 126\,720, - \quad [Kč \text{ vč. DPH}] \quad (60)$$

Jako doplněk ke stávajícímu kotli, byla vybrána teplovzdušná krbová kamna dvouplášťové konstrukce, s roštovým spalováním a keramickým obkladem LaNordica-Nicoletta. Tento model kamen má dle výrobce jmenovitý výkon 8,0 [kW] při spotřebě paliva 2,3 [kg·h⁻¹] a vysoká účinnost 80,9 [%]. Obvyklá pořizovací cena těchto kamen je 44 369,- [Kč vč. DPH]. Kamna jsou znázorněna na obrázku 15. Technické parametry jsou uvedeny v tabulce 21. [6]



Obrázek 15: Krbová kamna LaNordica-Nicoletta 8,0 [kW] [7]

Parametr a jednotky	Hodnota parametru
Výkon do vzduchu [kW]:	8,0
Spotřeba paliva [kg·h ⁻¹]:	2,3
Velikost kouřovodu [mm]:	130
Vývod kouřovodu:	horní
Účinnost [%]:	80,9
Hmotnost [kg]:	168
Výhřevnost prostoru při zateplení 35 W·m ⁻³ [m ³]:	229
Velikost externího vzduchu [mm]:	bez přímého napojení
Výška [mm]:	980
Šířka [mm]:	587
Hloubka [mm]:	572
Typ spalování:	zplyňování
Obklad:	kachel
Konstrukce spalovacího prostoru:	litina
Typ roštu:	otočný
Popelník:	odnímatelný
Velikost polen [mm]:	300
Rozměr vstupního otvoru do spalovacího prostoru [mm]:	355x245
Rozměry spalovacího prostoru [mm]:	374x360x350
Přenos tepla:	konvekce
Doporučený tah komínu [Pa]:	12
Hmotnostní průtok spalin [g·s ⁻¹]:	6,7
Výstupní teplota spalin [°C]:	283

Tabulka 21: Technické parametry krbových kamen Nicoletta udávané výrobcem [33]

Cena těchto kamen je poměrně vysoká, proto je provedeno ekonomické zhodnocení návratnosti pořizovací ceny díky finanční úspoře při použití jako doplněk ke stávajícímu kotli.

Jako palivo do těchto kamen, byly z ekologického hlediska vybrány brikety ze smrkové štěpky, s výhřevností 17,7 [MJ·kg⁻¹] a palivové smrkové dřevo, s výhřevností 17,7 [MJ·kg⁻¹], ze zkoumaných vzorků. Po převedení na požadované jednotky je výhřevnost obou paliv 4,92 [kWh] na 1 [kg] paliva. Následně získáme potřebné množství (m) hmotnosti paliva pro získání 1 [kWh].

$$17,7 \text{ [MJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \approx 4,92 \quad [\text{kWh}] \quad (61)$$

$$m = \frac{1}{4,92} = 0,203 \quad [\text{kg}] \quad (62)$$

Cena dřevěných briket ze smrkového dřeva byla získána od tuzemského výrobce, firmy EKOPALIVO BOHEMIA s.r.o. Nabízená cena je 5 000,- [Kč. Vč. DPH] za jednu

tunu. [34] Cena za palivové smrkové dřevo byla získána od tuzemského výrobce, firmy HAPE WOOD, s.r.o. Cena palivového dřeva je dnes nabízena za jednotku [prm] (prostorový metr rovnáný) nebo [prms] (prostorový metr sypaný). Nabízená cena za smrkové dřevo je 860,- [Kč vč. DPH] za 1 [prms]. [35] Toto množství u tohoto druhu dřeva odpovídá hmotnosti cca 450 [kg]. Ceny za jednotku [kWh] vycházejí u jednotlivých paliv následovně:

Smrkové brikety:

$$C_b = \frac{5000}{1000} \cdot 0,203 = 1,015 \quad [\text{Kč vč. DPH}] \quad (63)$$

Palivové smrkové dřevo:

$$C_p = \frac{860}{450} \cdot 0,203 = 0,387 \quad [\text{Kč vč. DPH}] \quad (64)$$

Náklady na provoz vybraného spalovacího zařízení jsou uvedeny v tabulce 22. V tabulce jsou také vypracovány finanční úspory v závislosti na četnosti jeho využívání a spotřeba paliva.

Palivo	Cena za 1 [kWh]	Počet dnů topení v roce	Náklady na provoz [Kč vč. DPH]	Spotřeba paliva [kg]	Úspora oproti el. energii [Kč vč. DPH]
Smrkové brikety	1,015	25	3 045,-	636	8 475,-
		50	6 090,-	1 271	16 950,-
		100	12 180,-	2 542	33 900,-
		150	18 270,-	3 814	50 850,-
		200	24 360,-	5 085	67 800,-
Smrkové palivové dřevo	0,387	25	1 161,-	636	10 359,-
		50	2 322,-	1 271	20 718,-
		100	4 644,-	2 542	41 436,-
		150	6 966,-	3 814	62 154,-
		200	9 288,-	5 085	82 872,-

Tabulka 22: Ekonomické zhodnocení pořízení spalovacího zařízení, jako doplňkový zdroj topení

Z výsledků je patrné, že pořízení spalovacího zařízení, jako doplňkový zdroj tepla, je z ekonomického hlediska velice výhodné. Větší úspora je prokazatelná při použití smrkového palivového dřeva. Avšak v tomto případě je nutné přihlížet na skutečnost, že u palivového dřeva není zaručena optimální vlhkost při jeho pořízení. Proto je ve většině případů nutné palivové dřevo uskladnit pod střechou na větraném místě a dosušit. Fáze pro dosažení optimální vlhkosti paliva může trvat několik měsíců, ale také rok nebo dva.

S briketami se pojí vyšší pořizovací cena, ale podstatně větší komfort v možnosti okamžitého použití jako paliva s optimálními parametry, co se vlhkosti týče. U briket je také výhodou lepší manipulace a skladování díky jejich kompaktnímu balení, které bývá v igelitových obalech po 10 [kg]. Výrobce sledovaných briket dokonce uvádí jejich vyšší výhřevnost, což má za následek ještě větší úsporu.

V tabulce jsou uvedeny úspory v závislosti na četnosti topení v průběhu roku. Především z toho důvodu, že topení ve spalovacím zařízení na dřevní biomasu sebou nese i větší náročnost co se týče obsluhy a čištění (příprava a pořízení paliva, odstraňování popela, čištění skla, čištění spalinových cest apod.). Z výsledné tabulky je však prokazatelné, že při nahrazení stávajícího kotle spalovacím zařízením z poloviny doby topení, je návratnost pořizovací ceny kamen za pouhý jeden rok. Při topení elektrickým kotlem je pro uživatele vyšší komfort v nenáročnosti údržby při provozu tohoto zdroje. V tomto případě je potřeba pouze hlídat tlak v soustavě ústředního topení a případně jednou za čas dopustit teplotosné médium.

U použitého spalovacího zařízení je stále výhoda v energetické nezávislosti na dodávce elektrické energie, oproti elektrickému kotli. Zařízení je schopné provozu za jakýchkoliv okolností a podmínek. Spalovací zařízení tohoto typu navíc může přinést do domácnosti jiný pocit tepla, atmosféru rodinného krbu a zároveň estetický doplněk.

6. Závěr

V dnešní době narůstá zájem o topení v malých spalovacích zařízeních a podmínky pro provoz těchto zařízení se neustále zpřísnují, především z hlediska udržení kvality životního prostředí. Touto problematikou je potřeba se zabývat také z energetického hlediska. Další zpřísnující opatření tepelně-emisních vlastností, pro spalovacích zařízení napojené na systém ústředního vytápění uvedené na trh, vstoupí v platnost od 1. ledna 2018.

Je potřeba si uvědomit, že ne všechna dostupná spalovací zařízení na trhu jsou kvalitní. Je nutné sledovat výrobní a emisní štítky jednotlivých spalovacích zařízení. Ovšem veškeré štítky mohou vypovídat o splnění emisních limitů a dosažení uvedených účinností, avšak v závislosti na kvalitě paliva. Vysoká kvalita paliva je zvláště důležitým parametrem při použití pro současná malá spalovací zařízení. Z výsledků tepelně-emisních měření a analýz bylo také zjištěno, že je potřeba dbát na prvkové složení použitého paliva, které může ovlivnit nejen výstupní emisní hodnoty a výhřevnost, ale i účinnost spalovacího zařízení a celkový průběh spalování. Nejdůležitějšími parametry z prvkového rozboru sledovaných vzorků paliv je obsah vody, kyslíku (O), uhlíku (C) a dusíku (N), které mají největší podíl na průběhu spalování. Z tepelně-emisních měření byly nejdůležitějšími sledovanými parametry hodnoty oxidu uhelnatého (CO), oxidu uhličitého (CO₂), oxidy dusíku (NO_x) a teploty výstupních spalin (t), které splňovaly ve většině případů limitní hodnoty pro použité spalovací zařízení.

Z ekonomického hlediska je použití spalovacího zařízení, jako doplněk ke stávajícímu topení, velice výhodné. Největší výhodou je energetická nezávislost spalovacích zařízení bez napojení na systém ústředního topení.

7. Seznam použitých zdrojů

- [1] PETŘÍKOVÁ, Vlasta. *Biomasa: pro pohonné hmoty nebo k vytápění*. In: *Biom.cz* [online]. 2008 [cit. 2017-03-04]. Dostupné z: <http://biom.cz/czt/odborne-clanky/biomasa-pro-pohonne-hmoty-nebo-k-vytapeni>
- [2] ŠČERBA, Eduard. *The energy sector, energy policy and potential of biomass in the Czech Republic*. Faculty of electrical engineering, Department of electrical power engineering and ecology, Czech Republic: University of west Bohemia Pilsen, 2008 [online]. [cit. 2017-03-04]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~tesarova/IP/Proceedings/Proc_2008/Files/11221%20Scerba.pdf
- [3] MALAŤÁK, Jan, Petr JEVÍČ a Petr VACULÍK. *Účinné využití tuhých biopaliv v malých spalovacích zařízeních s ohledem na snižování emisí znečišťujících látek: vědecká monografie*. Praha: Powerprint, 2010. ISBN 978-80-87415-02-3.
- [4] BUFKA, Aleš. *Malá spalovací zařízení na pevná paliva pro domácnosti*. In: *TZB-info* [online]. 2011 [cit. 2017-03-04]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/8127-mala-spalovaci-zarizeni-na-pevna-paliva-pro-domacnosti>
- [5] PASTOREK, Zdeněk, Jaroslav KÁRA a Petr JEVÍČ. *Biomasa: obnovitelný zdroj energie*. Praha: FCC Public, 2004. ISBN 80-865-3406-5.
- [6] Pracovní materiály firmy TOP-EL, spol. s r. o.
- [7] LaNordica-Extraflame: *Prodotti a legna* [online]. In: . [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <https://www.lanordica-extraflame.com/it/prodotti>
- [8] Tulikivi: HIISI 1. In: *Tulikivi* [online]. [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: https://www.tulikivi.cz/hiisi-1_16
- [9] Palazzetti: Sunny fire. In: *Palazzetti* [online]. [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: http://www.palazzettigroup.com/it/caminetti_e_stufe/focolari
- [10] BH Kamnářství: Realizace. In: *Kachlové sporáky* [online]. [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://www.bhkamna.cz/realizace/kachlove-sporaky>
- [11] CANKAŘ A SYN, Jaroslav. Kotle, kamna, krby: Automatické kotle na pelety ATMOS představují moderní vytápění. In: *TZB-info* [online]. [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/8275-automaticke-kotle-na-pelety-atmos-predstavuji-moderni-vytapeni>
- [12] STUPAVSKÝ, Vladimír. Kotel na dřevní štěpku. In: *BIOM.cz* [online]. [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/kotel-na-drevni-stepku>
- [13] Kotle, kamna, krby: Jaké parametry musí splnit kotle na tuhá paliva? Legislativa v ČR a Evropě. In: *TZB-info* [online]. 2013 [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/9665-jake-parametry-musi-splnit-kotle-na-tuha-paliva-legislativa-v-cr-a-evrope>

- [14] Sbírka zákonů č. 201/2012 Sb. Zákon o ochraně ovzduší vydaný dne 2. května 2012. In: *201/2012 Sb.* 2012. Česká republika
- [15] ČSN EN 303-5:2013. 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. vyd. 2013
- [16] HOPAN, František a kol. Kotle, kamna, krby: Bilancování emisí znečišťujících látek z vytápění českých domácností tuhými palivy. In: *TZB-info* [online]. 2013 [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: http://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/15419-bilancovani-emisi-znecestujicich-latek-z-vytapeni-ceskych-domacnosti-tuhymi-palivy?utm_source=newsletter&utm_medium=email&utm_campaign=Newsletter_2017-02-27
- [17] ČSN EN 13229:2002. Vestavné spotřebiče k vytápění a krbové vložky na pevná paliva – Požadavky a zkušební metody. vyd. 2002
- [18] ČSN EN 13240:2002. Spotřebiče na pevná paliva k vytápění obytných prostorů – Požadavky a zkušební metody. vyd. 2002
- [19] ČSN EN 15250:2007. Akumulační kamna na pevná paliva – Požadavky a zkušební metody. vyd. 2007
- [20] ČSN EN 12815:2002. Varné spotřebiče pro domácnost na pevná paliva – Požadavky a zkušební metody. vyd. 2002
- [21] ČSN EN 14785:2007. Spotřebiče spalující dřevěné pelety k vytápění obytných prostorů – Požadavky a zkušební metody. vyd. 2007
- [22] ČSN EN ISO 17225:2015. *Tuhá biopaliva: Specifikace a třídy paliv.* vyd. 2015.
- [23] MALAŤÁK, Jan a Petr VACULÍK. *Biomasa pro výrobu energie.* Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008. ISBN 978-80-213-1810-6.
- [24] STUPAVSKÝ, Vladimír. Obnovitelná energie a úspory energie: Přísnější certifikace dřevních pelet – ENplus 3.0. In: *TZB-info* [online]. 2015 [cit. 2017-03-13]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/peletky/13313-prisnejsi-certifikace-drevnich-pelet-enplus-3-0>
- [25] STUPAVSKÝ, Vladimír. : Dřevní štěpka - zelená, hnědá, bílá. In: *BIOM.cz* [online]. 2010 [cit. 2017-03-14]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/drevni-stepka-zelena-hneda-bila>
- [26] LYČKA, Zdeněk. *Dřevní peleta II: spalování v malých zdrojích tepla.* Krnov: LING Vydavatelství, 2011. ISBN 978-80-904914-1-0.
- [27] SLADKÝ, Václav, David ANDERT a Josef DVOŘÁK. *Obnovitelné zdroje energie - fytopaliva: spalování v malých zdrojích tepla.* Praha: Výzkumný ústav zemědělské techniky, 2002. ISBN 80-238-9952-X.

- [28] JEVIČ, Petr, David ANDERT a Josef DVORŽÁK. *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.
- [29] OCHODEK, Tadeáš, Jan KOLONIČNÝ a Pavel JANÁSEK. *Potenciál biomasy, druhy, bilance a vlastnosti paliv z biomasy: studie v rámci projektu Možnosti lokálního vytápění a výroby elektřiny z biomasy*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2006. ISBN 80-248-1207-X.
- [30] WEGER, Jan, Jan KAMILA HAVLÍČKOVÁ A KOLEKTIV a Pavel JANÁSEK. *Biomasa: obnovitelný zdroj energie v krajině*. Průhonice: Výzkumný ústav Silva Taroucy pro krajinu a okrasné zahradnictví, 2003. ISBN 80-851-1632-4.
- [31] Manuál analyzátoru spalín Madur electronics – Flue gas analyzer GA-60. Dostupné z: <http://madur.com/index.php?page=/products/port/ga-60>
- [32] *Madur electronics: Flue gas analyzer GA-60* [online]. In: . [cit. 2017-03-16]. Dostupné z: <http://madur.com/index.php?page=/products/port/ga-60>
- [33] Manuál krbových kamen LaNordica – MAX. Dostupné z: <https://www.lanordica-extraflame.com/it/prodotti>
- [34] EKOPALIVO: Válcové ekobrikety z měkkého dřeva - Standard. *EKOPALIVO* [online]. [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <http://www.ekopalivo.cz/produkty/detail/31/valcove-ekobrikety-z-mekkeho-dreva-standard>
- [35] Palivové dřevo Petr Kos: Palivové dřevo prodej. *Palivové dřevo Petr Kos* [online]. [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <http://www.palivove-drevo-kos.cz/cenik-palivove-drevo.php>

8. Seznam použitých obrázků

Obrázek 1: Řez topeništěm teplovzdušné krbové vložky na dřevo s popisem [6]	8
Obrázek 2: Ekologické roztápění od shora [6]	9
Obrázek 3: Příklady spalovacích zařízení – a) klasická kamna; b) jednoplášťová sálavá; c) dvouplášťová konvekční; d) akumulční kamna mastková s hmotností 1000 kg [7 a 8]	11
Obrázek 4: Příklady krbových vložek – a) jednoplášťová sálavá; b) dvouplášťová konvekční s ventilátory a možností rozvodu teplého vzduchu; c) jednoplášťová s třístranným prosklením; d) dvouplášťová s rohovým prosklením [7 a 9]	12
Obrázek 5: Příklady provedení sporáků – a) litinový sálavý; b) nerezový teplovzdušný s možností vestavby do kuchyňské linky; c) kachlový sporák stavěný (kachlová pec) [7 a 10]	12
Obrázek 6: Schéma zapojení teplovodních spalovacích zařízení a konstrukce teplovodního výměníku v řezu [6]	13
Obrázek 7: Příklady spalovacích zařízení s teplovodním výměníkem – a) krbová kamna; b) krbová vložka; c) sporák; d) zplyňovací kotel [7]	15
Obrázek 8: Příklady spalovacích zařízení s teplovodním výměníkem – a) krbová kamna s kachlovými boky; b) sporák c) krbová vložka; d) kotel na pelety [7, 9 a 11]	17
Obrázek 9: Příklady kombinovaných spalovacích zařízení na dřevo a pelety – a) krbová kamna teplovzdušná; b) teplovzdušný sporák se dvěma topeništi (bez trouby); c) krbová vložka s teplovodním výměníkem; d) teplovodní kotel [7, 9 a 11]	18
Obrázek 10: poloautomatický kalorimetr LECO AC-600	39
Obrázek 11: Elementární analyzátor CHN628+S	39
Obrázek 12: Analyzátor LECO TGA (termogravimetrický analyzátor)	40
Obrázek 13: Ilustrační obrázek novějšího modelu analyzátoru spalin Madur GA-60 [32].	49
Obrázek 14: Obrázek zkoušených kamen MAX a konstrukce deflektorů v řezu topeniště [33]	51
Obrázek 15: Krbová kamna LaNordica-Nicoletta 8,0 [kW] [7]	70

9. Seznam použitých tabulek

Tabulka 1: Mezní hodnoty spalovacích zařízení napojených na soustavu ústředního vytápění nabízené do 31. 12. 2017, 3. emisní třída kotlů (dle EN 303-5:2012) [19 a 20]	21
Tabulka 2: Mezní hodnoty spalovacích zařízení napojených na soustavu ústředního vytápění nabízené od 1. 1. 2018, 4. emisní třída kotlů (dle EN 303-5:2012) [14 a 15]	22
Tabulka 3: Mezní hodnoty spalovacích zařízení napojených na soustavu ústředního vytápění 5. emisní třídy (dle EN 303-5:2012) [14 a 15]	22
Tabulka 4: Obecné emisní limity pro lokální spalovací zařízení bez napojení na systém ústředního vytápění [17, 18, 19, 20 a 21]	24
Tabulka 5: Hlavní obchodní formy a suroviny tuhých biopaliv [23]	27
Tabulka 6: Způsoby využití biomasy k energetickým účelům [5]	29
Tabulka 7: Objemové a hmotnostní složení suchého vzduchu [3]	43
Tabulka 8: Molekulové hmotnosti prvků v hořlavině [3]	44
Tabulka 9: Přehled převodníků analyzátoru spalin GA-60 [31]	47
Tabulka 10: Technické parametry krbových kamen MAX udávané výrobcem [33]	51
Tabulka 11: Chemická analýza vzorků biopaliv v původním stavu	53
Tabulka 12: Chemická analýza sušiny vzorků biopaliv	53
Tabulka 13: Stechiometrická analýza původních vzorků biopaliv	54
Tabulka 14: Stechiometrická analýza původních vzorků biopaliv	55
Tabulka 15: Stechiometrická analýza původních vzorků biopaliv	56
Tabulka 16: Stechiometrická analýza původních vzorků biopaliv	57
Tabulka 17: Průměrné koncentrace tepelně-emisního měření pro topolové brikety	60
Tabulka 18: Průměrné koncentrace tepelně-emisního měření pro smrkové brikety	62
Tabulka 19: Průměrné koncentrace tepelně-emisního měření pro kůrové brikety	64
Tabulka 20: Průměrné koncentrace tepelně-emisního měření pro smrkové palivové dřevo	66

Tabulka 21	71
Tabulka 22: Ekonomické zhodnocení pořízení spalovacího zařízení, jako doplňkový zdroj topení	72

10. Seznam použitých grafů

Graf 1: Výsledný průběh tepelně-emisního měření pro topolové brikety	60
Graf 2: Výsledný průběh tepelně-emisního měření pro topolové brikety	61
Graf 3: Výsledný průběh tepelně-emisního měření pro smrkové brikety	62
Graf 4: Výsledný průběh tepelně-emisního měření pro smrkové brikety	63
Graf 5: Výsledný průběh tepelně-emisního měření pro kůrové brikety	64
Graf 6: Výsledný průběh tepelně-emisního měření pro kůrové brikety	65
Graf 7: Výsledný průběh tepelně-emisního měření pro smrkové palivové dřevo	66
Graf 8: Výsledný průběh tepelně-emisního měření pro smrkové palivové dřevo	67

Příloha 1

Tabulka P1: Klasifikace původu a zdrojů tuhých biopaliv – Dřevní biomasa

1	Dřevní biomasa	1.1 Lesní, plantážové a jiné původní dřevo	1.1.1 Celé stromy bez kořenů	1.1.1.1 Listnaté
				1.1.1.2 Jehličnaté
				1.1.1.3 rychle rostoucí dřeviny
				1.1.1.4 Křoviny
				1.1.1.5 homogenní směsi a směsi
			1.1.2 Celé stromy s kořeny	1.1.2.1 listnaté
				1.1.2.2 jehličnaté
				1.1.2.3 rychle rostoucí dřeviny
				1.1.2.4 křoviny
				1.1.2.5 homogenní směsi a směsi
			1.1.3 Kmenové dřevo	1.1.3.1 listnaté s kůrou
				1.1.3.2 jehličnaté s kůrou
				1.1.3.3 listnaté bez kůry
				1.1.3.4 jehličnaté bez kůry
				1.1.3.5 homogenní směsi a směsi
			1.1.4 Zbytky po těžbě dřeva	1.1.4.1 čerstvé/zelené listnaté (vč. listí)
				1.1.4.2 čerstvé/zelené jehličnaté (vč. jehličí)
				1.1.4.3 skladované, listnaté
		1.1.4.4 skladované jehličnaté		
		1.1.4.5 homogenní směsi a směsi		
		1.1.5 Pařezy a kořeny	1.1.5.1 listnaté	
			1.1.5.2 jehličnaté	
			1.1.5.3 rychle rostoucí dřeviny	
1.1.5.4 křoviny				
1.1.5.5 homogenní směsi a směsi				
1.1.6 Kůra z lesních prací				
1.1.7 Dřevo z péče o krajinu, ze zahrad, parků, údržby silnic, vinohradů, ovocných sadů a naplavené dřevo ze sladkých vod				
1.1.8 Homogenní směsi a směsi				
1.2 Vedlejší produkty a zbytky z dřevozpracujícího průmyslu	1.2.1 Chemicky neupravené vedlejší dřevní produkty a zbytky	1.2.1.1 listnaté s kůrou		
		1.2.1.2 jehličnaté s kůrou		
		1.2.1.3 listnaté bez kůry		
		1.2.1.4 jehličnaté bez kůry		
		1.2.1.5 kůra (z průmyslového zpracování)		
		1.2.1.6 homogenní směsi a směsi		

Tabulka P 1: Klasifikace původu a zdrojů tuhých biopaliv – Dřevní biomasy (dokončení)

1 Dřevní biomasa		1.2.2 Chemicky upravené vedlejší dřevní produkty, zbytky, vlákna a dřevní složky	1.2.2.1 bez kůry
			1.2.2.2 s kůrou
			1.2.2.3 kůra (z průmyslového zpracování)
			1.2.2.4 Vlákna a dřevní složky
		1.2.3 Homogenní směsi a směsi	
	1.3 Použité dřevo	1.3.1 Chemicky neupravené použité dřevo	1.3.1.1 bez kůry
			1.3.1.2 s kůrou
			1.3.1.3 kůra
		1.3.2 Chemicky upravené použité dřevo	1.3.2.1 bez kůry
			1.3.2.2 s kůrou
			1.3.2.3 kůra
		1.3.3 Homogenní směsi a směsi	
		1.4 Homogenní směsi a směsi	

Příloha 2: Revizní zpráva o kontrole spalovacího zařízení [6]

DOKLAD		
o kontrole technického stavu a provozu spalovacího stacionárního zdroje na pevná paliva o jmenovitém tepelném příkonu 10-300 kW včetně, sloužícího jako zdroj tepla pro teplovodní soustavu ústředního vytápění		
Údaje o odborně způsobilé osobě		
Název/jméno a příjmení	TOP-EL, spol. s r. o.	
Adresa sídla/bydliště	Hudečkova 2036/1C, 140 00 Praha 4	
IČ	250 77 350	
Evidenční číslo oprávnění	001	
Číslo kontrolního dokladu	Kontrola 00035	
Název výrobce spalovacího stacionárního zdroje, který oprávnění vydal	LaNordica S.p.A.	
Rozsah oprávnění	K instalaci, servisu, provozu a údržbě	
Platnost oprávnění	Do 31. 12. 2020	
Údaje o provozovateli spalovacího stacionárního zdroje		
Název/jméno a příjmení	Ing. Jiří Svoboda	
Adresa sídla/bydliště	Bystrá nad Jizerou 49, 513 01 – Bystrá nad Jizerou	
Údaje o spalovacím stacionárním zdroji		
Adresa umístění (včetně čísla bytu, pokud je umístěn v bytě)	Bystrá nad Jizerou 49, 513 01 – Bystrá nad Jizerou	
Obchodní název	TermoRosa TR-02	
Výrobce	LaNordica S.p.A.	
Typ spalovacího stacionárního zdroje	<input type="checkbox"/> kotel prohořivací	<input type="checkbox"/> kotel odhořivací
	<input type="checkbox"/> kotel zplyňovací	<input type="checkbox"/> kotel automatický se šnekovým dopravníkem
	<input type="checkbox"/> kotel automatický s rotačním dopravníkem	<input type="checkbox"/> kotel automatický přestavěný
	<input type="checkbox"/> kotel automatický speciální	<input checked="" type="checkbox"/> lokální topidlo s výměníkem
	<input type="checkbox"/> jiný (specifikovat)	
Rok výroby	2008	
Výrobní číslo	není	
Určující technická norma	ČSN EN 12815	

Paliva určená výrobcem spalovacího stacionárního zdroje	Palivo 1	Palivo 2	Palivo 3	
	Dřevo	Dřevní brikety	-----	
Jmenovitý tepelný příkon, je-li stanoven	19,89 kW	19,89 kW	-----	
Jmenovitý tepelný výkon	15,5 kW	15,5 kW	-----	
Minimální tepelný výkon, je-li stanoven	-----	-----	-----	
Emisní třída dle určující technické normy	ČSN EN 12815	ČSN EN 12815	-----	
Údaje o kontrole				
		Vyhovuje	Nevyhovuje	Není ¹
Základní konstrukční prvky spalovacího stacionárního zdroje	Přívod spalovacího vzduchu	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Roštová soustava	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Spalovací komora	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Zatápěcí klapka	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Vstupní a čistící otvory	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Přívod paliva	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Vnější izolace	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Řídicí, regulační, měřicí a zabezpečovací prvky spalovacího stacionárního zdroje	Řídicí jednotka	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Regulátor množství spalovacího vzduchu	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Havarijní termostat, zařízení proti přetopení	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Zařízení zabraňující prohoření paliva do násypky	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Palivové hospodářství	Použité palivo	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Způsob skladování paliva	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Teplovodní soustava	Zajištění teploty vratné vody	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Akumulační nádoba	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Odvod spalin a spalinové cesty	Napojení na spalinové cesty	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Revize spalinových cest provedena dne			

¹ Odpovídající položku označte křížkem.

Řádné údržby spalovacího stacionárního zdroje	Kontrola a čištění spalinových cest provedeny dne	9. 11. 2016
	Pravidelné čištění spalovacího zdroje provedeno dne	9. 11. 2016
Výsledek kontroly		
Spalovací stacionární zdroj je/není instalován v souladu s pokyny výrobce a zákonem č. 201/2012 Sb.		V souladu
Technický stav vyhovuje/nevyhovuje pokynům výrobce a zákonu č. 201/2012 Sb.		Vyhovuje
Spalovací stacionární zdroj je/není provozován v souladu s pokyny výrobce a zákonem č. 201/2012 Sb.		Je provozován
Spalovací stacionární zdroj splňuje/nespĺňuje požadavky stanovené v příloze č. 11 zákona č. 201/2012 Sb.		Splňuje
Je/není spalováno palivo o požadované kvalitě určené výrobcem zdroje, příp. je/není indikováno spalování odpadu		Je v požadované kvalitě
Doporučení		
Instalace kapilárního termostatu pro spínání čerpadla.		
 <i>certifikovaný prodejce</i>		
Datum kontroly	9. 11. 2016	
Podpis a razítko odborně způsobilé osoby Bc. Petr Zahrádka	 TOP-EL, spol. s r. o. Hudečkova 2036/1C, 140 00 PRAHA 4 IČO: 25077350, DIČ: CZ25077350 Provozovna: Severní 334, 252 25 Ořech - Praha západ www.top-el.cz / info@top-el.cz / tel.: 244 462 922	