



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

VLIV ZMĚNY PALIVA NA ÚČINNOST KOTLE

EFFECT OF CHANGE OF FUEL AT BOILERS EFFICIENCY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Hazucha

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marek Baláš, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Jan Hazucha**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Marek Baláš, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

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

Vliv změny paliva na účinnost kotle

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Domovní vytápění tuhými palivy zažívá díky nízkým cenám paliva svoji reinkarnaci. Současně je velká tlak na snižování negativních ekologických vlivů tohoto zdroje. Kotle jsou certifikovány v optimálních podmínkách s ideálním palivem. Cílem práce je posouzení změny emisí a účinnosti kotlů při změně kvality paliva.

Cíle bakalářské práce:

Tuhá paliva a jejich vlastností

Přehled legislativních nároků na kotle na tuhá paliva do výkonu 200 kW

Experimentální posouzení dopadů druhů paliv na emise a účinnost kotlů

Seznam literatury:

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

JANDAČKA, J. et al. Technologie pre zvyšovanie energetickeho potencialu biomasy. 1. Žilina, 2007. ISBN 978-80-969595-4-9.

NOSKIEVIČ, Pavel, Pavel KOLIČNÝ, Tadeáš OCHODEK. Malé zdroje znečišťování, VEC Ostrava 2004

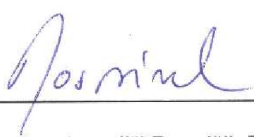
MALAŤÁK, Jan a Petr VACULÍK. Biomasa pro výrobu energie. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008. ISBN 978-80-213-1810-6.

QUASCHNING, Volker. Obnovitelné zdroje energií. Praha: Grada, 2010. Stavitel. ISBN 978-80-247-3250-3.

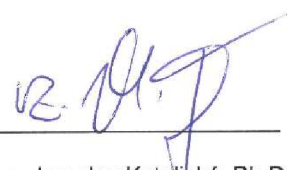
Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 16. 10. 2016





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



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

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing Marek Baláš, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne: 26.5.2017

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil,
Ph.D.

ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický,
Ph.D.

děkan fakulty

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá rozdělením tuhých paliv a sepsáním jejich nejdůležitějších vlastností, rozdělením kotlů na tuhá paliva do výkonu 200 kW a legislativními nároky na tyto kotle. Další část práce se zabývá vlivem druhu paliva na účinnost kotle a měřením emisí.

Klíčová slova

Kotel, tuhá paliva, uhlí, biomasa, emise, účinnost

Abstract

Bachelor's thesis deals with sorting solid fuels and boilers for solid fuels up to power of 200 kW, it's most important attributes and legislative claims. Next part of the thesis deals with the impact between of different types of fuels on efficiency.

Key words

Boiler, solid fuels, coal, biomass, emission, efficiency.

Bibliografická citace mé práce:

HAZUCHA, Jan. *Vliv změny paliva na účinnost kotle*. Brno, 2017. Bakalářská práce. VUT Brno. Vedoucí práce doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že bakalářskou práci na téma: „Vliv změny paliva na účinnost kotle“ jsem vypracoval samostatně, s pomocí svého vedoucího doc. Ing Marek Baláš, Ph.D., odborné literatury a dalších zdrojů, uvedených v závěru práce.

V Brně dne 26.5.2017

.....

Podpis autora

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu své bakalářské práce doc. Ing Marek Baláš, Ph.D. za cenné rady, praktické připomínky a čas strávený při řešení odborné problematiky. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu v průběhu celého studia.

V Brně dne 26.5.2017

.....

Podpis autora

OBSAH

Úvod.....	13
1 Tuhá paliva.....	14
1.1 Vlastnosti tuhých paliv.....	14
1.2 Uhlí.....	15
1.2.1 Černé uhlí.....	16
1.2.2 Antracit.....	16
1.2.3 Koks.....	17
1.2.4 Hnědé uhlí.....	17
1.2.5 2.2.5 Lignit.....	17
1.3 Biomasa.....	17
1.3.1 Dřevní biomasa.....	18
1.4 Smrkové dřevo.....	18
1.5 Bukové dřevo.....	18
1.6 Dřevěné brikety.....	19
1.6.1 Bylinná biomasa.....	19
1.6.2 Biomasa záměrně pěstovaná.....	19
1.6.3 Biomasa odpadní.....	20
2 Kotle na tuhá paliva.....	21
2.1 Rozdělení kotlů.....	21
2.1.1 Kotle s velkoobjemovým ohništěm.....	21
2.1.2 Kotle se systém kontinuálního přívodu paliva.....	23
2.2 Krbová vložka Steko Venus 12.1.....	24
3 Přehled legislativních nároků na kotle na tuhá paliva.....	25
3.1 Obecné požadavky na kotle.....	25
3.2 Emisní třídy.....	25
3.3 Požadavky na ekodesign.....	26
4 Měření.....	27
4.1 Měření škodlivin.....	27
4.2 Popis měření.....	28
4.3 Použité měřicí přístroje.....	29
5 Výpočty.....	30
5.1 Výpočet minimálního množství vzduchu.....	30
5.2 Výpočet minimálního množství spalín.....	31
5.3 Výpočet Účinnosti.....	32

5.4	Vzorový výpočet.....	35
6	Zpracování měření.....	39
6.1	Prvkový rozbor	39
6.2	Koncentrace měřených látek ve spalinách.....	39
6.3	Účinnost.....	43
	Závěr.....	45
	Seznam použitých zdrojů	46
	Seznam použitých značek a symbolů.....	48
	Seznam obrázků	50
	Seznam příloh.....	51

ÚVOD

Spalování tuhých paliv je nejstarší způsob topení. Nejprve to bylo dřevo, kterým se topilo už před mnoha tisíci let a po něm uhlí, které se začalo ve velké míře používat při průmyslové revoluci na přelomu 18. a 19. století.

Tuhá paliva jsou využívána v energetice, průmyslu i v domácnostech. V dnešní době jsou tuhá paliva, hned po zemním plynu, druhým nejvyužívanějším palivem v českých domácnostech. Spalovací zařízení pro domácí vytápění měla zpočátku nízkou účinnost a vypouštěla do ovzduší velké množství škodlivin. Postupné zlepšování konstrukcí spalovacích zařízení a technologických postupů při spalování vedlo k lepším hodnotám účinnosti a nižším hodnotám vypouštěných škodlivin. Značný vliv na účinnost kotle a množství vypouštěných spalin má také druh a kvalita paliva.

V této bakalářské práci je rozdělení tuhých paliv, rozdělení kotlů na tuhá paliva do výkonu 200 kW a legislativní nároky na tento typ kotlů. Dále je zde zpracováno měření emisí a stanovení účinnosti v závislosti na druhu paliva, které proběhlo na krbové vložce Steko Venus 12.1.

1 TUHÁ PALIVA

Jedná se o paliva, která mají původ v rostlinné hmotě. Můžeme je rozdělit na obnovitelná a neobnovitelná. Mezi neobnovitelná patří fosilní paliva, která vznikala po miliony let procesem zvaným fosilizace. Nejvýznamnější zástupci tuhých fosilních paliv jsou hnědé uhlí, černé uhlí a antracit. Obnovitelná paliva jsou taková, jejichž zdroj jsme schopni obnovit během relativně krátkého období. Hovoříme o biomase, kterou můžeme dělit ze dvou různých pohledů. Buď jako dřevní a nedřevní nebo jako záměrně pěstovanou a odpadní.

Tuhá paliva jsou využívána po celém světě v energetice, v průmyslu a také v domácnostech. Vzhledem k obrovskému množství spáleného paliva je velmi důležité, aby bylo jejich spalování co nejefektivnější a dopady na životní prostředí co nejmenší. Každé palivo má své specifické vlastnosti, které ovlivňují právě efektivitu a množství škodlivých látek vypuštěných do ovzduší. Nezáleží jen na teplotních vlastnostech, ale i na tvaru a velikosti. Proto musí paliva uváděna na trh splňovat zákonem definované požadavky na kvalitu. S tím souvisí i konstrukce kotle. Rozlišujeme několik konstrukcí pro různé typy paliv.

1.1 Vlastnosti tuhých paliv

- **Obsah vody**

Velmi výrazně ovlivňuje jakost paliva, je to nežádoucí faktor. Snižuje výhřevnost paliva, zvětšuje objem spalin, protože odchází ve formě vodní páry. Tím pádem pohlcuje uvolněné teplo a odvádí ho pryč, také snižuje spalovací teplotu. Pokud teplota spalin poklesne pod rosný bod, dochází k urychlení koroze kotle.

Voda je v palivu vázána různým způsobem.

- **Přimísená voda**-dostává se do dřeva při těžbě a dá se odstranit mechanicky (odstředěním nebo odkapáním).
- **Voda hrubá**-je součástí paliva, která se určí jako úbytek hmotnosti při jeho sušení na vzduchu při teplotě přibližně 20 °C a relativní vlhkosti vzduchu asi 50 %.
- **Voda zbytková**-je kapilárně vázaná voda, která zůstane v palivu po odstranění vody hrubé. Stanoví se jako úbytek hmotnosti při sušení při teplotě 105 °C až 110 °C.
- **Chemicky vázaná voda**-uvolní se při spalování, při běžném rozboru paliva se neurčuje,
 - **hydrátová**-malá část vázána na popeloviny, je vázána na minerály
 - **odkludovaná**-chemicky vázaná na hořlavinu, při rozboru se zahrnuje do obsahu prchavé hořlaviny.
- **Veškerá voda**-součet vody hrubé a vody zbytkové. Způsoby stanovení obsahu vody jsou předepsány ČSN 44 13 77

- **Popelovina**

Jsou to minerální látky obsažené v tuhém palivu vyskytující se v něm již před jeho spálením. Jedná se hlavně o křemičitany, uhličitan a sírany. Největší podíl tvoří křemičitan hliníku, vápníku, hořčíku a železa. Spálením paliva v ohništi vzniká z popeloviny tuhá hmota nazývaná popel. Ten nevzniká pouze z popeloviny, ale také z různých nečistot, které se na palivo dostaly během těžby, transportu či skladování.

- **Spalné teplo**

Je teplo uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na 20 °C, přičemž voda ve spalinách zkondenzuje, značíme jej Q_s . Určuje se v laboratorních kalorimetrem spálením 1 kg paliva v kyslíkové atmosféře o tlaku přibližně 2,5 MPa. Proces měření probíhá v kalorimetrické bombě, která je ponořena do vodní lázně. Dochází k oteplení vodní lázně kalorimetru teplem, které vzniklo při spalování vzorku. Spalné teplo se určí z rovnice (1.1).

$$Q_s = \frac{V \times \Delta T}{G} \quad [\text{kJ.kg}^{-1}] \quad (1.1)$$

kde V [kJ.K⁻¹] vodní hodnota kalorimetru,
 G [Kg] hmotnost paliva.

- **Výhřevnost**

Je teplo uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na 20 °C, přičemž voda ve spalinách zůstane v plynné fázi, značíme ji Q_i^r . Určuje se ze změřeného spalného tepla výpočtem z rovnice (2.1).

$$Q_i^r = Q_s + r \times (W^r + 8,94 \times H_2) \quad [\text{kJ.kg}^{-1}] \quad (2.1)$$

kde W^r [–] obsah vody v palivu,
 r [kJ.kg⁻¹] výparné/kondenzační teplo vody, $r = 2454 \text{ kJ.kg}^{-1}$,
 H_2 [–] obsah vodíku v surovém palivu.

- **Poměrný obsah síry**

Ta se vyskytuje jako organická, pyritická a síranová, odchází v popelu. I když při oxidaci síry vzniká teplo, je síra v palivu nežádoucí, protože zvyšuje obsah SO₂ a SO₃ ve spalinách, což vede ke zvýšení rosného bodu spalin a způsobuje snížení charakteristických teplot popele. Pyritická síra se vyznačuje vysokou tvrdostí, což ztěžuje mletí paliva.

- **Měrná sirnatost**

Udává hmotnost síry na jednotku výhřevnosti. Určí se výpočtem z rovnice (3.1)

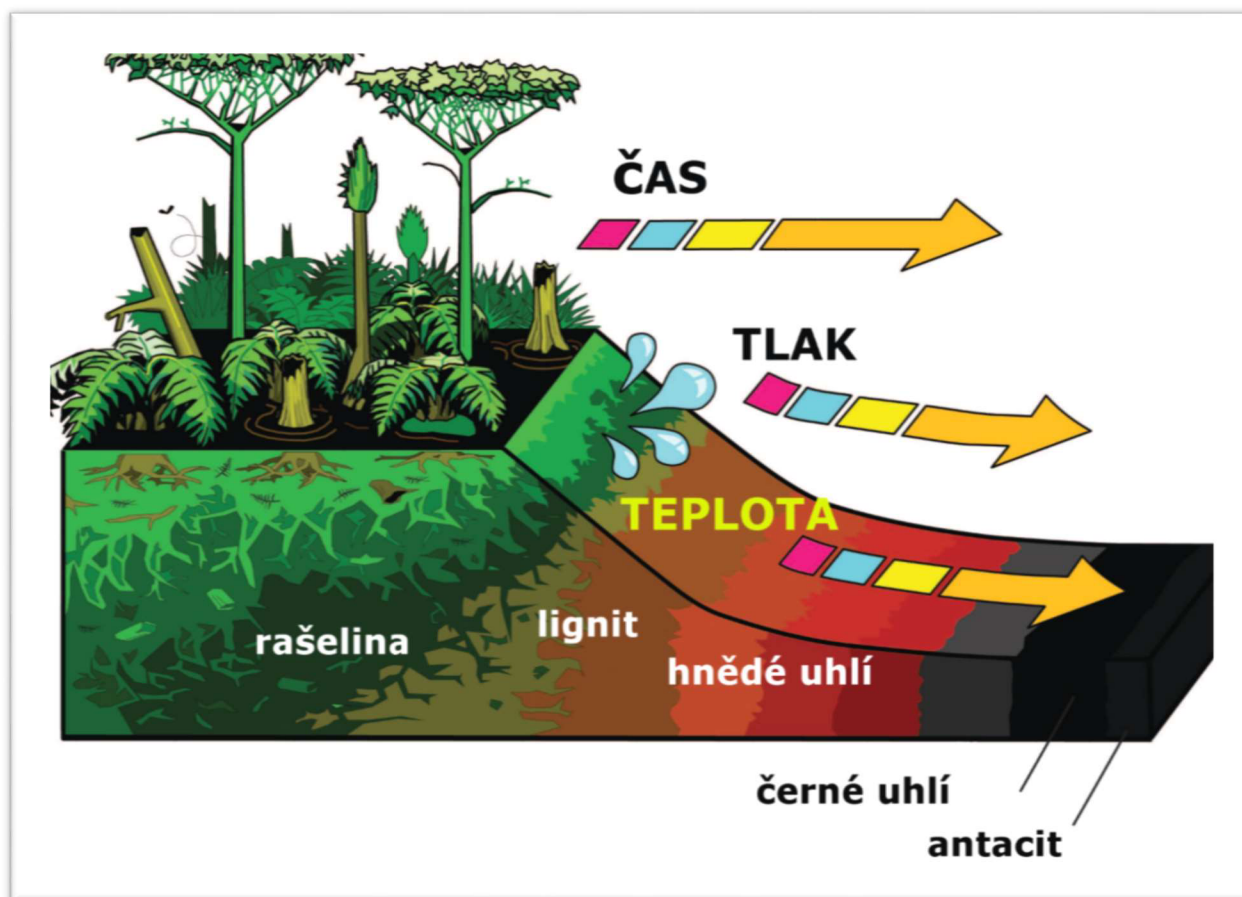
$$\bar{S} = \frac{10 \cdot S}{Q_i^r} \quad [\text{g/kg}] \quad (3.1)$$

kde S [g.kg⁻¹] obsah síry v palivu,
 Q_i^r [MJ.kg⁻¹] výhřevnost paliva.

1.2 UHLÍ

Uhlí vzniklo v období prvohor a druhohor přeměnou organického materiálu. Jednalo se hlavně o kmeny tropických stromů jako například přesličky, plavuně a kapradiny. Proces přeměny se nazývá prouhelňování. To probíhalo za působení vysokého tlaku a nepřítomnosti kyslíku, což mělo za následek úbytek kyslíku, vodíku a přibytěk uhlíku.

Rozdělujeme je podle geologického stáří vzniku na antracit, černé uhlí, hnědé, lignit a rašelinu v pořadí směrem od geologicky nejstaršího až po to nejmladší. Geologické stáří ovlivňuje mimo jiné také vlastnosti uhlí. Obvykle platí, že starší uhlí má vyšší spalné teplo, výhřevnost a menší tzv. prchavý podíl hořlaviny. Čím je uhlí starší, tím více roste obsah uhlíku a klesá obsah kyslíku a vodíku. Snadnější zapalitelnost a hoření delším plamenem za relativně nižších teplot jsou vlastnosti typické pro geologicky mladší typy, jako jsou například hnědá uhlí a lignity.



Obr. 1 Vznik uhlí

1.2.1 Černé uhlí

Řadí se ke geologicky nejstaršímu uhlí. Ze všech druhů uhlí, má to černé nejnižší vlhkost. Ta je téměř o 20 % nižší než u hnědé uhlí. Množstvím prchavé hořlaviny a pevného uhlíku je srovnatelné s hnědým uhlím a s lignity. Množstvím popeloviny se blíží spíše k antracitu a obsah síry je až 6krát vyšší než u hnědé uhlí.

1.2.2 Antracit

Jedná se o druh černého uhlí, lišící se od ostatních druhů uhlí vysokým množstvím pevného uhlíku (až 83 %) a velmi nízkým množstvím prchavé hořlaviny, zároveň má i velmi nízkou vlhkost. Co se týče množství popeloviny, je srovnatelný s černým uhlím. Má podobně jako hnědé uhlí nižší obsah síry než černé uhlí. Nedá se spékat a využívá se hlavně v energetice.

1.2.3 Koks

Jedná se o pevný materiál, vznikající z černého uhlí, ze kterého jsou odstraněny prchavé složky. Koks se používá hlavně jako palivo a redukční činidlo ve vysoké peci při výrobě surového železa. Dále jako palivo v tepelných elektrárnách.

1.2.4 Hnědé uhlí

Řadí se ke geologicky mladšímu uhlí a jeho vlastnosti jsou o něco horší než u černého uhlí a antracitu. Například jeho vlhkost je přibližně 4krát vyšší a spalné teplo je nejnižší z těchto tří druhů uhlí. Ale velkou výhodou je, že se nenachází ve velkých hloubkách a dá se těžít povrchově. To znamená, že je levnější, a proto velmi hojně využívané.

1.2.5 2.2.5 Lignit

Je to typ hnědého uhlí, je geologický nejmladší a nejméně prouhelnělé. Ze všech druhů uhlí má nejvyšší vlhkost, nejvyšší množství prchavé hořlaviny, popeloviny a má nejnižší hodnoty spalného tepla.

Tab. 1 *Vlastnosti různých druhů uhlí [1]*

	Antracit	Černé uhlí	Hnědé uhlí	Lignit
Vlhkost (%)	7,7	5,2	23,4	33,3
Prchavá hořlavina (%)	6,4	40,2	40,8	43,6
Pevný uhlík (%)	83,1	50,7	54	45,3
Popelovina	10,5	9,1	5,2	11,1
Poměrný obsah síry (%)	0,7	2,3	0,4	1,1
Spalné teplo (MJ.kg)	34,7	29,2	21,4	16,5

1.3 BIOMASA

Biomasa je definována jako substance biologického původu (pěstování rostlin v půdě nebo ve vodě, chov živočichů, produkce organického původu, organické odpady). Je buď záměrně získávána jako výsledek činnosti transformací výrobních faktorů na biomasu nebo ji získáme zužitkováním odpadů z potravinářství, zemědělství, lesnické výroby a z komunálního hospodářství.

Biomasa je sice obnovitelný zdroj energie, ale její produkce není pouze pro energetické účely. Využívá se také k potravinářským a krmivářským účelům nebo i k zajištění surovin pro průmyslové účely, takže je její využití k energetickým účelům limitováno. Tento problém by se dal vyřešit rozšířením produkční plochy nebo zvýšením intenzity výroby, což souvisí se zvýšenou potřebou investic do výroby biomasy. Dalším limitujícím faktorem je rozmístění jejích zdrojů a spotřebičů energie, vzhledem k potížím s akumulací, transportem a distribucí získané energie.

Energetické využívání biomasy má však i nesporné výhody. Negativní dopad na životní prostředí je menší než při užívání fosilních paliv. Jak je již zmíněno, biomasa je obnovitelný zdroj energie. Jedná se o tuzemský zdroj, tudíž se snižuje potřeba dovážení energetických zdrojů ze zahraničí a řízená produkce biomasy přispívá k vytvoření krajiny a péči o ni.

1.3.1 Dřevní biomasa

a) Lesní a plantážové dřevo

Do této kategorie patří dřevo z lesů, parků a rychle rostoucí stromy. Vytěžené dřevo bývá zpracováváno více způsoby: redukcí velikostí částic, odkorněním, vysušením nebo zvlhčením.

b) Dřevozpracující průmysl, vedlejší produkty a zbytky

Mezi tyto paliva se také řadí chemicky neošetřené zbytky z předchozí kategorie. Jako například: zbytky z odkornění, řezání klád nebo zbytky po redukcí velikosti, tvarování stromů, lisování nebo chemicky ošetřené dřevní zbytky, pokud neobsahují těžké kovy nebo halogenové organické sloučeniny, jež jsou výsledkem ošetření konzervačními prostředky na dřevo nebo nátěry dřeva.

c) Použité dřevo

Do této skupiny zahrnujeme dřevní odpad od zákazníků a společností, použité dřevo nesmí stejně jako v případě dřevozpracujícího průmyslu obsahovat žádné těžké kovy nebo halogenové organické sloučeniny

d) Směsi a příměsi

Zahrnuje směsi a příměsi dřevní biomasy. Míchání může být buď záměrné (směsi) nebo nezáměrné (příměsi)

1.4 SMRKOVÉ DŘEVO

Patří do kategorie dřevní biomasy mezi lesní a plantážové dřevo. Dřevo z jehličnatých stromů je obecně měkčí a hodí se spíše k zatápní a je vhodné v případě, kdy je potřeba rychle vyhřát vytápněný prostor. Výhřevnost smrkového dřeva je přibližně o 10 % vyšší než u bukového dřeva při vlhkosti 14,2 %. Smrk má však několikanásobně vyšší obsah popeloviny než dřevo listnatých stromů. V lesích na našem území se nejčastěji vyskytuje smrk ztepilý. Dorůstá až výšky 50 m a roste velmi rychle. Díky jeho rychlému růstu je vhodný pro těžbu palivového dřeva.



Obr. 2 Smrkové dřevo použité při měření

1.5 BUKOVÉ DŘEVO

Jedná se o jedno z nejtvrdějších dřevěných paliv používaných k vytápní, je až 3x tvrdší než smrkové dřevo. Díky již zmíněné tvrdosti je žár stabilnější a vydrží po mnohem delší dobu než v případě dřeva smrkového. V našich lesích nejčastěji najdeme buk lesní, který dorůstá do výšky průměrně okolo 45 m. Roste pomaleji než smrk a dosahuje zralosti přibližně po 60 letech.



Obr. 3 Bukové dřevo použité při měření

1.6 DŘEVĚNÉ BRIKETY

Brikety se vyrábějí z dřevěné štěpky. Štěpka může být z tvrdého dřeva listnatých stromů. Někdy se používá směs štěpky z tvrdého a měkkého dřeva. Štěpky jsou lisovány do válců s otvorem uprostřed. Jejich vlhkost se pohybuje přibližně od 3 % do 5 %. Díky nízké vlhkosti mají brikety vyšší hodnoty spalného tepla a výhřevnosti oproti smrkovému a dubovému dřevu.



Obr. 4 Bukové brikety použité při měření

Tab. 2 Vlastnosti dřevěných paliv dle databáze Phyllis [14]

	Smrk	Buk	Brikety
Vlhkost [%]	14,2	14,2	4,3
Prchavá hořlavina [%]	70,01	64,52	74,93
Obsah popeloviny [%]	2,23	0,48	0,67
Uhlík [%]	13,56	20,8	20,1
Výhřevnost [MJ/kg]	15,53	14,73	18,49
Spalné teplo [MJ/kg]	16,96	16,24	19,62

1.6.1 Bylinná biomasa

a) Zemědělské a zahradní byliny

Materiál přicházející přímo z pole, například po skladování. Bývá upravován pouze redukcí velikosti částic. Do této skupiny patří i bylinný materiál zemědělských a zahradních polí a ze zahrad a parků.

b) Průmysl zpracovávající byliny, vedlejší produkty a zbytky

Materiál bylinné biomasy, který zbyl po průmyslové manipulaci a ošetření. Příkladem jsou zbytky z výroby cukru, cukrové řepy a zbytky z ječného sladu z výroby piva.

1.6.2 Biomasa záměrně pěstovaná

Jedná se hlavně o plodiny pro výrobu etylalkoholů nebo energetické dřeviny, pro které jsou důležité vlastnosti jako: extrémně vysoký vzrůst rostlin v mládí, výborné obrůstací schopnosti pařezů po obmytí, snášenlivost konkurence bez regulovatelných zásahů a odolnost proti škůdcům a chorobám.

Plodiny a dřeviny sloužící k výrobě biomasy jsou: cukrová řepa, obilí, brambory, cukrová třtina, olejniny jako například řepka olejná, vrby, topoly, olše, akáty a další stromové a keřovité dřeviny.

1.6.3 Biomasa odpadní

Mezi odpadní biomasu zahrnujeme:

- **Rostlinné zbytky zemědělské prvovýroby a údržby krajiny:** kukuřičná a obilná sláma, řepková sláma, zbytky z lučních a pastevních areálů, zbytky po likvidaci křovin a lesních náletů, odpady ze sadů a vinic.
- **Odpady z živočišné výroby:** exkrementy hospodářských zvířat, zbytky krmiv, odpady mléčnic, odpady z přidružených zpracovatelských kapacit.
- **Komunální organické odpady z venkovských sídel:** kaly z odpadních vod, organický podíl tuhých komunálních odpadů, odpadní organické zbytky z údržby zeleně a travnatých ploch.
- **Organické odpady z potravinářských a průmyslových výroby:** odpady z provozů na zpracování a skladování rostlinné produkce, odpady z jatek, mlékáren, lihovarů a konzerváren, odpady z vinařských a dřevařských provozoven (odřezky, hobliny, piliny).
- **Lesní odpady:** dřevní hmota z lesních probírek, kůra, větve, pařezy, kořeny po těžbě dřeva, palivové dřevo, manipulační odřezky, klest.

2 KOTLE NA TUHÁ PALIVA

Kotel je zařízení pro přeměnu primární energie fosilních paliv (uhlí, ropa, zemní plyn) nebo energie z alternativních paliv (biomasa a zpracované odpady) na energii pracovního média. Spalovací zařízení s ohništěm pro spalování přivedeného paliva a zařízení pro odvod vzniklých spalin do komína jsou základními součástmi, které musí mít každý kotel na tuhá paliva.

Systém odvodu spalin je různý pro různé velikosti kotlů. Malé kotle nepotřebují žádné zařízení, které by zajišťovalo odvod spalin, protože to je zajištěno přirozeným tahem. U těch větších je odvod spalin zajištěn buď pomocí spalinových ventilátorů, které udržují podtlak (40–80 Pa) na konci ohniště nebo protlačováním přes kotel vzduchovými ventilátory. U velkých kotlů už komín nemá význam jako zdroj tahu, ale má význam spíše ekologický, protože zajišťuje rozptýlení škodlivin a snižuje tak emise v okolí zdroje.

2.1 ROZDĚLENÍ KOTLŮ

2.1.1 Kotle s velkoobjemovým ohništěm

Jedná se o velmi jednoduché konstrukční řešení, které je levné a mezi uživateli velmi rozšířené. Tento typ kotle je vhodný pro spalování uhlí i dřeva. Dodávání paliva je manuální a je možné ho naložit velké množství, které vydrží po dlouho dobu. Po naložení dochází k zahřívání a vysoušení paliva, poté dochází k uvolňování prchavé hořlaviny a jejímu zapálení, což je počátek hoření. Rychlost průběhu tohoto procesu je závislá na konstrukčním provedení a kvalitě kotle. Možnost naložení velkého množství paliva se může zdát jako velká výhoda vzhledem k menší časové náročnosti na obsluhu kotle, ale má to i své nevýhody. Nevýhodou je, že proces spalování je nevyvážený.

To znamená, že na začátku a na konci příkladacího cyklu je přebytek spalovacího vzduchu a ve střední části, kdy je rychlost hoření nejvyšší, je ho naopak nedostatek.

To má za následek nedokonalé spalování, při kterém dochází ke tvorbě nežádoucích škodlivin. Problém nedostatku spalovacího vzduchu by se dal vyřešit regulací jeho množství, to však není technicky možné, protože systém regulace je u tohoto typu kotlů velmi primitivní a nebyl by dostatečně účinný. Rozlišujeme zde dva typy spalování:

a) Prohořívání

Jde o systém roštového ohniště na uhlí, dřevo nebo koks, kde se nová dávka paliva přikládá do spalovací komory na již hořící vrstvu ležící na roštu. Novou vrstvou paliva procházejí spaliny a dochází k ohřevu, sušení, uvolnění prchavé hořlaviny a hoření odplyněného zbytku paliva. Jedná se o nejstarší typ kotlů, které byly vyrobeny z litiny a jejich provoz není příliš kvalitní, protože hodně dehtují a mají vysoké hodnoty CO.

Mají však dlouhotrvající životnost a prodávají se za nízkou cenu, proto patří mezi nejpoužívanější typ spalovacích zařízení v České republice. Původně byly navrženy na spalování paliva s nízkým obsahem prchavé



Obr. 5 Schéma prohořívání [4]

hořlaviny, jako je například koks, ale ten se používá jen v malé míře kvůli jeho vysoké ceně.

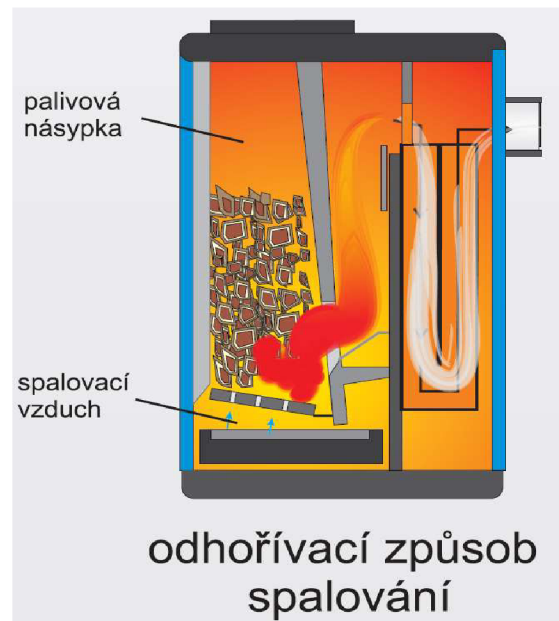
b) Odhořívání

Jedná se o systém vytápění, při kterém se palivo přikládá do zásobníku paliva neboli do palivové šachty, která je umístěna nad ohništěm. Ve spalovací komoře se nachází buď posuvný nebo otočný rošt, na kterém hoří paliva. Rozdíl oproti prohořívání je v tom, že spaliny procházejí jen částí přiloženého paliva, a proto je tento typ spalovacího zařízení vhodný pro paliva s vyšším obsahem prchavé hořlaviny, jako je například hnědé uhlí. Během provozu dochází k postupnému sesouvání paliva z palivové šachty do prostoru spalovací komory.

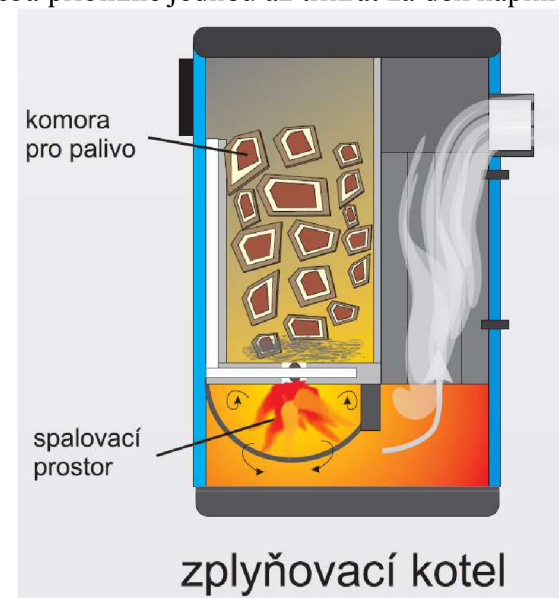
c) Zplyňování

V klasických kotlích se systémem jednorázového přikládání nejdříve probíhá fáze zplyňovací, při níž se tuhá hořlavina přemění na hořlavé plyny a po ní následuje fáze spalovací, ve které hořlavé plyny dohoří. To vše probíhá u klasických kotlů v jedné komoře. Zplyňovací kotle jsou rozděleny na dvě komory. Horní komora je konstruována jako zásobník paliva (uhlí, dřevo), do které je možné jednorázově naložit velkou dávku dřeva. Pod zásobníkem paliva se nachází další komora. Ta slouží ke spalování hořlavých plynů a zároveň jako popelník. Tyto dvě komory jsou od sebe odděleny zplyňovací tryskou nebo zplyňovacím roštem. Kotle jsou vybaveny automatickým řízením, a proto se nároky na obsluhu minimalizují, je potřeba přibližně jednou až třikrát za den naplnit zásobník paliva a pak jednou za pár dní vyprázdnit popelník. Účinnost těchto kotlů se pohybuje mezi 80-90 % a lze docílit výrazné úspory paliva oproti klasickému systému prohořívání paliva. Podmínkou vysoké účinnosti je použití suchého dřeva s vlhkostí do 20 %. Rozlišujeme dvě hlavní konstrukční varianty podle způsobu práce ventilátoru. První konstrukční varianta využívá ventilátor pro vhánění vzduchu do kotle a k vytvoření přetlaku. Druhá varianta využívá ventilátor umístěného na výstupním hrdle kouřovodu a odsává spaliny ven z kotle. V kotli následně vzniká podtlak, který zabraňuje možnému úniku spalin netěsnostmi do místnosti a zároveň umožňuje téměř bezprašné vybírání popela a zvyšuje účinnost kotle.

Dalším možným konstrukčním řešením je zplyňovací kotel s kontinuálním přívodem paliva do ohniště. Tento systém spalování je dokonalejší než u klasického zplyňovacího kotle. Spalovací proces je více vyrovnaný a dochází ke snížení koncentrace škodlivin a snižuje se i citlivost na obsah vody v palivě. Standartním konstrukčním řešením je rozdělení ohniště na dvě části. Do menší z nich je přiváděno palivo a dochází v ní k uvolnění prchavé hořlaviny. Ve větší části dochází



Obr. 6 Schéma odhořívání [4]



Obr. 7 Schéma zplyňování [4]

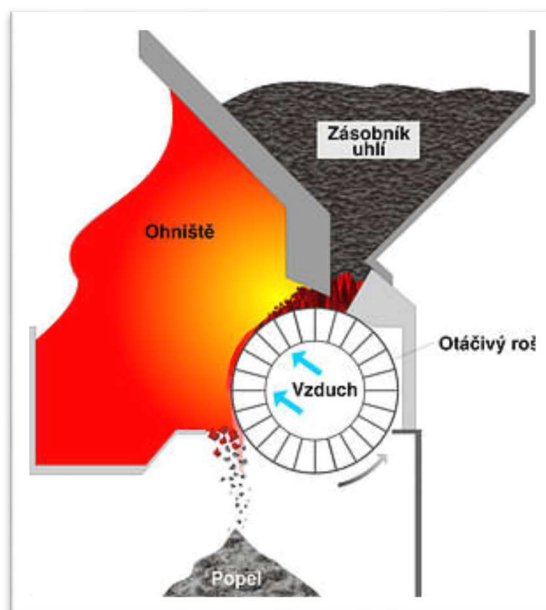
k dohořívání hořlavých složek. Konstrukce ohniště není příliš obtížná a vlastnosti paliva se výrazně nemění, a proto je jediným náročným úkolem zabezpečení dokonalého vyhoření hořlavých plynů. Dále je složité zajistit dopravu paliva. Tento systém zásobování vyžaduje zásobník paliva, zařízení pro dopravu paliva do ohniště, zabezpečení proti prohoření paliva v dopravní cestě nebo v zásobníku a komplexní regulační systém. Tyto požadavky jsou nutné pro bezpečný a spolehlivý provoz kotle, ale zároveň jsou limitující vzhledem k výběru vhodného typu a velikosti paliva. Nejvhodnějšími palivy jsou brikety, pelety nebo štěpky.

2.1.2 Kotle se systémem kontinuálního přívodu paliva

Tento typ kotlů využívá mnohem modernějšího a efektivnějšího systému kontinuálního přívodu paliva do ohniště. Ačkoli je systém pojmenován jako kontinuální, nejedná se o souvislou dodávku paliva (uhlí) do ohniště. V případě, že by bylo potřeba dodávat například 150 g/min, bylo by nutné použít velmi jemné částice. Proto se používá přetržité dodávání, které periodicky dodává potřebné množství uhlí. Proces dodávky je plně automatizován. Dopravník je spuštěn impulsem, kterým může být výstupní teplota spalin nebo vody. Existují dva typy přívodu paliva:

a) Pomocí otáčivého roštu

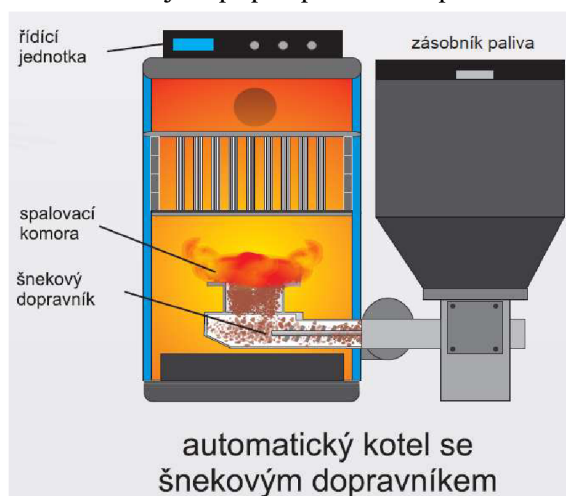
Palivo je odebíráno ze zásobníku pomalu se otáčejícím bubnovým roštem. K zapálení a vyhoření paliva dochází přímo na roštu, který pak rovnou vysype popel do popelníku. Spalovací vzduch je přiváděn středem bubnového roštu a jeho množství, stejně jako otáčky roštu, lze regulovat podle požadovaného tepelného výkonu.



Obr. 8 Kotel s otáčivým roštem [4]

b) Pomocí šnekového dopravníku

Šnekový dopravník dopravuje tříděné uhlí do retorty, kde se nachází horní vrstva paliva, která neustále hoří. Prostor nad ní je kryt keramickou klenbou, která slouží k udržení dostatečně vysoké teploty hoření. Uhlí vyhořívá v horní vrstvě a vznikající popel pomocí nepřetržitého toku paliva vypadává přes okraj horní vrstvy dolů do popelníku. Zásobníky na uhlí jsou velké a množství uhlí v nich je dostačující na více dní, stejně jako u jiných kotlů je občas nutné vyprázdnit popelníky. Provoz kotle je možné regulovat dle potřebného výkonu. To dělá obsluhu tohoto typu kotle snadnou. Tento systém má podstatně větší regulační rozsah výkonů než systém otáčivého roštu, protože uhlí v retortě zůstává žhavé po velmi dlouhou dobu.



Obr. 9 Kotel se šnekovým dopravníkem [4]

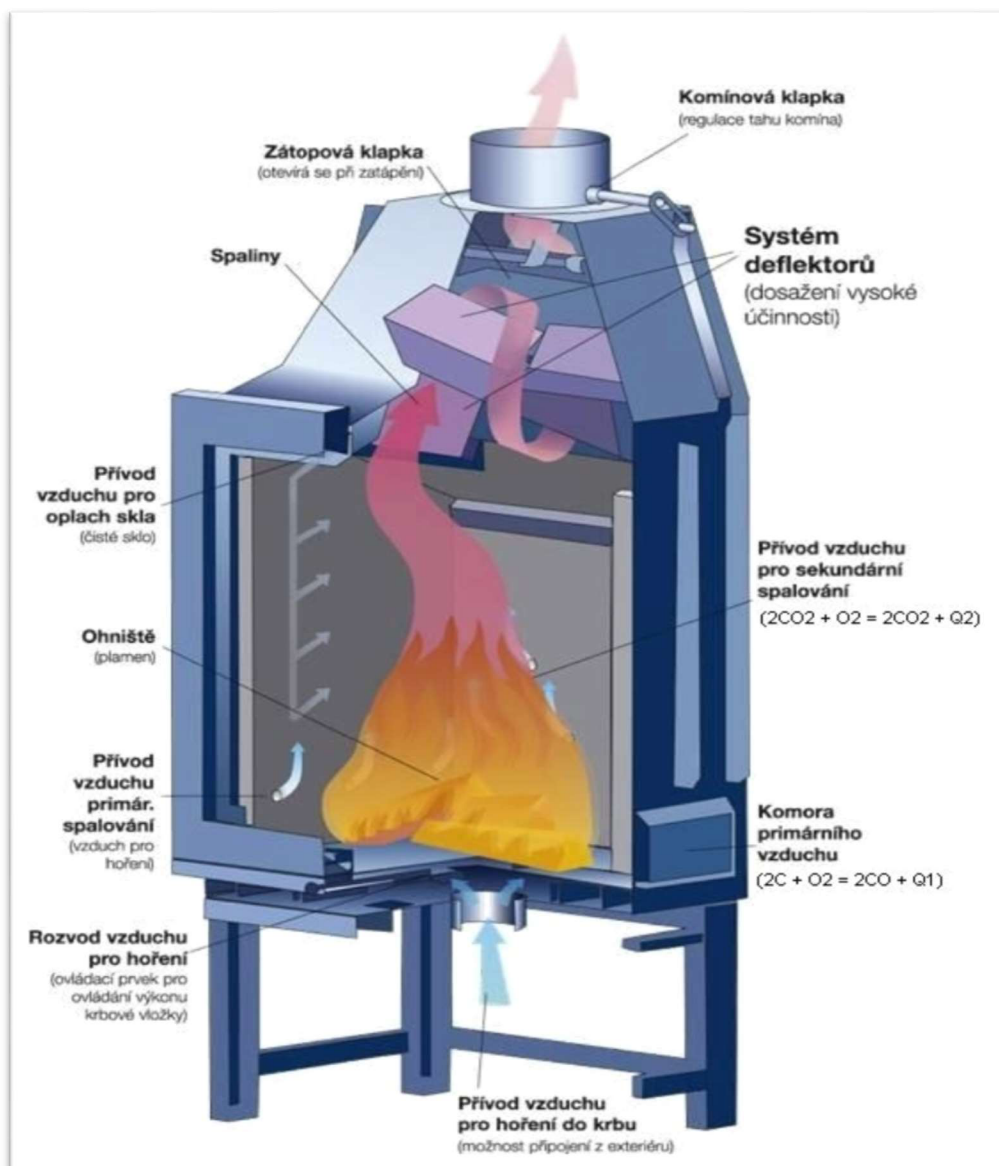
2.2 KRBOVÁ VLOŽKA STEKO VENUS 12.1

Jde o jednoplášťovou bezroštovou krbovou vložku s bezrámovým prosklením, která byla použita při měření vlivu změny paliva na účinnosti kotle. Ve vložce je umístěn systém deflektorů spalin, který zamezuje úniku vytvořeného tepla do komínu. Tento systém umožňuje dosáhnout účinnosti až 92 %.

Základní materiál použitý k výrobě kostry a venkovních částí je ocel. Topeniště je vyrobeno ze šamotu a vermikulitu. Výrobce doporučené palivo je dřevo. Maximální velikost polena je okolo 30 cm a spotřeba dřeva je asi 2 kg/h.



Obr. 10 Krbová vložka Steko Venus 12.1



Obr. 11 Schéma krbové vložky Steko Venus [10]

3 PŘEHLED LEGISLATIVNÍCH NÁROKŮ NA KOTLE NA TUHÁ PALIVA

V této kapitole se nachází shrnutí legislativních nároků na kotle na tuhá paliva do výkonu 200 kW. Jsou zde popsány obecné požadavky na kotle, emisní třídy kotlů dle ČSN EN 303-5 z roku 2012 a požadavky na ekodesign pocházející z nařízení komise EU 2015/1189 z roku 2015.

3.1 OBECNÉ POŽADAVKY NA KOTLE

Kotle jsou během provozu namáhány vysokou teplotou, proto musí být vyrobeny z nehořlavých materiálů dle EN 13501-1, musí být odolné vůči deformacím a musí být vyrobeny tak, aby:

- odolávaly namáháním vznikajícím při běžném provozu,
- nedošlo k přehřátí tepelného média v nebezpečném rozsahu (≤ 110 °C),
- spaliny neunikaly v nebezpečném množství z kotle nebo ze zařízení pro dodávku paliva nebo ze zabudovaného zásobníku do místa instalace nebo do přívodu paliva,
- plameny při běžném provozu kotle nešlehaly ven a řeřavé uhlí nevypadávalo,
- se vyloučilo nebezpečné hromadění hořlavých plynů (> 5 % CO) ve spalovací komoře a v kouřovodu

Použití hořlavých materiálů je přípustné u:

- vnitřních součástí řídicích přístrojů a bezpečnostních zařízení,
- ovládacích rukojetí,
- elektrického vybavení,
- součástí příslušenství (např. kryt hořáku)
- dodatečných nebo doplňujících vnějších optických krytů (např. dodatečný dekorativní kryt)

Konstrukční části krytů, provozních řídicích přístrojů, bezpečnostních zařízení a elektrického příslušenství musí splňovat požadavky na odolnost proti teple a ohni buď podle EN 60335-1 nebo EN 60730-1. [13]

3.2 EMISNÍ TŘÍDY

Kotle jsou řazeny do emisních tříd od 1-5 na základě výsledků spalovacích zkoušek a dalších zkoušek před uvedením na trh. Posuzuje se bezpečnost, efektivita, emise a účinnost. Kotle dosahující nejlepší výsledků se řadí to emisní třídy 5. Čím horší výsledky, tím nižší třídy. V současnosti se kotle řadí do tříd 1 a 2 již nevyrábějí a nesmějí se prodávat, protože nesplňují požadavky podle ČSN EN 303-5 z roku 2012.

Emisní třída kotle musí být uvedena v technické dokumentaci a na štítku kotle. Zkoušky a měření na jejichž základě je kotli přidělena emisní třída, probíhají za ideálních podmínek ve zkušebně. V reálném provozu není možné získat stejné hodnoty jako při zkouškách. Lze se jim však přiblížit, pokud kotel zapojíme a budeme ho provozovat za stejných podmínek, za kterých byl testován. K přiblížení těchto podmínek a dosažení co nejlepších hodnot je důležité, aby:

- byl kotel napojen na kvalitní komín s regulovatelným tahem
- otopná soustava obsahovala akumulaci nádrž pro stabilizaci odběru tepla

- bylo používáno palivo garantované výrobcem kotle
- byl kotel pravidelně udržován a kvalitně obsluhován

Tab. 3 Emisní třídy kotlů dle ČSN EN 303-5 [13]

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný výkon	Mezní hodnoty emisí								
			CO			OGC			prach		
			mg/m ³ při 10 % O ₂ ^a								
			třída	třída	třída	třída	třída	třída	třída	třída	třída
kW	3	4	5	3	4	5	3 ^b	4	5		
ruční	biopaliva	≤50	5000	1200	700	150	50	30	150	75	60
		>50 ≤150	2500			100			150		
		> 150 ≤500	1200			100			150		
	Fosilní paliva	≤50	5000	150	125						
		> 50 ≤150	2500	100	125						
		> 150 ≤500	1200	100	125						
samočinná	biopaliva	≤50	3000	1000	500	100	30	20	150	60	40
		> 50 ≤150	2500			80			150		
		> 150 ≤500	1200			80			150		
	Fosilní paliva	≤50	3000	100	125						
		> 50 ≤150	2500	80	125						
		> 150 ≤500	1200	80	125						

3.3 POŽADAVKY NA EKODESIGN

Tyto požadavky pochází z nařízení komise EU 2015/1189 ze dne 28. dubna 2015, kterým se provádí směrnice Evropského parlamentu a Rady 2009/125/ES, pokud jde o požadavky na ekodesign kotlů na tuhá paliva.

Od 1. ledna 2020 musí kotle na tuhá paliva splňovat tyto požadavky:

- sezónní energetická účinnost vytápění vnitřních prostorů u kotlů s jmenovitým tepelným výkonem 20 kW nebo menším nesmí být menší než 75 %,
- sezónní energetická účinnost vytápění vnitřních prostorů u kotlů se jmenovitým tepelným výkonem větším než 20 kW nesmí být menší než 77 %,
- sezónní emise částic z vytápění vnitřních prostorů nesmí být vyšší než 40 mg/m³ u kotlů s automatickým přikládáním a vyšší než 60 mg/m³ u kotlů s ručním přikládáním
- sezónní emise organických plynných sloučenin z vytápění vnitřních prostorů nesmí být vyšší než 20 mg/m³ u kotlů s automatickým přikládáním a vyšší než 30 mg/m³ u kotlů s ručním přikládáním
- sezónní emise oxidu uhelnatého z vytápění vnitřních prostorů nesmí být vyšší než 500 mg/m³ u kotlů s automatickým přikládáním a vyšší než 700 mg/m³ u kotlů s ručním přikládáním
- sezónní emise oxidů dusíku z vytápění vnitřních prostorů vyjádřené ekvivalentem oxidu dusičitého nesmí být vyšší než 200 mg/m³ u kotlů na biomasu a vyšší než 350 mg/m³ u kotlů na fosilní paliva.

4 MĚŘENÍ

V této kapitole jsou popsány měřené škodliviny, průběh měření a použité měřicí přístroje.

4.1 MĚŘENÍ ŠKODLIVIN

V každém spalovacím procesu, při kterém je palivo spalováno za přítomnosti vzduchu jako oksylovadla, je vyprodukováno jisté množství škodlivin. Ty jsou pak do ovzduší uvolňovány společně se spalinami. Ve spalinách je vždy obsažen dusík, který vzniká ze spalovacího vzduchu, oxid uhličitý, který je konečným produktem hoření, vodní pára obsažená v palivě a ve spalovacím vzduchu a nevyužitý vzdušný kyslík. Všechny další složky se ve spalinách vyskytují ve výrazně menším množství a některé z nich jsou označovány jako škodliviny. Mezi škodliviny, jejichž koncentrace ve spalinách je sledována patří:

a) Oxid uhelnatý (CO)

Jedná se o bezbarvý plyn bez zápachu, který vzniká nedokonalým spalováním uhlíku z paliva. Nedokonalé spalování je zapříčiněno nedostatkem spalovacího vzduchu nebo rychlým ochlazením plamene. Vzniku CO je možné omezit řízením spalovacího procesu, není však možné tomu úplně zabránit. CO se vyskytuje v ovzduší až několik měsíců, dokud nedojde k oxidaci na CO₂. Ke vzniku CO nejčastěji dochází v ohništích s periodickým spalováním, když je najednou přiložena příliš velká dávka paliva.

b) Oxid siřičitý (SO₂)

Je to bezbarvý, štiplavě páchnoucí plyn, který vzniká oxidací síry obsažené v palivu. Hlavním produktem oxidace síry je SO₂, ale vzniká taky oxid sírový (SO₃). Oxid siřičitý je schopný zoxidovat na oxid sírový, který je v ovzduší hydratován vzdušnou vlhkostí na aerosol H₂SO₄. Jestliže je ve vzduchu nedostatek prachových částic, dostává se H₂SO₄ srážkových vod a dochází ke kyselým dešťům, které uvolňují z půdy Cu, Pb, Cd a poškozují půdní mikroorganismy. Část vzniklého SO₂ se naváže na popelovinu, navázané množství lze ovlivnit vhodným spalovacím procesem, avšak záleží na poměru obsahu alkálií v popelovině ku obsahu síry v palivu. V zásadě tedy platí, že tvorba oxidů síry je dána složením uhlí a jen málo ji lze snížit vhodným řízením spalovacího procesu. Existují pouze dvě použitelné metody snižování jejich emisí. První z nich spočívá v úpravě uhlí před spalováním, při níž je uhlí zbaveno části spalitelné síry a druhá pak v odstranění vzniklých oxidů síry ze spalin. Tyto látky nebyly předmětem měření, protože se ve dřevě vyskytují ve velmi malém množství a měřicí přístroje by je buď nezaznamenaly, nebo by byl jejich podíl v celkovém množství spalin zanedbatelný.

c) Oxidy dusíku (NO_x)

Tyto látky představují směs oxidu dusnatého (NO) přibližně 90 %, oxidu dusičitého (NO₂) a oxidu dusného (N₂O). Oxidy dusíku vznikají hlavně v zařízeních s vysokými teplotami reakcí mezi atomem kyslíku a molekulou dusíku. Procesy jsou závislé na teplotě. Nejlepší způsob regulace množství oxidů dusíku je vhodné konstrukční řešení spalovacího zařízení a vhodné řízení spalovacího procesu.

d) Tuhé znečišťující látky (TZL)

Jedná se o látky proudící ve spalinách, které jsou definovány jako částice tuhého skupenství jakéhokoliv tvaru, struktury a hustoty rozptýlené v plynné fázi. Tyto látky mohou pocházet pouze z látek vstupujících do spalovacího procesu. Jde především o nedokonalé spálenou hořlavinu, popelovinu, produkty tepelného rozkladu, části spalovacího zařízení.

Jmenovitě jde o těžké kovy z popeloviny, prašné aerosoly tvořeny částicemi polokoksu, koksu, tuhých pyrolýzních zbytků a minerálních látek. TZL nebyly během pokusu měřeny.

4.2 POPIS MĚŘENÍ

Nejprve bylo nutné připravit měřící kout, kde se nacházela krbová vložka Steko Venus 12.1 a měřící přístroje. Krbová vložka byla umístěna na váhu Mettler Toledo, díky které bylo možno v průběhu měření sledovat hmotnostní úbytek paliva a určit hmotnostní tok. Na kouřovod byl nasazen měřící úsek spalín, který dokáže měřit tah, spaliny, teplotu a prach. Tah musí být regulován klapkou a ventilátorem tak, aby dosahoval hodnot daných výrobcem kamen.

Dále bylo potřeba připravit vzorky paliva. Měřeny byly tři typy paliva: bukové dřevo, smrkové dřevo a bukové brikety. Před měřením bylo nutné vzorky paliva připravit tak, abychom je mohli porovnávat. Při výběru bukového a smrkového dřeva bylo nutné dbát na to, aby měly oba vzorky přibližně stejnou hmotnost a vlhkost. Měřený vzorek se vždy skládal ze dvou polen přibližně stejné velikosti. Vlhkost byla měřena pomocí testeru vlhkosti dřeva Elbez WHT-770. Poté byla polena zbavena kůry a osekána tak, aby dohromady měla přibližně 1,7 kg. Příprava bukových briket byla jednodušší. Brikety byly opracovány tak, aby jejich hmotnost byla přibližně 1,7 kg.

Před začátkem měření bylo nutné rozehrát krbovou vložku. Po rozdělení ohně a rozhoření ohně bylo přiloženo na tenko nasekané bukové dřevo, aby se zvýšila teplota konstrukce, kouřovodu a uhlí na dně kamen. Dosažení vhodné teploty je velmi důležité pro správné spalování. Nyní bylo možné přijít k samotnému měření.

Měřený vzorek byl vložen do krbové vložky na vrstvu uhlí vzniklého při předehřívání. Všechny měřící přístroje zaznamenávaly nepřetržitě, proto bylo nutné si začátek každého měření zapsat do poznámek. Jako začátek měření byl považován moment, když začalo palivo hořet a konec měření nastal po 45 min nebo po dohoření měřeného vzorku. Celkem proběhlo šest měření, každý typ paliva byl spálen a změřen dvakrát.

Při měření koncentrace oxidu uhelnatého ve spalinách byly použity analyzátory s elektrochemickými převodníky a další doplňkové vybavení měřící objemové koncentrace složek plynů, teplotu a tlak. Všechna data byla zpracována a zaznamenána na počítač. V průběhu procesu dochází k následujícím reakcím mezi měřenou složkou plynu a elektrochemickým převodníkem:

- difuze měřené složky plynu skrz selektivně propustnou membránu,
- rozpouštění plynu v tenké vrstvě kapalinového filmu,
- difuze molekul přes kapalinový film,
- oxidačně redukční reakce na pracovní elektrodě,
- přenos elektronů na pomocnou elektrodu,
- reakce na pomocné elektrodě

4.3 POUŽITÉ MĚŘICÍ PŘÍSTROJE

a) Vlhkoměr WHT 770

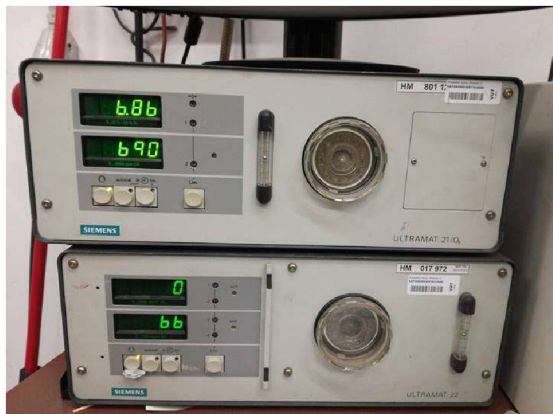
Hrotový vlhkoměr dřeva a stavebních materiálů. Rozsah měření vlhkosti dřeva 5–90 %, rozsah měření teploty 0–110 °C. Před měřením se na přístroji nastaví teplota okolí, při měření byla nastavena teplota 20°C. Měřicí hroty se zarazí nebo zatlučou do měřeného vzorku a hodnota vlhkosti se odečte na displeji. Tato hodnota je pro smrkové dřevo, pro určení vlhkosti jiných druhů dřeva je nutné použít přepočtení tabulku, která byla dodána výrobcem přístroje.



Obr. 12 Vlhkoměr WHT 770

b) Analyzátor spalin Ultramat

Přístroj určuje koncentraci kyslíku O₂ [% obj.], oxidu uhelnatého CO [ppm], oxidu siřičitého SO₂ [mg/m³] a oxidu dusnatého NO [mg/m³]. Princip je založen na infračervené a ultrafialové absorpční spektrometrii. K zapnutí přístroje dochází co nejdříve, aby došlo ke kalibraci potřebné k eliminaci případných chyb. Před analyzátozem je vložen přístroj obsahující chladič, který zbaví spaliny vlhkosti a filtr sloužící k odstranění tuhých znečišťujících látek. Ten musí být stále v činnosti, aby nedošlo k poškození analyzátoru.



Obr. 14 Analyzátor spalin Ultramat



Obr. 13 Filtrace TZL

c) Váha Mettler Toledo

Váha, pomocí které byl měřen hmotnostní tok paliva v průběhu experimentu. Měřicí maximum váhy je 600 kg a měří s přesností na 20 g.



Obr. 15 Váha Mettler toledo

5 VÝPOČTY

V této kapitole je sepsána nepřímá metoda výpočtu účinnosti kotle. Vzorce jsou nejprve uvedeny bez dosazení změřených hodnot. Na konci kapitoly je uveden názorný výpočet, který byl proveden ve výpočetním softwaru PTC Mathcad.

5.1 VÝPOČET MINIMÁLNÍHO MNOŽSTVÍ VZDUCHU

- **Minimální potřebné množství kyslíku**

Pro celkovou spotřebu kyslíku při dokonalém spalování 1 kg paliva platí vztah zahrnující součet dílčích potřeb jednotlivých složek paliva.

$$V_{O_2min} = \frac{22,39}{100} \times \left(\frac{C}{12,01} + \frac{H}{4,032} + \frac{S}{32,03} - \frac{O}{32} \right) \quad [m^3 \text{ n/kg}] \quad (4.1)$$

kde C, H, S, O [-] obsah prvku v palivu

- **Minimální množství suchého vzduchu**

$$V_{SVZmin} = \frac{100}{21} \times V_{O_2min} \quad [m^3 \text{ n/kg}] \quad (5.1)$$

- **Součinitel vlhkosti vzduchu**

Při spalování je nasáván atmosférický vzduch, který obsahuje určité množství vodní páry, která zvětšuje objem vzduchu. Faktor vyjadřující poměrné zvětšení objemu suchého vzduchu o objem vodní páry je závislý na teplotě vzduchu a relativní vlhkosti.

$$f = 1 + \varphi \times \frac{p''}{p_c - \varphi \times p''} \quad [-] \quad (6.1)$$

kde φ [%] relativní vlhkost vzduchu, volím $\varphi = 0,7$

p'' [Pa] absolutní tlak vodní páry na mezi sytosti pro teplotu 20 °C,
volím $p = 2490$ Pa

p_c [kPa] celkový absolutní tlak vlhkého vzduchu, volím $p_c = 98100$ Pa.

- **Minimální množství vlhkého vzduchu**

$$V_{VZmin} = f \times V_{SVZmin} \quad [m^3 \text{ n/kg}] \quad (7.1)$$

- **Minimální množství vzduchu za reálných podmínek**

Všechny předešlé výpočty jsou vztaženy k normálnímu fyzikálnímu stavu a k hmotnosti 1 kg. Je nutné přepočítat objem vzduchu za reálných podmínek pomocí stavových rovnic.

$$V_{rVZmin} = V_{VZmin} \times \frac{t_{ok} + 273,15}{273,15} \times \frac{p_{atm}}{p_{spvz}} \times M_{pal} \quad [m^3/kg] \quad (8.1)$$

kde	M_{pal}	[kg/hod]	hmotnostní tok paliva,
	p_{atm}	[Pa]	atmosférický tlak, ($p_{atm}=101325$ Pa),
	p_{vz}	[Pa]	tlak vzduchu.

5.2 VÝPOČET MINIMÁLNÍHO MNOŽSTVÍ SPALIN

- **Minimální objem SO₂ ve spalinách**

$$V_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \times \frac{S}{100} \quad [m^3/kg] \quad (8.1)$$

- **Minimální objem N₂ ve spalinách**

$$V_{N_2} = \frac{22,4}{28,016} \times \frac{N}{100} + 0,7805 \times V_{VZmin}^S \quad [m^3/kg] \quad (9.1)$$

- **Minimální objem A^r ve spalinách**

$$V_{Ar} = 0,0092 \times V_{VZmin}^S \quad [m^3/kg] \quad (10.1)$$

- **Minimální objem suchých spalin**

$$V_{SSPmin} = V_{Ar} + V_{CO_2} + V_{N_2} + V_{SO_2} \quad [m^3/kg] \quad (11.1)$$

- **Minimální objem vodní páry**

$$V_{H_2O} = \frac{44,8}{4,032} \times \frac{H}{100} + \frac{22,4}{18,015} \times \frac{W}{100} + (f - 1) \times V_{SVZmin} \quad [m^3/kg] \quad (12.1)$$

- **Minimální objem vlhkých spalin**

$$V_{SPmin} = V_{SSPmin} + V_{H_2O} \quad [m^3/kg] \quad (13.1)$$

- **Přebytek vzduchu na konci ohniště**

$$\alpha = \frac{21}{21 - O_2} \quad [-] \quad (14.1)$$

- **Skutečné množství vlhkých spalin**

$$V_{SP} = V_{SPmin} + (\alpha - 1) \times V_{VZmin} \quad [m^3/kg] \quad (15.1)$$

- **Minimální množství vlhkých spalin za reálných podmínek**

$$V_{rSPmin} = V_{SP} \times \frac{t_{sp}}{273,15} \times \frac{p_{atm}}{p_{sp}} M_{pal} \quad [m^3/kg] \quad (16.1)$$

kde p_{sp} [Pa] tlak spalin.

5.3 VÝPOČET ÚČINNOSTI

Účinnost η se stanoví odečtením poměrných ztrát

$$\eta = 100 - (q_a + q_b + q_r) \quad [\%] \quad (17.1)$$

kde q_a [%] ztráta citelným teplem,
 q_b [%] ztráta plynným nedopalem,
 q_r [%] ztráta mechanickým nedopalem

- **Poměrné ztráty citelným nedopalem**

Ztráty citelným teplem spalin Q_a

$$Q_a = (t_{sp} - t_{ok}) \times \left[\frac{(c_{pmd} \times (C - C_r))}{[0,536 \times (CO + CO_2)]} + \left[\frac{c_{pm} \cdot 20 \times 1,224 \times (9 \times H + W)}{100} \right] \right] \quad [\text{kJ/kg}] \quad (18.1)$$

kde t_{sp} [°C] teplota spalin na výstupu kotle,

t_{ok} [°C] teplota okolního vzduchu.

Výhřevnost H_u :

$$H_u = 33910 \times C^r + 120850 \times \left(H^r - \frac{O^r}{8} \right) + 10470 \times S^r - 2453 \times W^r \quad [\text{kJ/kg}] \quad (19.1)$$

Poměrné ztráty citelným teplem spalin:

$$q_a = \frac{Q_a}{H_u} \times 100 \quad [\%] \quad (20.1)$$

- **Poměrné ztráty plynným nedopalem**

Ztráty plynným nedopalem:

$$Q_b = \frac{12644 \times CO \times (C - C_r)}{[0,536 \times (CO_2 + CO) \times 100]} \quad [\text{kJ/kg}] \quad (21.1)$$

Poměrné ztráty plynným nedopalem:

$$q_b = \frac{Q_b}{H_u} \times 100 \quad [\%] \quad (22.1)$$

- **Poměrné ztráty mechanickým nedopalem**

Ztráty mechanickým nedopalem

$$Q_r = \frac{335 \times A^r \times b}{100} \quad [\text{kJ/kg}] \quad (23.1)$$

kde A^r [%] obsah popeloviny,

b [%] množství uhlíku obsaženého v tuhých zbytcích paliva.

Poměrné ztráty mechanickým nedopalem:

$$q_r = \frac{Q_r}{H_u} \times 100 \quad [\text{kJ/kg}] \quad (24.1)$$

- **Střední měrná kapacita spalin:**

$$C_{pmd} = 3,6 \cdot \left[\begin{array}{l} 0,361 + 0,008 \cdot \left(\frac{t_{sp}}{1000} \right) + 0,034 \cdot \left(\frac{t_{sp}}{1000} \right)^2 \\ + \left(0,085 + 0,19 \cdot \left(\frac{t_{sp}}{1000} \right) - 0,14 \cdot \left(\frac{t_{sp}}{1000} \right)^2 \right) \cdot \left(\frac{CO_2}{100} \right) \\ + \left(0,03 \cdot \left(\frac{t_{sp}}{1000} \right) - 0,2 \cdot \left(\frac{t_{sp}}{1000} \right)^2 \right) \cdot \left(\frac{CO_2}{100} \right) \end{array} \right] \quad [\text{kJ/K.m}^3] \quad (25.1)$$

- **Střední měrná kapacita vodní páry:**

$$C_{pmH_2O} = 3,6 \times \left(0,414 + 0,038 \times \left(\frac{t_{sp}}{1000} \right) + 0,034 \times \left(\frac{t_{sp}}{1000} \right)^2 \right) \quad [\text{kJ/m}^3] \quad (26.1)$$

- **Redukovaný hmotnostní podíl uhlíku v nespálených zbytcích:**

$$C_r = A^r \times \frac{b}{100} \quad [\%] \quad (27.1)$$

- **Koncentrace CO**

Množství CO [%] ve spalinách v závislosti na množství O₂

$$CO = CO_{prům} \times \frac{21 - O_{2stand}}{21 - O_{2prům}}$$

kde O_{2stand} [%] standardizované množství kyslíku (11 %)

O_{2prům} [%] průměrné množství O₂ v průběhu měření

5.4 VZOROVÝ VÝPOČET

Tento výpočet byl proveden ve výpočetním programu PTC Mathcad. Jako vzorový příklad byl zvolen výpočet účinnosti kotle při topení bukovým dřevem.

Bukové dřevo 7,33 % vlhkost

$$\begin{array}{llll}
 C := 44.57 & b := 24.38 & t_{sp} := 282.121 & O_2 := 10.67 \\
 H := 5.93 & A := 0.52 & & M_{pal} := 1.84 \\
 O := 41.57 & \phi := 0.7 & t_{ok} := 23.873 & p_{spal} := 102196 \\
 N := 0.08 & p := 2490 & & \\
 S := 0.001 & p_c := 98100 & W := 7.33 &
 \end{array}$$

Minimální potřebné množství kyslíku:

$$V_{O2min} := \frac{22.39}{100} \cdot \left(\frac{C}{12.01} + \frac{H}{4.032} + \frac{S}{32.03} - \frac{O}{32} \right) = 0.869 \quad [m^3 / kg]$$

Minimální množství suchého vzduchu

$$V_{SVZmin} := \frac{100}{21} \cdot V_{O2min} = 4.14 \quad [m^3 / kg]$$

Minimální množství SO₂ ve spalinách:

$$V_{SO2min} := \frac{21.89}{32.06} \cdot \frac{S}{100} = 6.828 \cdot 10^{-6} \quad [m^3 / kg]$$

Minimální množství N₂ ve spalinách:

$$V_{N2min} := \frac{22.4}{28.016} \cdot \frac{N}{100} + 0.7805 \cdot V_{SVZmin} = 3.232 \quad [m^3 / kg]$$

Minimální množství A(r) ve spalinách

$$V_{Armin} := 0.0092 \cdot V_{SVZmin} = 0.038 \quad [m^3 / kg]$$

Minimální objem CO₂ ve spalinách

$$V_{CO2min} := \frac{22.26}{12.01} \cdot \frac{C}{100} + 0.03 \cdot V_{SVZmin} = 0.95 \quad [m^3 / kg]$$

Minimální objem suchých spalin:

$$V_{SSPmin} := V_{CO2min} + V_{N2min} + V_{SO2min} + V_{Armin} = 4.22 \quad [m^3 / kg]$$

Součinitel vlhkosti vzduchu

$$f := 1 + \phi \cdot \frac{p}{p_c - \phi \cdot p} = 1.018 \quad [-]$$

Minimální objem vodní páry:

$$V_{H_2O} := \frac{44.8}{4.032} \cdot \frac{H}{100} + \frac{22.4}{18.015} \cdot \frac{W}{100} + (f-1) \cdot V_{SVZmin} = 0.825 \quad [m^3 / kg]$$

Minimální objem vlhkých spalin

$$V_{VSPmin} := V_{SSPmin} + V_{H_2O} = 5.045 \quad [m^3 / kg]$$

Přebytek vzduchu na konci ohniště

$$\alpha := \frac{21}{21 - O_2} = 2.033 \quad [-]$$

Skutečné množství vlhkých spalin

$$V_{SPskut} := V_{VSPmin} + (\alpha - 1) \cdot V_{SVZmin} = 9.321 \quad [m^3 / kg]$$

Skutečný objem CO₂ ve spalinách za nominálních podmínek

$$V_{nCO_2} := V_{CO_2min} + (\alpha - 1) \cdot \frac{0.03}{100} \cdot V_{SVZmin} = 0.952 \quad [m^3 / kg]$$

Přepočítání na reálné podmínky

$$V_{rCO_2} := V_{nCO_2} \cdot \frac{t_{sp} + 273.15}{273.15} \cdot \frac{101325}{p_{spal}} \cdot M_{pal} = 3.529 \quad [m^3 / kg]$$

Přepočítání na objemové koncentrace:

$$CO_2 := \frac{V_{CO_2min}}{V_{SPskut}} = 0.102 \quad [\%] \quad \text{Účinnost}$$

Střední měrná tepelná kapacita spalin

$$C_{pmd1} := 3.6 \cdot \left(0.361 + 0.008 \cdot \left(\frac{t_{sp}}{1000} \right) + 0.034 \cdot \left(\frac{t_{sp}}{1000} \right)^2 \right)$$

$$C_{pmd2} := 3.6 \cdot \left(\left(0.085 + 0.19 \cdot \left(\frac{t_{sp}}{1000} \right) - 0.14 \cdot \left(\frac{t_{sp}}{1000} \right)^2 \right) \cdot \frac{CO_2}{100} \right)$$

$$C_{pmd3} := 3.6 \cdot \left(\left(0.03 \cdot \frac{t_{sp}}{1000} - 0.2 \cdot \left(\frac{t_{sp}}{1000} \right)^2 \right) \cdot \frac{CO_2}{100} \right)$$

$$C_{pmd} := C_{pmd1} + C_{pmd2} + C_{pmd3} = 1.348 \quad [kJ / kg]$$

$$r := 1$$

Redukovaný hmotnostní podíl uhlíku v nespálených zbytcích:

$$C_r := A^r \cdot \frac{b}{100} = 0.127 \quad [\%]$$

Střední tepelná kapacita vody:

$$C_{pmH_2O} := 3.6 \cdot \left(0.414 + 0.038 \cdot \left(\frac{t_{sp}}{1000} \right) + 0.034 \cdot \left(\frac{t_{sp}}{1000} \right)^2 \right) = 1.539 \quad [\%]$$

$$CO_{prům} := 0.1735 \quad O_{2prům} := O_2 \quad O_{2stand} := 11$$

Koncentrace CO:

$$CO := CO_{prům} \cdot \frac{21 - O_{2stand}}{21 - O_{2prům}} = 0.168 \quad [\%]$$

Výhřevnost paliva

$$H_u := 33910 \cdot C + 120580 \cdot \left(\frac{H}{100} - \frac{O}{8} \right) + 10470 \cdot S - 2453 \cdot W = 8.74 \cdot 10^5 \quad [m^3 / kg]$$

Ztráty citelným teplem:

$$Q_a := (t_{sp} - t_{ok}) \cdot \left(\left(\frac{C_{pmd} \cdot (C - C_r)}{0.536 \cdot (CO + CO_2)} \right) + \left(\frac{C_{pmH_2O} \cdot 1.224 \cdot (9 \cdot H + W)}{100} \right) \right) = 1.073 \cdot 10^5 \quad [kJ/kg]$$

Poměrné ztráty citelným teplem:

$$q_a := 100 \cdot \frac{Q_a}{H_u} = 12.273 \quad [\%]$$

Ztráty plynným nedopalem

$$Q_b := \frac{12644 \cdot CO \cdot (C - C_r)}{(0.536 \cdot (CO_2 + CO) \cdot 100)} = 6.524 \cdot 10^3 \quad [kJ/kg]$$

Poměrné ztráty plynným nedopalem:

$$q_b := 100 \cdot \frac{Q_b}{H_u} = 0.746 \quad [\%]$$

Ztráty mechanickým nedopalem

$$Q_r := \frac{335 \cdot A^r \cdot b}{100} = 42.47 \quad [kJ/kg]$$

$$q_r := 100 \cdot \frac{Q_r}{H_u} = 0.005$$

Účinnost

$$\eta := 100 - q_a - q_b - q_r = 86.975 \quad [\%]$$

6 ZPRACOVÁNÍ MĚŘENÍ

V této kapitole je graficky znázorněno množství měřených látek ve spalinách v průběhu procesu spalování. Dále je zde prvkový rozbor paliva, který byl určen dle databáze Phyllis 2 a vyhodnocení účinnosti pro všechny měřené typy paliv.

6.1 PRVKOVÝ ROZBOR

Databáze Phyllis 2 umožňuje určit prvkové složení paliva. Nejdříve je nutné v databázi najít palivo, které odpovídá měřenému vzorku. Poté se zadá vlhkost do databáze, ta určí množství kyslíku, uhlíku, vodíku, dusíku, síry v palivu. V databázi bylo rovněž dohledáno množství popeloviny A^r [%] a množství uhlíku obsaženého v tuhých zbytcích paliva b [%].

Tab. 4 Prvkové složení paliva [14]

Palivo	Smrkové dřevo	Bukové brikety	Bukové dřevo
Prvek			
W [%]	7,7	5,7	7,33
C [%]	45,22	48,12	44,57
O [%]	40,68	40,07	41,57
H [%]	5,57	5,85	5,93
N [%]	0,1	0,09	0,08
S [%]	0,03	0,01	0,001
A^r [%]	2,41	0,28	0,52
b [%]	14,64	38,17	24,38

6.2 KONCENTRACE MĚŘENÝCH LÁTEK VE SPALINÁCH

Následující grafy ukazují koncentraci měřených látek obsažených ve spalinách v průběhu měření. Každý druh dřeva byl spálen a změřen dvakrát, stejné druhy byly měřeny po sobě. Interval měření byl stanoven na 45 min. V případě smrkového dřeva bylo nutné prodloužit interval asi o 10 min, protože po uplynutí 45 min ještě nebylo spáleno dostatečné množství paliva a stále probíhal proces hoření.

Množství spalného kyslíku obsaženého ve spalinách bylo zaznamenáno v [%], ale hodnoty oxidu uhelnatého a oxidu dusnatého byly zaznamenávány v [mg/m^3]. Proto bylo nutné provést přepočty na [%]. Přepočty byly provedeny následujícími vzorci:

$$CO_{prům} = \frac{V_{CO} \times \rho_{CO}}{10^6} \times 100 \quad [\%] \quad (28.1)$$

kde $CO_{prům}$ [%] průměrné množství oxidu uhelnatého,
 V_{CO} [mg/m^3] naměřené množství oxidu uhelnatého,
 ρ [kg/m^3] hustota.

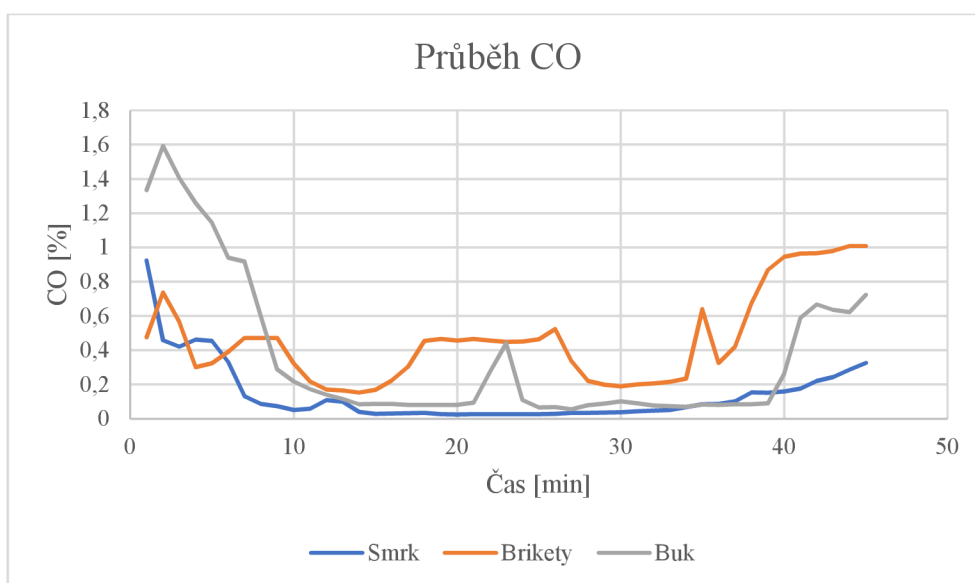
Stejný postup byl použit při určování $NO_{prům}$.

K určení koncentrace CO a NO ve spalinách byl použit vzorec:

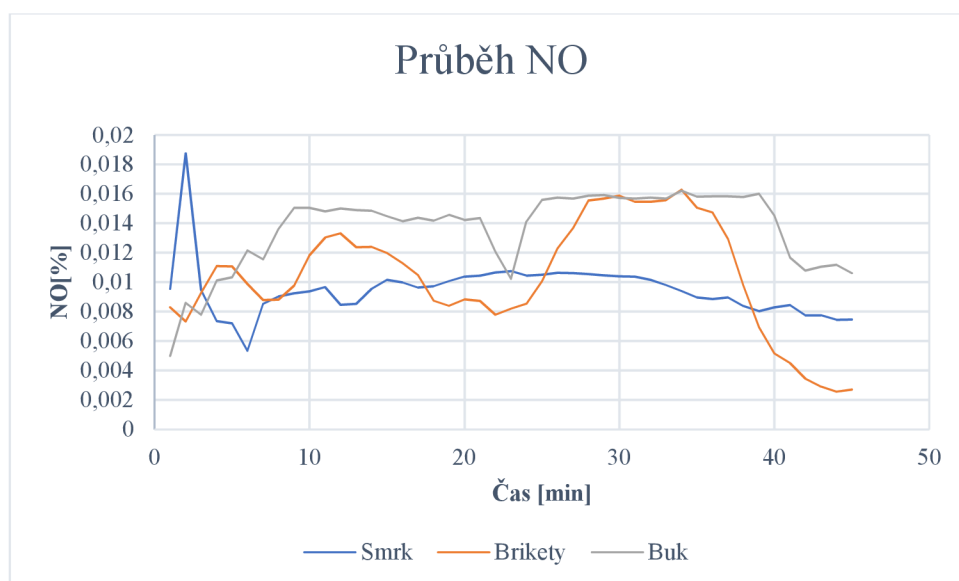
$$CO = CO_{prům} \times \frac{(21 - O_{2stand})}{(21 - O_{2prům})} \quad [\%] \quad (29.1)$$

kde CO [%] koncentrace CO ve spalinách,
 O_{2stand} [%] standardizovaný obsah O_2 , $O_{2stand} = 11\%$,
 $O_{2prům}$ [%] množství O_2 ve spalinách v průběhu měření.

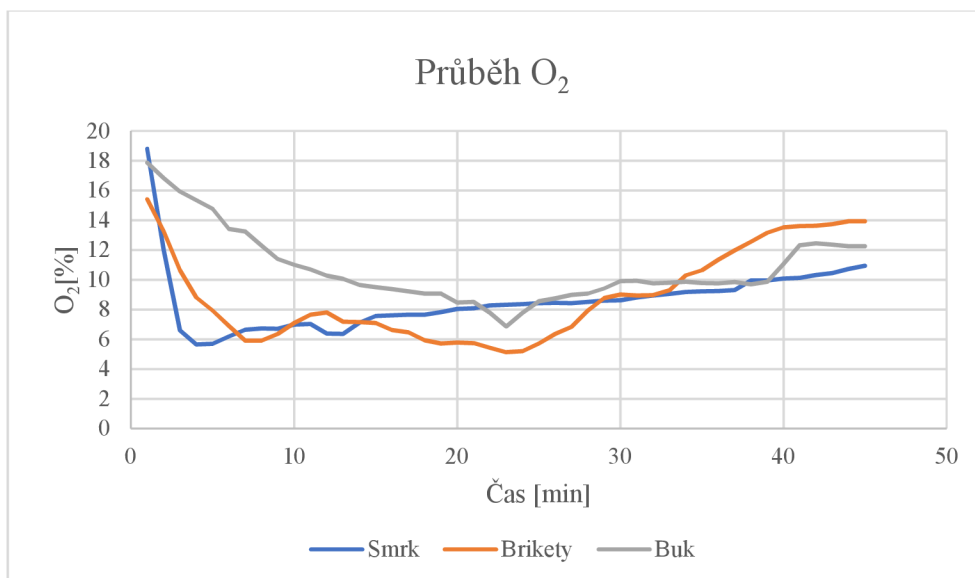
Koncentrace CO, NO a O_2 při měření první sady paliv:



Obr. 16 Koncentrace CO v průběhu spalování

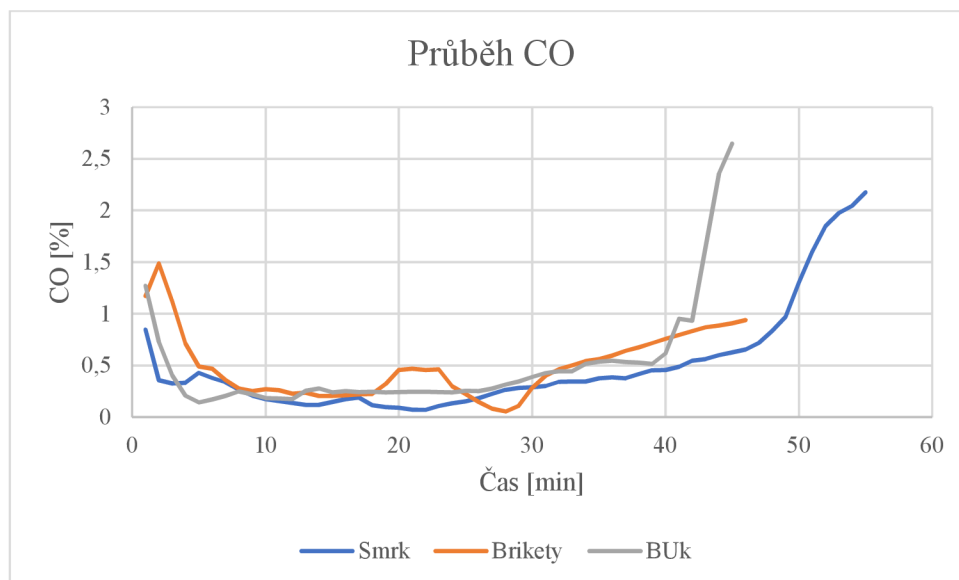


Obr. 17 Koncentrace NO v průběhu měření

Obr. 18 Koncentrace O₂ v průběhu měření

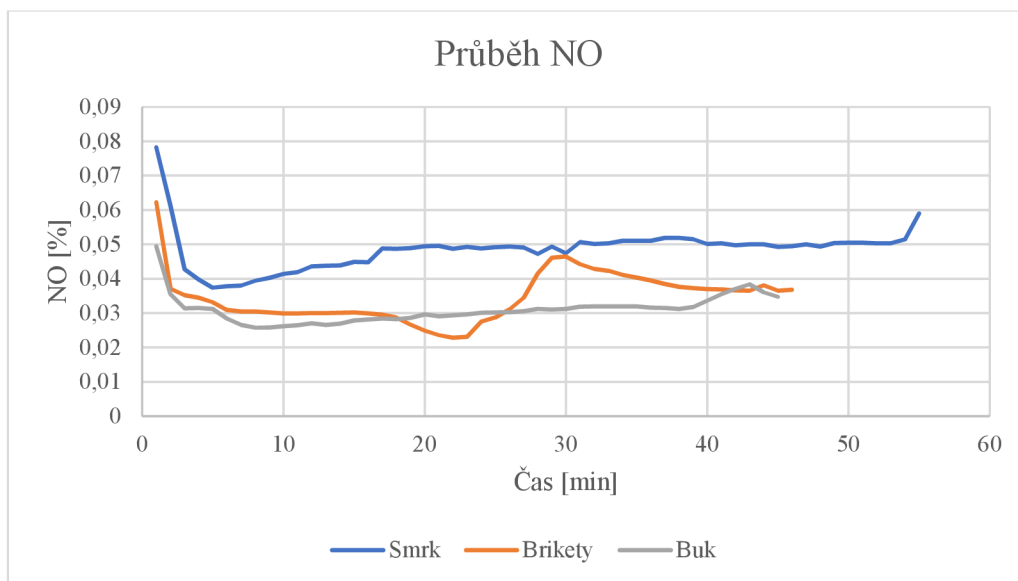
Nejnižších hodnot emisí CO a NO dosahuje v případě měření první sady paliv smrkové dřevo, které dosáhlo nejvyšších hodnot účinnost. Největší množství emisí CO bylo vyloučeno z bukových briket, největší množství emisí NO bylo vyloučeno z bukového dřeva. Zároveň byla při jeho spalování naměřena nejvyšší koncentrace spalného kyslíku.

Koncentrace CO, NO a O₂ při měření druhé sady paliv:

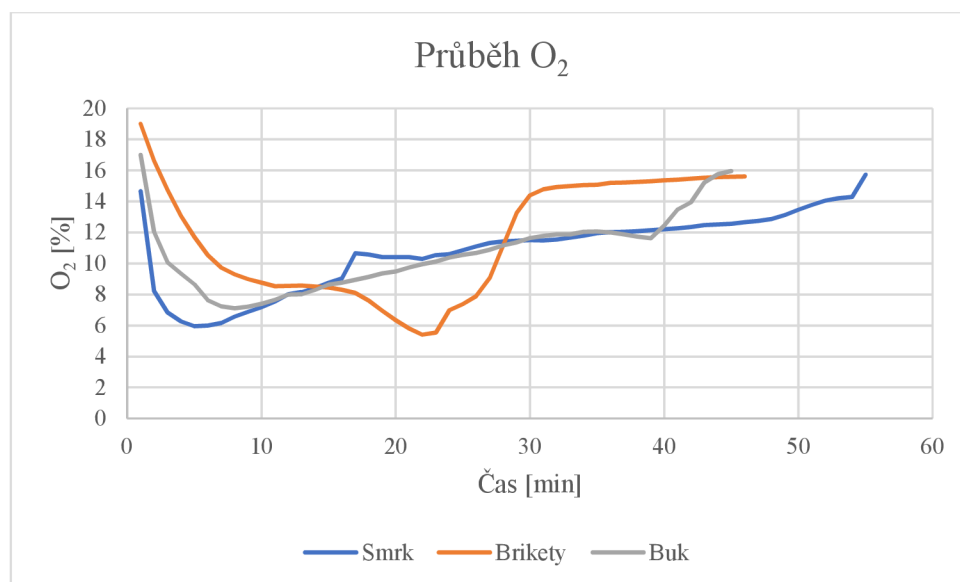


Obr. 19 Koncentrace CO v průběhu měření

Průběh vylučování CO při měření druhé sady paliv byl mnohem vyrovnanější než v případě sady první. Z Obr. 19 vyplývá, že nejnižší množství CO bylo opět vyloučeno ze smrkového dřeva.



Obr. 20 Koncentrace NO v průběhu měření

Obr. 21 Koncentrace O₂ v průběhu měření

Nejvíce emisí NO bylo vyloučeno ze smrkového dřeva, nejméně z bukového. Koncentrace O₂ ve spalinách byla při měření druhé sady dřeva přibližně stejná pro smrkové a bukové dřevo, koncentrace O₂ byla oproti smrkovému a bukovému dřevu zpočátku vyšší, mezi 15. a 25. minou výrazně poklesla a poté se opět navýšila.

6.3 ÚČINNOST

Účinnost byla vypočtena nepřímou metodou, tedy od 100 % byly odečteny ztráty citelným teplem neboli komínová ztráta, dále byly odečteny ztráty plynným a mechanickým nedopalem. Pro metodu nepřímého výpočtu účinnosti bylo nutné měřit mimo koncentrací spalin také hmotnostní tok paliva M_{pal} , teplotu spalin t_{sp} , teplotu okolí t_{ok} a tlak spalin p_{spal} .

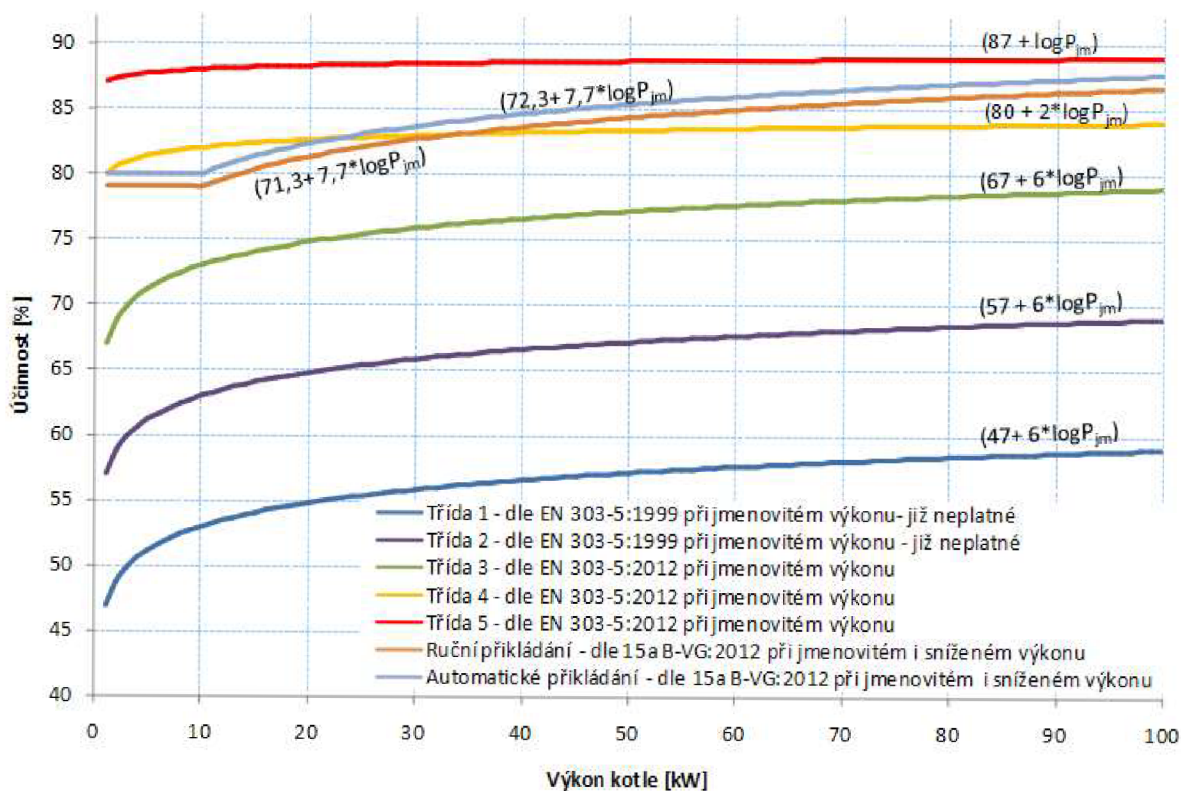
Tab. 5 Hmotnostní tok, tlak spalin, teplota okolí, teplota spalin, účinnost

Palivo	Smrkové dřevo		Bukové dřevo		Bukové brikety	
	1.	2.	3.	4.	5.	6.
Pořadí měření						
M_{pal} [kg/h]	1,68	1,84	1,84	1,71	2,11	2,05
p_{spal} [Pa]	102106	102307	102196	102276	102357	102399
t_{ok} [°C]	23,20	23,52	23,87	24,53	24,91	23,71
t_{sp} [°C]	195,83	225,13	282,12	280,38	281,63	280,92
η [%]	91,26	90,12	86,98	87,12	88,34	87,74

Měření smrkového dřeva proběhlo jako první, když ještě nebyla krbová vložka dostatečně rozehrátá, jak můžeme vidět na teplotě spalin, která je o téměř 90 °C nižší než u měření s pořadovými čísly 3 až 6. Maximální účinnost kotle uváděná výrobcem je 92 %. K této hodnotě se nejvíce blíží výsledek prvního měření účinnosti, která dosáhla 91,26 %. To je způsobeno velmi nízkou teplotou spalin, díky čemuž je nízká i komínová ztráta. Při druhém měření účinnosti bylo dosaženo vysoké hodnoty účinnosti 90,12 %. Hodnotami přes 90 % se krbová vložka nachází při jmenovitém výkonu 8 kW v emisní třídě 5. Viz Obr. 22 na další straně.

Při měření účinnosti bukového dřeva bylo dosaženo dvou nejnižších hodnot účinnosti. Byly naměřeny hodnoty 86,98 % a 87,12 %, které se nachází těsně pod hranicí emisní třídy 5. Tedy v emisní třídě 4.

Bukové brikety měly ze všech paliv nejnižší vlhkost 5,7 %, ale hodnotami účinnosti zaostaly za smrkovým dřevem asi o 3 %. Hodnoty účinnosti 88,34 % a 87,74 % se pro daný jmenovitý výkon 8 kW pohybují nad hranicí emisní třídy 5.



Obr. 22 Graf určující emisní třídu [3]

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo posoudit vliv druhu paliva na účinnost kotle. V první kapitole byly popsány základní vlastnosti tuhých paliv. Dále byla tuhá paliva rozdělena na uhlí a biomasu. Následně byly popsány a porovnány nejdůležitější vlastnosti těchto paliv. V kategorii uhelných paliv bylo velmi důležité geologické stáří. Nejstarší paliva patří k nejkvalitnějším. V kategorii biomasy bylo provedeno základní rozdělení na dřevní a nedřevní biomasu. Byly popsány vlastnosti smrkového dřeva, bukového dřeva a bukových briket, které byly z hlediska této práce nejdůležitější, protože byly vybrány za zkušební vzorky.

Druhá kapitola se zabývá rozdělením kotlů na tuhá paliva. Kotle byly rozděleny na ty s velkoobjemovým ohništěm s manuálním přiřkládáním dřeva a na kotle s kontinuálním přísunem paliva. Kotle s kontinuálním přísunem paliva jsou drahé, ale jejich účinnost je mnohem vyšší než u kotlů s velkoobjemovým ohniště. Dále zde byla popsána krbová vložka Steko Venus 12.1, ve které probíhalo spalování paliv. V další kapitole byly sepsány legislativní nároky na kotle z normy ČSN EN 303-5:2012 a z nařízení komise EU 2015/1189 ze dne 28. dubna 2015, kterým se provádí směrnice Evropského parlamentu a Rady 2009/125/ES.

Ve čtvrté kapitole je popsáno měření škodlivin a průběh měření. Dále je zde popis měřicích přístrojů.

V následující kapitole je popis nepřímé metody měření účinnosti kotle. Jsou zde uvedeny rovnice a vzorce použité při výpočtech ve výpočetním softwaru PTC Matchcad. Na konci kapitoly je ukázka výpočtu účinnosti.

V poslední kapitole jsou zpracovány výsledky měření. Hodnoty vypouštěných emisí oxidu uhelnatého a oxidu dusnatého jsou vyneseny do grafů. Nejmenší množství emisí bylo vyloučeno ze smrkového dřeva, naopak největší množství emisí bylo vyloučeno z bukového dřeva. Hodnoty emisí bukových briket se blíží spíše k hodnotám bukového dřeva. Nejvyšší hodnoty účinnosti 91,26 % a 90,12 % byly vypočteny pro smrkové dřevo. Tyto hodnoty téměř dosahují maximální účinnosti 92 % dané výrobcem krbové vložky Steko Venus 12.1. Druhé nejvyšší hodnoty účinnosti 88,34 % a 87,74 %, což je o přibližně 4 % méně než maximální účinnost krbové vložky, byly vypočteny pro bukové brikety. Nejnižší hodnoty účinnosti 86,96 % a 87,12 byly vypočteny pro bukové dřevo. Celkově nejlepších výsledků dosáhlo smrkové dřevo, které mělo nejvyšší účinnost téměř a bylo z něj uvolněno nejmenší množství palin oxidu uhelnatého. To však neznamená, že je smrkové dřevo nejlepší volbou pro ústřední vytápění. Smrkové dřevo je vhodné pro zatápění nebo pro rychlé vytopení místnosti. Z pohledu obsluhy je však výhodnější po roztopení přiřkládat některými z tvrdších dřev jako je bukové nebo dubové dřevo. Při plném naložení roštového kotle tvrdým dřevem a vhodném nastavení tahu, stačí přiřkládat přibližně 4x denně. V případě celodenního topení smrkovým dřevem byla náročnost na obsluhu kotle vyšší.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BALÁŠ, Marek. *Kotle a výměníky tepla*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, c2009. Učební texty vysokých škol. ISBN 978-80-214-3955-9.
- [2] HORÁK, Jiří, František HOPAN, Kamil KRPEC, et al. *Stanovení účinnosti kotlů* [online]., 11 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/11107-standoveni-ucinnosti-kotlu>
- [3] HORÁK, Jiří, Lubomír MARTINÍK, Kamil KRPEC, Petr KUBESA, Jiří DVOŘÁK, František HOPAN a Zuzana JANKOVSKÁ. *Jaké parametry musí splnit kotle na tuhá paliva? Legislativa v ČR a Evropě* [online]., 12 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/9665-jake-parametry-musi-splnit-kotle-na-tuha-paliva-legislativa-v-cr-a-evrope>
- [4] HORÁK, Jiří, Petr KUBESA, František HOPAN, Kamil KRPEC a Zdeněk KYSUČAN. *Co nejvíce ovlivní Tvůj kour?* [online], 5 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/9475-co-nejvice-ovlivni-tvuj-kour>
- [5] LYČKA, Zdeněk. *Malé teplovodní kotle na pevná paliva: spalování pevných paliv po roce 2013*. Krnov: LING Vydavatelství, 2012. ISBN 978-80-904914-2-7.
- [6] MALAŤÁK, Jan a Petr VACULÍK. *Biomasa pro výrobu energie*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008. ISBN 978-80-213-1810-6.
- [7] MURTINGER, Karel a Jiří BERANOVSKÝ. *Energie z biomasy*. Brno: ERA, 2006. 21. století. ISBN 80-7366-071-7.
- [8] PASTOREK, Zdeněk, Jaroslav KÁRA a Petr JEVIČ. *Biomasa: obnovitelný zdroj energie*. Praha: FCC Public, 2004. ISBN 80-86534-06-5.
- [9] ROUBÍČEK, Václav a Jaroslav BUCHTELE. *Uhlí: zdroje, procesy, užití*. Ostrava: Montanex, 2002. Odborné publikace. ISBN 80-7225-063-9.
- [10] STEKO VENUS 12.1 W s klapkou. *Krbová-Kamna* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <https://www.krbova-kamna.com/steko-venus-12-1-w-s-klapkou-p.html>
- [11] VILIMEC, Ladislav. *Stavba kotlů*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2002. ISBN 80-248-0076-4.
- [12] VILIMEC, Ladislav. *Stavba kotlů*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2002. ISBN 80-7078-681-7.
- [13] ČSN EN 303-5:2012: *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*. CEN, 2013.

[14] *Phyllis2 – Database for biomass and waste* [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <https://www.ecn.nl/phyllis2/>

[15] NOSKIEVIČ, Pavel, Jan KOLONIČNÝ a Tadeáš OCHODEK. *Malé zdroje znečišťování* [online]. Ostrava: VŠB - Technická univerzita v Ostravě - Výzkumné energetické centrum, 2004 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.mpo-efekt.cz/dokument/4215.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

Značka	Název veličiny	Jednotka
α	Příbytek vzduchu na konci ohně	[-]
A^r	obsah popeloviny	[%]
b	Množství uhlíku obsaženého v tuhých zbytcích paliva	[%]
C	Hmotnostní podíl uhlíku ve zkušebním palivu	[%]
CO	Objemová koncentrace oxidu uhelnatého v suchých spalinách	[%]
$CO_{prům}$	Průměrná objemová koncentrace oxidu uhelnatého v suchých spalinách	[%]
CO_2	Objemová koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách	[%]
C_{pmd}	Střední měrná tepelná kapacita suchých spalin při srovnávacích podmínkách v závislosti na teplotě	[kJ/kg.m ³]
C_{pmh2o}	Střední měrná tepelná kapacita vodní páry při srovnávacích podmínkách v závislosti na teplotě	[kJ/kg.m ³]
C_r	Redukovaný hmotnostní podíl uhlíku v pevných zbytcích spalování	[%]
f	Součinitel vlhkosti vzduchu	[-]
φ	Relativní vlhkost vzduchu	[-]
G	Hmotnost paliva	[kg]
H	Hmotnostní podíl vodíku ve zkušebním palivu	[%]
H_u	Výhřevnost	[kJ/kg]
N	Hmotnostní podíl dusíku ve zkušebním palivu	[%]
NO	Objemová koncentrace oxidu dusnatého v suchých spalinách	[%]
$NO_{prům}$	Průměrná objemová koncentrace oxidu dusnatého v suchých spalinách	[%]
η	Účinnost	[%]
O	Hmotnostní podíl kyslíku ve zkušebním palivu	[%]
$O_{2prům}$	Průměrné množství kyslíku v průběhu měření	[%]
O_{2stand}	Standardizované množství kyslíku $O_2=11\%$	[%]
p''	Absolutní tlak vodní páry na mezi sytosti pro teplotu 20 °C	[Pa]
p_{atm}	Atmosférický tlak	[Pa]
p_c	Celkový absolutní tlak vlhkého vzduchu	[Pa]
p_{sp}	Tlak spalin	[Pa]
p_{vz}	Tlak vzduchu	[Pa]
Q_s	Spalné teplo	[kJ/kg]
q_a	Poměrné ztráty citelným teplem	[%]
Q_a	Ztráty citelným teplem	[kJ/kg]
q_b	Poměrné ztráty plynným nedopalem	[%]

Q_b	Ztráty plynným nedopalem	[kJ/kg]
q_r	Poměrné ztráty mechanickým nedopalem	[%]
Q_r	Ztráty mechanickým nedopalem	[kJ/kg]
Q_{ri}	Výhřevnost	[kJ/kg]
r	Výparné teplo vody, $r=2451$	[kJ/kg]
S'	Hmotnostní podíl síry ve zkušebním palivu	[%]
S	Měrná sirnatost	[g/kg]
t_{ok}	teplota okolí	[°C]
t_{sp}	teplota spalin	[°C]
V	Vodní hodnota kalorimetru	[kJ/K]
V_{O2min}	Minimální potřebné množství kyslíku	[m ³ /kg]
V_{svzmin}	Minimální množství suchého vzduchu	[m ³ /kg]
V_{Ar}	Minimální objem Ar ve spalinách	[m ³ /kg]
V_{H2O}	Minimální objem vodní páry	[m ³ /kg]
V_{N2}	Minimální objem N ₂ ve spalinách	[m ³ /kg]
V_{rSPmin}	Minimální množství spalin za reálných podmínek	[m ³ /kg]
V_{rVZmin}	Minimální množství vzduchu za reálných podmínek	[m ³ /kg]
V_{SO2}	Minimální objem SO ₂ ve spalinách	[m ³ /kg]
V_{SP}	Skutečné množství vlhkých spalin	[m ³ /kg]
V_{SPmin}	Minimální objem vlhkých spalin	[m ³ /kg]
V_{SSPmin}	Minimální objem suchých spalin	[m ³ /kg]
V_{VZmin}	Minimální množství vlhkého vzduchu	[m ³ /kg]
W^I	Obsah vody v palivě	[%]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Vznik uhlí.....	16
Obr. 2 Smrkové dřevo použité při měření.....	18
Obr. 3 Bukové dřevo použité při měření.....	18
Obr. 4 Bukové brikety použité při měření.....	19
Obr. 5 Schéma prohořívání [4].....	21
Obr. 6 Schéma odhořívání [4].....	22
Obr. 7 Schéma zplyňování [4].....	22
Obr. 8 Kotel s otáčivým roštem [4].....	23
Obr. 9 Kotel se šnekovým dopravníkem [4].....	23
Obr. 10 Krbová vložka Steko Venus 12.1.....	24
Obr. 11 Schéma krbové vložky Steko Venus [10].....	24
Obr. 12 Vlhkoměr WHT 770.....	29
Obr. 13 Filtrace TZL.....	29
Obr. 14 Analyzátor spalin Ultramat.....	29
Obr. 15 Váha Mettler toledo.....	29
Obr. 16 Koncentrace CO v průběhu spalování.....	40
Obr. 17 Koncentrace NO v průběhu měření.....	40
Obr. 18 Koncentrace O ₂ v průběhu měření.....	41
Obr. 19 Koncentrace CO v průběhu měření.....	41
Obr. 20 Koncentrace NO v průběhu měření.....	42
Obr. 21 Koncentrace O ₂ v průběhu měření.....	42
Obr. 22 Graf určující emisní třídu.....	44

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1- Výpočet pro bukové dřevo, druhé měření bukového dřeva

Příloha č. 2- Výpočet pro smrkové dřevo, první měření smrkového dřeva

Příloha č. 3- Výpočet pro smrkové dřevo, druhé měření smrkového dřeva

Příloha č. 4- Výpočet pro bukové brikety, první měření bukových briket

Příloha č. 5- Výpočet pro bukové brikety, druhé měření bukových briket

Příloha č. 6- Naměřené hodnoty