VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Návrh nízkoemisního hořáku spalující dřevní pelety

Design of Low-Emission Burner for Wood Pellets Combustion

Student: Bc. Jiří Ryšavý

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jiří Horák, Ph.D.

Ostrava 2017

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jiří Ryšavý**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení

Téma: Návrh nízkoemisního hořáku spalujícího dřevní pelety
Design of Low-Emission Burner for Wood Pellets Combustion

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Práce se bude skládat z teoretické a praktické části:
Teoretická část – bude dále rozdělena na:
- Shrnutí problematiky využití pelet jako paliva.
- Teplovodní kotle malého výkonu – rozdělení, popis konstrukce a legislativní požadavky.

Praktická část – bude se skládat z:
- Návrhu hořáku o tepelném výkonu 20 kW s vyměnitelným roštem pro spalování dřevních pelet. Součástí práce bude sestavný výkres hořáku, výrobní výkres roštu a výpočet statiky spalování pro předpokládaný výkon hořáku.
- Návrhu zkušebního stanoviště pro testování teplovodních kotlů dle platné technické normy.
- Provedení experimentálních spalovacích zkoušek navrženého hořáku s vybraným tělesem kotle ve zkušebně.
- Vyhodnocení spalovacích zkoušek s ohledem na platné legislativní požadavky.

Seznam doporučené odborné literatury:

- 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.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Horák, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016
Datum odevzdání: 15.05.2017

doc. Ing. Kamil Kolarčík, CSc.
vedoucí katedry

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ-TECHNICKÁ UNIVERZITA Fakulta strojní OSTRAVA 3

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 14.5.2017

…………………………….

Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 - školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB – TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnou licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB -TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Ostravě 14.5.2017

……………………………

Podpis studenta

Adresa trvalého pobytu diplomanta:

Starobní 889/15

703 00 OSTRAVA – Vítkovice

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Jiřímu Horákovi, Ph.D. a Ing. Petru Kubesovi za odborné vedení mé diplomové práce a panu Ing. Janu Pešatovi za cenné rady. Výzkumnému energetickému centru bych chtěl podekovat za poskytnutí měřící techniky pro správné změření a následné vyhodnocení nově navrženého hořáku. Mé díky také patří mé rodině za neutuchající podporu i v těch nejčernějších okamžicích.

Anotace

RYŠAVÝ, J. Návrh nízkoemisního hořáku spalující dřevní pelety, Ostrava: katedra energetiky, Fakulta strojní, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2017. Bakalářská práce, vedoucí Ing. Jiří Horák, Ph.D.

Diplomová práce obsahuje komplexní informace o dřevních peletách jako palivu. Dále zahrnuje popis základních typů spalovacích zařízení malých výkonů, včetně podrobného popisu všech částí kotle s automatickým podáváním paliva. Součástí práce je přehled platné legislativy pro spalovací zařízení malých výkonů v České republice a v Evropě, především v Německu a Rakousku.

Cílem práce je návrh nového hořáku na bílé dřevní pelety, který bude vyroben a podroben zkouškám, které umožní porovnání s platnou legislativou. Přínos shledávám v popisu konstrukce částí hořáku s důrazem na důležité prvky a následně v implementaci těchto poznatků do úplně nového typu hořáku. Autor se podílí na kompletním tvarovém návrhu hořáku, dále sám zpracuje technickou dokumentaci, která poslouží k výrobě hořáku. Dále se bude podílet na implementaci hořáku do kotle a na spalovacích zkouškách hořáku, na základě kterých pak provede vyhodnocení.

Klíčová slova: pelety, hořák, kotel

Annotation

RYŠAVÝ, J. Design of Low-Emission Burner for Wood Pellets Combustion, Ostrava: Department of Energy Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, VŠB-TU Ostrava, 2017. Bachelor essay, head Ing. Jiří Horák, Ph.D.

Bechelor essay contains comprehensive information about wooden pellets as a fuel. Further includes description of basic types of combustion devices with small performances inclusive detail description of all parts of boiler with automatic feed of fuel. There is a part about currently valid legislation for combustion devices with small performances in Czech republic and in Europe, especially in Germany and Austria. Target of this thesis is design of new burner incinerating white wooden pellets, which will be manufactured and tests which allow compare with currently valid legislation. I find the benefit in describing the design of parts of the burner with an emphasis on important elements and subsequently in the implementation of this knowledge into a completely new type of burner. The author is involved in a complete form-fitting design of the burner, then himself draw up technical documentation which will be used to manufacture burner. Further, he will contribute on the implementation of the burner in the boiler and on the combustion test, which will be base for final evaluate.

Keywords: Pellets, Burner, Boiler

Obsah

1. Úvod ... 8

2. Pelety ... 9

2.1 Dřevo ... 9

2.1.1 Struktura dřevní hmoty ... 9

2.1.2 Dřevo jako palivo ... 10

2.2 Výroba pelet ... 12

2.3 Legislativa zabývající se hodnocením kvality pelet ... 14

2.4 Energetická náročnost peletování ... 17

2.5 Hlavní výhody a nevýhody dřevěných pelet ... 17

2.6 Porovnání provozních nákladů ... 18

2.7 Proces spalování pelet ... 19

2.8 Vhodná uplatnění kotlů na pelety ... 20

2.9 Vývoj výroby a spotřeby pelet v ČR a ve světě ... 20

3. Typy teplovodních kotlů malých výkonů na pevná paliva ... 25

3.1 Části kotle s automatickým podáváním paliva ... 30

3.1.1 Hořák ... 31

3.1.2 Hořáky s vytlačováním paliva vzhůru ... 36

3.1.3 Podavač paliva ... 36

3.1.4 Ventilátor ... 37

3.1.5 Sklad paliva ... 38

3.1.6 Mezi zásobník paliva ... 40

3.2 Ostatní části kotle s automatickým podáváním paliva ... 40

4. Legislativa v oblasti malých spalovacích zařízení ... 42

4.1 Požadavky dle ČSN EN 303-5 a platných českých zákonů ... 44

4.1.1 Německo ... 47

4.1.2 Rakousko ... 48

4.1.3 Ekodesign ... 50

4.2 Shrnutí ... 50

5. Návrh a kontrolní měření hořáku dle zadaných parametrů ... 52

5.1 Konstrukční návrh nízkoemisního hořáku na bílé dřevní pelety 52
5.2 Kotel 56
5.3 Testovací trať a použité přístroje 57
5.4 Průběh zapalování a vyhasínání hořáku 61
5.5 Vyhodnocení 64
5.5.1 Jmenovitý výkon 65
5.5.2 Snížený výkon 68
5.5.3 Měření spotřeby paliva 71
5.6 Výpočty 72
6. Závěr 87
7. Seznam použité literatury 89
8. Seznam obrázků 93
9. Seznam tabulek 95
10. Seznam grafů 96
11. Seznam značek 97
12. Seznam příloh 100

1. Úvod

Každým dnem jsme svědky staveb nových budov, či rekonstrukcí těch starších. Jedním z dominantních prvků, které je nutné pro tyto nové, či opravené budovy zajistit je vytápění. Podle vzdálenosti a dostupnosti teplárny můžeme typ vytápění rozlišit na centrální a lokální. U první možnosti je koncový spotřebitel závislý na spolehlivosti teplárny, na ceně tepla nastavené teplárnou a na její obsluze, přičemž valná většina takto vyrobeného tepla pochází z fosilních neobnovitelných zdrojů. Lokální vytápění, někdy jako možnost, jindy jako nutnost, zahrnuje celou škálu variant, spojuje je však jedna důležitá skutečnost, a to ta, že je provozovatel odkázán pouze sám na sebe, myšleno tedy na své zdroje, ať už se jedná o tuhá paliva, plyn, nebo jiné. Tato diplomová práce se bude zaměřovat především na lokální vytápění spalováním dřevních pelet, okrajově pak také jiných druhů biomasy s nulovou uhlíkovou bilancí.

Téma této diplomové práce bylo vybráno na základě zřejmé nutnosti hledat možnosti zdokonalení spalovacího zařízení v hořákové části tak, aby plnily nejpřísnější emisní limity, avšak na rozdíl od konkurenčních výrobků byl kladen důraz také na jednoduchou vyrobitelnost a tím i nízkou cenu. Vývoj tohoto hořáku je také částí projektu TE01020036 s názvem: Pokročilé technologie pro výrobu tepla a elektřiny.

Cílem této diplomové práce je v první části shrnout aktuální možnosti využití pelet jako paliva, společně s popisem dnes dostupných spalovacích zařízení nejen na pelety, ale na tuhá paliva celkově. Následně v části druhé navrhnout a dle návrhu nechat vyrobit, nízkoemisní hořák, který bude splňovat nejpřísnější legislativní kritéria a zároveň bude zahrnovat řadu výhod, jako například možnost vyměnění roštu za pomocí jednoduchého mechanismu. Tento hořák bude podroben spalovacím zkouškám, které budou v této práci vyhodnoceny a jejich výsledky budou porovnány s platnou legislativou v České Republice, v Německu a Rakousku.

2. Pelety

Jedná se drobné válečky silně slisované dřevní hmoty. Pelety jsou druh paliva s vysokou energetickou hustotou, výbornými možnostmi dopravy a manipulace od výroby až po vyhoření v hořáku. Toto palivo je z největší části vyráběno pro spalování v lokálních topeništích. Pelety jsou pro představu vyobrazeny na Obr. č. 2.1. [1]

Obr. č. 2.1 Pelety [8]

2.1 Dřevo

Dřevo můžeme považovat za jeden z nejstarších zdrojů energie. Člověk se energii z něj naučil využívat pomocí spalování již před několika tisíci lety. Dřevo jako surovina lze samozřejmě využívat mnoha jinými dalšími způsoby a má mnoho dalších způsobů využití, nicméně jejich podrobný popis není předmětem této diplomové práce. [1]

2.1.1 Struktura dřevní hmoty

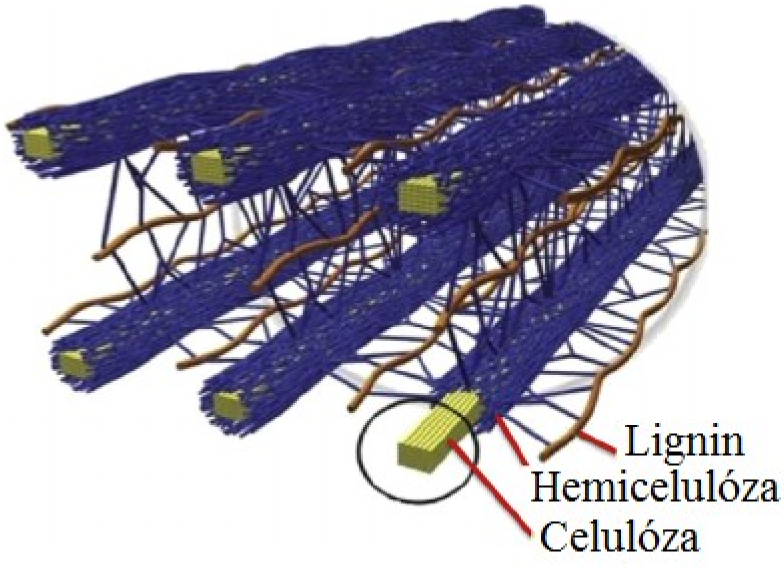
Dřevo, stejně jako každý jiný materiál rostlinného, či živočišného původu řadíme do kategorie biomasy. Vlastní dřevní hmota se skládá z dlouhých celulózových řetězců, které vytváří buněčnou armaturu, kolem které jsou obtočeny rozvětvené řetězce hemicelulóz. Tuto strukturu zpevňuje zasíťovaný lignin. Tyto tři zmiňované látky tvoří základní strukturu dřeva. Názorné vyobrazení struktury dřeva je patrný na Obr. č. 2.2. [36]

Celulóza je polymer vyskytující se ve dřevní hmotě ve dvou různých strukturách. Buďto se jedná o strukturu pravidelnou, pak hovoříme o tzv. krystalické celulóze, nebo se jedná o strukturu nepravidelnou, ta je většinou nazývána jako amorfní celulóza. Druhá zmiňovaná má slabší vazby, je tedy reaktivnější, čehož se dá využít při rozkladu dřeva. Celulóza je nejběžnější polymer na planetě zemi, přičemž jí vzniká $1{,}5 \cdot 10^9$ tun ročně. Celulóza zaujímá ve dřevě cca poloviční hmotnostní podíl a výhřevnost celulózy je 18,8

MJ/kg. Tato látka je ve vodě nerozpustná a intenzivní rekce, tedy štěpení, na tepelné působení probíhá až od 250 °C. [36]

Hemicelulźa je kopolymer, tedy polymer, jehož makromolekula se skládá z dvou a více druhů monomerů s různým uspořádáním. Tyto monomery se dále skládají z různých druhů cukrů. Hemicelulózy je ve dřevě 23 – 26 $\%_{hm}$ a je tepelně méně stálá než celulóza. Rozkládá se v teplotním intervalu 170 – 240 °C. [36]

Lignin je rozvětvený dvourozměrný polymer několika aromatických sloučenin. Podíl ligninu ve dřevní hmotě narůstá v závislosti na jeho stáří od cca 20 do 32 $\%_{hm}$. V souvislosti s tím roste pevnost dřeva a snižuje se propustnost vody. Jedná se o tepelně nejstálejší složku dřeva, přičemž jeho rozklad začíná až při teplotách nad 300 °C. Výhřevnost ligninu je 25,5 MJ/kg. [36]



Obr. č. 2.2 Struktura dřeva [37]

2.1.2 Dřevo jako palivo

V dnešní době se lidstvo hojně navrací ke dřevu, jako k tradičnímu palivu, s jistou rovnováhou mezi produkcí oxidu uhličitého při jeho spálení, nebo při jeho samovolném rozkladu v přírodě. Dřevo je také zařazováno do skupiny obnovitelných zdrojů energie, tedy zdrojů, které je možné využít a následně např. znovu vypěstovat během doby trvající v řádech jednotek, maximálně desítek let. [1]

Základní části dřeva můžeme rozdělit do tří skupin, tedy hořlavina (h), popelovina (A) a voda (W).

$$h + A + W = 1 \tag{1}$$

Tyto tři složky následně ovlivňují, z energetického hlediska, nejdůležitější parametr dřeva jako paliva, a to výhřevnost, popřípadě spalné teplo. Čím je hořlaviny v palivu větší hmotnostní zastoupení, výhřevnost roste. Jedná se tedy o aktivní složku paliva. Na druhou stranu zvyšování hmotnostního podílu popeloviny a vody se výhřevnost snižuje. Z tohoto hlediska je velice důležitý proces sušení, kterým je snižován obsah vody v palivu. Největším nositelem popelovin ve dřevě je z pravidla kůra, u které hmotnostní poměr popelovin narůstá především při těžbě. [1]

Hořlavina

Jedná se o nejdůležitější složku, co se týče procesu hoření. Hořlavina se z pravidla skládá z aktivních a pasivních složek. Mezi aktivní složky patří uhlík (C), vodík (H) a síra (S). Mezi pasivní složky pak patří kyslík (O) a dusík (N). Kyslík sice podporuje průběh hoření, avšak nezvyšuje výhřevnost paliva. [1]

Samotnou hořlavinu lze jiným způsobem rozdělit na tuhý uhlík a hořlavinu prchavou, běžně označovanou jako „daf“. Jedná se o tu část paliva, která se při zahřátí na určitou teplotu uvolňuje ve formě hořlavých plynů. Míra prchavé hořlaviny v palivu je závislá na typu paliva a zásadně ovlivňuje první fázi procesu hoření, tedy zapalování. U fosilních paliv jí dále ovlivňuje geologické stáří paliva. Nutno dodat, že obsah prchavé hořlaviny ve dřevě dosahuje vysokých hodnot blížících se až 85 %, což značně usnadňuje jeho zapálení. [1]

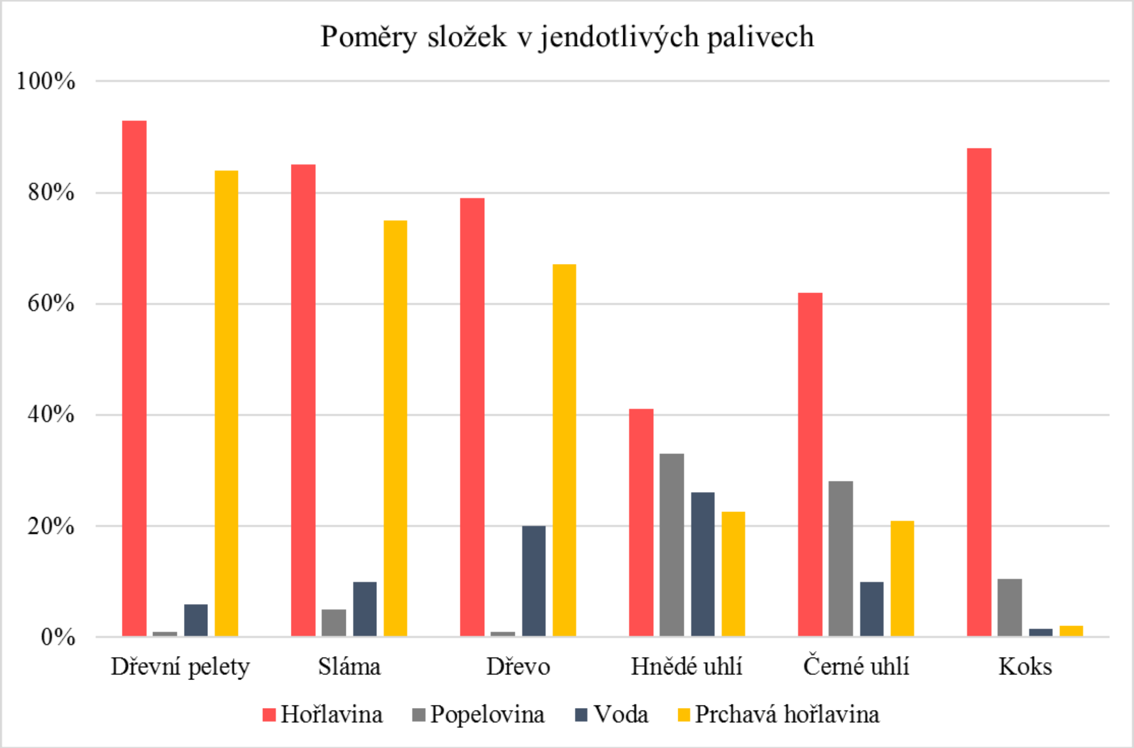
Popelovina

Popelovina, je často zaměňována za popel, avšak jedná se o dvě rozdílné látky, přičemž popelovina je směs chemicky vázaných minerálů v palivu a popel je to, co z popeloviny vznikne chemickými reakcemi po spalování, tedy výsledkem působení vysoké teploty na popelovinu. Popel dále také z části obsahuje nedopal, tedy část hořlaviny, která v kotli nevyhořela. Dřevo je charakteristické nízkým obsahem popeloviny, řádově se hodnota pohybuje kolem 1 % hmotnostního podílu. Tento fakt je obrovskou výhodou oproti tuhým fosilním palivům s řádově vyššími hodnotami popelovin v palivu. Například z hlediska nutnosti četností vybírání popela ze spalovacího zařízení. [1]

Voda

Voda, jak již bylo zmíněno, negativně ovlivňuje průběh hoření a snižuje konečnou výhřevnost paliva. Její podíl v čerstvě poraženém dřevu bývá cca 50 %, tato hodnota se však může lišit dle ročního období, ve kterém je dřevo pokáceno. Pro její odstranění musí docházet k velice dlouhému pozvolnému vysušování, nebo k intenzivnímu sušení v tzv. sušičkách. Pro běžné sušení na vzduchu je doporučováno setrvání jeden až dva roky. Kromě výše zmíněných negativních vlivů vody na dřevo jako palivo voda zvyšuje komínovou ztrátu spalovacího zařízení zvýšením množství spalin a jejich měrné tepelné kapacity. Dále také s rostoucím obsahem vody ve spalinách roste riziko kondenzace spalin spojené s rizikem koroze spalinových cest. [1]

Názorné porovnání jednotlivých složek v různých palivech znázorňuje Graf č. 2.1. Jedná se o průměrné hodnoty daných prvků. Skutečné hodnoty se mohou lišit dle lokace těžby uhlí, nebo např. dle četnosti kontaktu kůry stromu se zemí v průběhu těžby. [1]

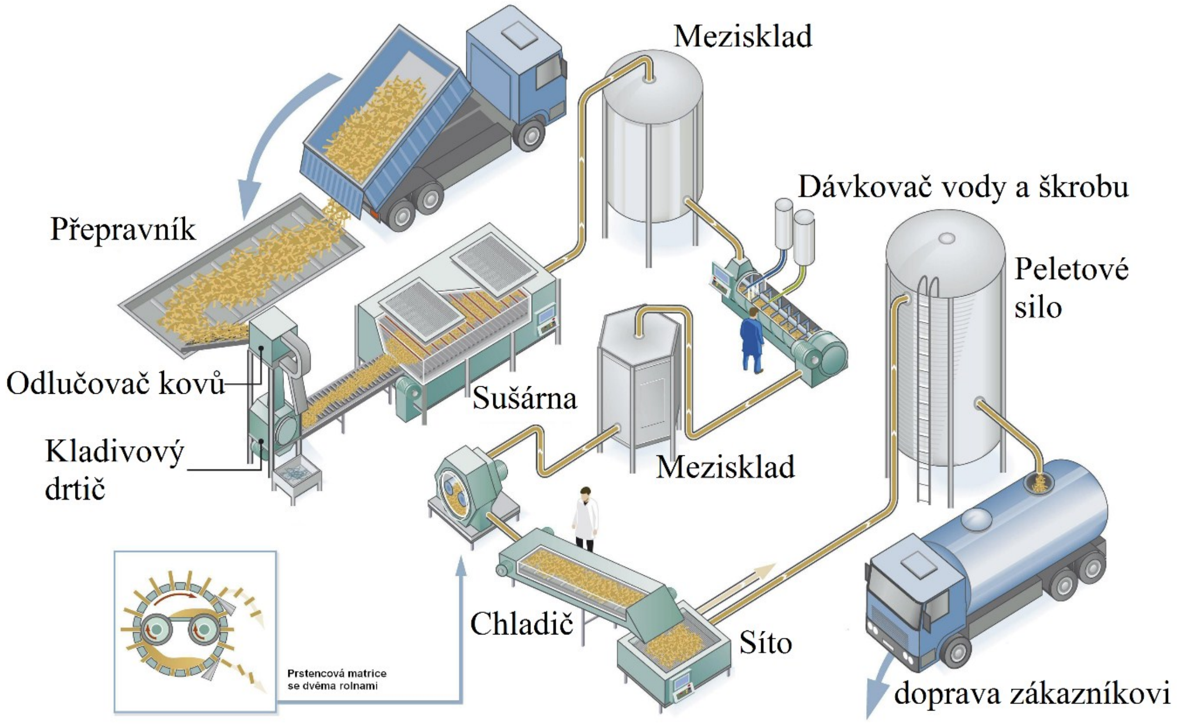


Graf č. 2.1 Poměry složek v palivu [43]

2.2 Výroba pelet

Systém peletování je znám již více než 100 let. Inspirací pro tuto metodu byl potravinářský průmysl. Dřevní pelety se většinou vyrábí z dřevního odpadu, jako jsou například piliny, hobliny, obrusný prach a ze zbytků lesní těžby, avšak běžně je k vidění i zpracování surové dřevní hmoty přímo za účelem peletování. [1]

Pro to, aby byla výroba pelet vůbec možná, je nutné, aby byl obsah ligninu (někdy uváděného jako "dřevovina") alespoň 1 – 2 % hmotnostního podílu dřeva. Bez této složky nedochází ke správné soudržnosti materiálu. Pokud tento parametr není splněn, běžně se do směsi dodává melasa, nebo škrob, které zde fungují jako přírodní pojivo. Základní schéma peletovací linky je na Obr. č. 2.3, přičemž technologické procesy vyobrazené na tomto obrázku jsou popsány níže. [1]



Obr. č. 2.3 Základní schéma peletovací linky [8]

Výroba se zakládá z šesti po sobě jdoucích technologických procesů:

- drcení/homogenizace směsi
- sušení (v případě vyšší než předepsané vlhkosti)
- peletování
- chlazení
- skladování, balení a doprava [1]

Mletí probíhá ve mlýnech různých druhů, především však na mlýnech kladívkových. Tento proces zajišťuje správnou zrnitost částeček umožňující spojení. [1]

Sušení, které je zapotřebí v případě, že hmotnostní obsah vody v dodávané surovině přesahuje 12 – 14 % (rozpětí je dáno potřebou jistého hmotnostního obsahu vody v surovině pro další technologie). Sušení je velice náročný a nákladný proces. Existuje však řada možností, jako například rekuperace tepla, které umožňují snížit finanční náročnost této operace. [1]

Peletování, tedy operce, kdy se homogenní prášek v peletovacích lisech mění na pevnéválečky. Správného tvaru je dosahováno protlačování přes matrici. Ta může mít buď tvar prstence, nebo tvar talíře, dle požadovaného výkonu, vždy s mnoha přesně vyrobenými otvory, které udávají konečný průměr pelet (dnes nejpoužívanější 6 nebo

8 mm). Na jedné ze stran matrice je vždy umístěna otočná rolna, která protlačuje materiál přes díry. Na opačné straně jsou umístěny nože, které mají za úkol krátit pelety na požadovanou délku. Pro jednodušší protlačení je materiál před konečným zpracováním zkrápěn vodou nebo napařován parou. Toto opatření snižuje tření a tím i energetickou náročnost při současném snížení opotřebení nástrojů. [1]

Chlazení pelet je velice důležitá operace dodávající peletám odolnost a pevnost vůči odrolu. Energii odebranou peletám při výstupní teplotě z matrice cca 90 °C je možné z hlediska úspor využít opětovně pro sušení nové várky. [1]

Skladování, balení a doprava jsou velké výhody dřevěných pelet. Jejich vysoká energetická hustota umožňuje komfortní dodávku tepla na celou topnou sezónu při nutnosti relativně malého skladu paliva oproti například kusovému dřevu. Pytle, ve kterých jsou často pelety uschovány, zabraňují vlhnutí a znečištění paliva. Jiné možnosti balení a dopravy zahrnují například balení ve velkých vacích, které jsou schopny pojmout až jednu tunu pelet. S těmi už však musí být nakládáno za pomocí zvedací techniky. Třetí možnost je doprava v "cisterně" s možností nafoukání pelet do předem připravené zásobárny. [1]

2.3 Legislativa zabývající se hodnocením kvality pelet

Kvalita pelet je hodnotitelná podle řady ukazatelů a měřítek, jejichž přípustné hodnoty jsou stanoveny v normách. Mezi nejdůležitější vlastnosti patří rozměry, hustota, spalné teplo, obsah vody a odrol. Povolené hodnoty dle různých norem jsou znázorněny v Tab. č. 2.2. V této tabulce je možné porovnat německé normy DIN, rakouskou normu Ö−Norm, starší, již od roku 2015 neplatící českou normu ČSN P CEN/TS 14961 a novější evropskou normu ČSN EN ISO 17225-2 [38], kterou, stejně jako 5 dalších norem pro hodnocení jiných druhů paliv, jako například tříděných dřevních briket, tříděné dřevní štěpky, tříděného palivového dřeva, tříděných nedřevních pelet a tříděných nedřevních briket zaštiťuje norma ČSN EN ISO 17225-1[39].

Normy České se od zahraničních liší především konceptem hodnocení pelet. Přiřazují různým kvalitativním třídám pelet dle jejich vlastností různá označení. Při porovnání jednotlivých norem je možné spatřit rozmanitost v hodnocení pelet, hlavně v případech, kdy se norma nezabývá pouze dřevními peletami, ale zaměřuje se také na rostlinné, kůrové a jiné typy pelet. [1;8]

Zajímavostí zůstává například podíl vody v palivu, který přísnější normy zaručují pod 10 %. Technicky není problém vysušit pelety na nižší hodnotu vlhkosti, avšak z bezpečnostních důvodů, jako je zpomalení hoření a zabránění výbuchu je ponecháváno v palivu malé procento vody. [1]

Kvalitu kupovaných pelet je také možné ověřit certifikací ENplus. Tento certifikát je určen pro pelety splňující normu ČSN EN ISO 17225-1. Kvalitativně pelety dále rozděluje do tří tříd, které jsou popsány dále a v Tab. č. 2.1. [1;8]

- Třída A1 – použití pro domácí kotle menších výkonů; zaručena maximální kvalita
- Třída A2 – použití v kotlech větších výkonů za současného navýšení množství vzniklého popela
- Třída B – použití pro průmysl; vyšší podíl kůry, a tedy i vzniklého popela [1;8]

Typ dřeva	**ENplus A1**	**ENplus A2**	**ENplus B**
Kmenové dříví			
Chemicky neošetřené zbytky z dřevozpracujícího průmyslu			
Kůra			
Lesní těžební zbytky			
Celé stromy bez kořenů			
Chemicky neošetřené použité dřevo			
Lesní, plantážové a další surové dříví			
Dřevo z demolic budov, nebo jiných staveb	Jeho použití je v Enplus zakázáno		

Tab. č. 2.1 Rozdělení certifikace ENplus [8]

Norma:	DINPlus	DIN 51731	ÖNORM M 7135	ČSN P CEN/TS 14961	ČSN EN 17225-1
Druh biomasy	dřevní pelety	dřevní pelety	dřevní pelety / kůrové pelety	dřevní a rostlinná biopaliva a jejich směsi	dřevní a rostlinná biopaliva a jejich směsi
Průměr pelety [mm]	4 ≤ d < 10	4 ≤ d < 10	4 ≤ d < 10 / ≥ d < 10	5 druhů rozměrů od 6 mm do 25 mm	5 druhů rozměrů od 6 mm do 25 mm
Délka pelety [mm]	≤ 5 x d	< 50	≤ 5 x D / ≤ 5 x D	5 druhů rozměrů od L ≤ 5 x průměr do L ≤ 4 x průměr	5 druhů rozměrů 3,15 ÷ 10 < L ≤ 40 ÷ 50
Sypná hmotnost [kg/dm3]	≥ 1,12	> 1,0 - 1,4	≥ 1,12 / ≥ 1,12	doporučení uvést při prodeji v obj. jednotkách	7 tříd
Obsah vody [%]	≤ 10,0	< 12	≤ 10,0 / 18,0	3 třídy	5 tříd
Obsah popela [%]	≤ 0,5	< 1,5	≤ 0,50 / ≤ 6,0	5 tříd	14 tříd
Výhřevnost [MJ/kg]	≥ 18	17,5 - 19,5	≥ 18,0 / ≥ 18,0	doporučuje se uvést	uvádí se minimální hodnota
Obsah síry [%]	≤ 0,04	< 0,8	≤ 0,04 / ≤ 0,08	4 třídy	8 tříd
Obsah dusíku [%]	≤ 0,3	< 0,3	≤ 0,30 / ≤ 0,60	5 tříd	10 tříd
Obsah chloru [%]	≤ 0,02	< 0,03	≤ 0,02 / ≤ 0,02	4 třídy	9 tříd
Otěr [%]	2,3	0	≤ 2,3 / ≤ 2,3	3 třídy	4 třídy
Pomocný lisovací. Prostředek [%]	2	0	≤ 2 / ≤ 2	určit druh a obsah	určit druh a obsah (do 20%)
Jemné částice [%]	-	-	-	3 třídy	7 tříd
Minimální doba skladovatelnosti [měsíce]	-	-	-	≥ 6	≥ 6

Tab. č. 2.2 Normy pro dřevěné pelety [1,9]

V Tab. č. 2.3 jsou uvedena složení dřeva v suchém stavu, tedy i dřevních pelet bez příměsí, rozdělená dle typu hmoty a dle chemických prvků. Ze složení podle typu hmoty je patrné, že dřevu dominuje celulóza, což je polysacharid, který se skládá z vyšších cukrů a ve dřevě tvoří vlákna, jež jsou zjednodušeně řečeno slepena druhým nejzastoupenějším typem hmoty, kterým je lignin. [1,10]

Složení přírodního dřeva			
Podle typu hmoty		**Podle chemických prvků**	
celulóza	až 50 $\%_{hm}$	uhlík	50 $\%_{hm}$
hemicelulóza	až 26 $\%_{hm}$	kyslík	43 $\%_{hm}$
lignin	až 32 $\%_{hm}$	vodík	6 $\%_{hm}$
extrakty	< 5 $\%_{hm}$	dusík	> 1 $\%_{hm}$
popeloviny	< 1 $\%_{hm}$	halogeny, těžké kovy	ppm

Tab. č. 2.3 Složení přírodního dřeva [1]

2.4 Energetická náročnost peletování

K výrobě jedné tuny pelet (cca 1,7 m^3) je potřeba 5–8 m^3 dřevěných pilin a zbytků. Byť se zdá peletování energeticky náročné, samotný proces transformace změny formy ze suchých pilin, nebo suché dřevní štěpky na pelety vyžaduje pouze 1,5 - 2 % energie, která je obsažena ve vyrobených peletách. V případě, že do bilance započítáme i energii vydanou na sušení čerstvě pokáceného dřeva, což je z celého procesu energeticky nejnáročnější část, dostáváme se až na hodnotu 10 % obsahu energie v peletách. Do kompletní rozvahy by měla být započtena také energie vynaložená na těžbu dřeva, dopravu této suroviny ke zpracování, a dopravu pelet k zákazníkovi. Konečná bilance tak šplhá různě nad 10 %, dle místa původu suroviny a místa spotřeby pelet. [1]

2.5 Hlavní výhody a nevýhody dřevěných pelet

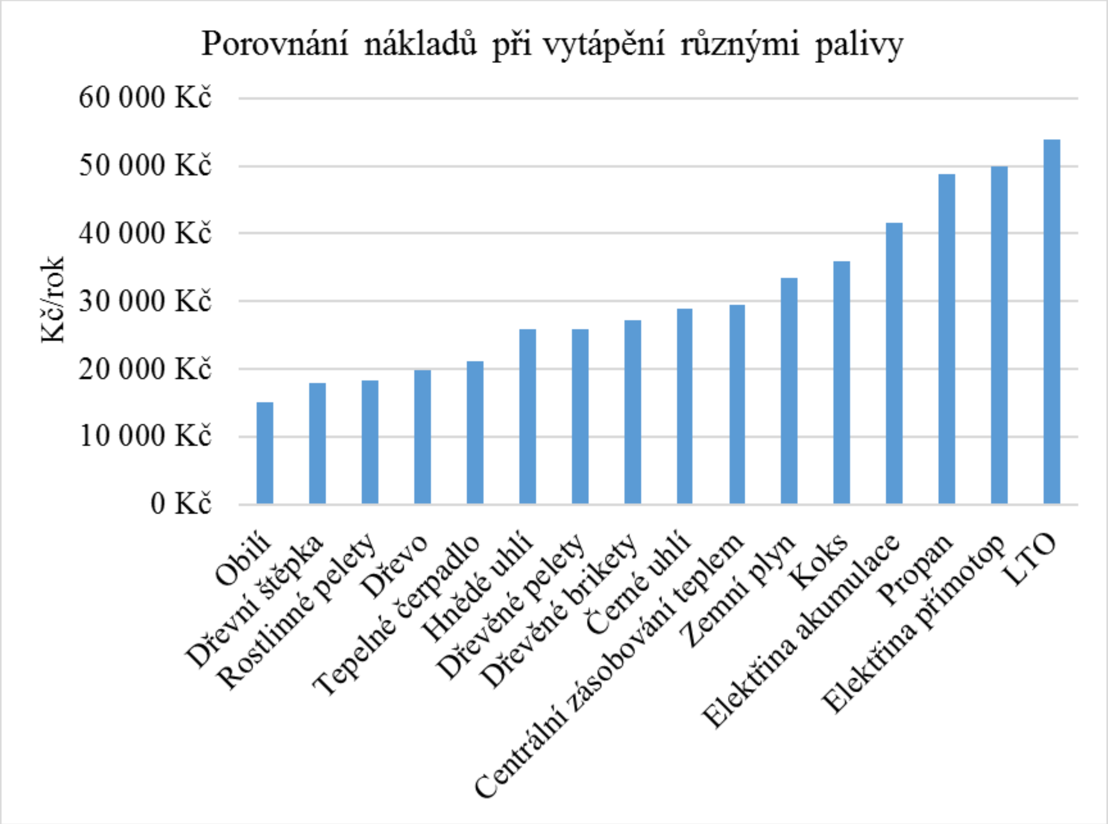
Srovnání hlavních výhod a nevýhod zdrojů tepla spalujících dřevní pelety je uvedeno v Tab. č. 2.4.

Výhody	Nevýhody
bezproblémová doprava a manipulace	systém není zcela bezúdržbový
CO_2 neutralita (stejně jako u ostatních biopaliv)	vysoké investiční náklady
homogenní palivo o standardizované kvalitě	vysoké provozní náklady
komfortní automatický provoz s obsluhou jednou za několik dnů	
malá produkce popela	
relativně malé energetické a výrobní náklady v porovnání s jinými palivy	
menší závislost státu na dovozu fosilních paliv	
nezávislost na gigantech, dodávajících elektřinu a plyn	
plnohodnotné využití dřevních odpadů	
vysoká energetická hustota	
vyšší lokální zaměstnanost	

Tab. č. 2.4 Porovnání výhod a nevýhod spalovacího zařízení na pelety [1]

2.6 Porovnání provozních nákladů

Při volbě vytápění hraje roli několik faktorů. Ať už vlastní potřeba tepla, komfort, blízká dostupnost nebo finanční náklady, které jsou mnoha zákazníky brány jako stěžejní. V Graf č. 2.2 je vyobrazeno porovnání ročních nákladů na vytápění pro různá paliva, při roční spotřebě tepla 72 000 MJ/20 MWh. Ceny jsou pouze orientační pro hrubé porovnání. Individuální situace se může lišit například podle aktuální ceny komodit, cena dopravy se může lišit podle vzdálenosti od zdroje, nebo cena centrálního vytápění se může lišit podle místa bydliště. [1,2,3]



Graf č. 2.2 Porovnání provozních nákladů při vytápění různými palivy [6]

Samostatnou kapitolou při porovnávání různých paliv je také komfort. Ať už se jedná o vzniklý nepořádek v obydlí, kdy jsou právem považovány fosilní paliva za nejméně čistá, nebo četnost nutných zásahů pro kontinuální provoz, kterými je myšleno například nutnost pravidelného přikládání, popřípadě nutné odstávky z důvodu odstranění popela. [1,2,3]

2.7 Proces spalování pelet

Stejně jako tomu je i u jiných paliv, zdánlivě jednoduchý proces hoření není v celém čase stejnoměrný, avšak probíhá ve třech na sebe navazujících fázích. [1]

- **Sušení**: Proces, kdy se palivo zbavuje svého obsahu vody. Probíhá při teplotách 100 – 150 °C v závislosti na obsahu vody. Na každý kilogram odpařené vody je zapotřebí 2,44 MJ tepla. Není však možné zanedbat také energii potřebnou na ohřátí vody na teplotu vypaření. Ta odpovídá 4,18 kJ na kilogram vody a její ohřátí o jeden stupeň. [1]
- **Pyrolýza**: Tato fáze probíhá při teplotách od 150 °C do 600 °C. Jedná se o uvolňování spalných plynů, tedy CO a uhlovodíků. Po skončení pyrolýzy zůstává na roštu 20–25 % původního paliva, které bylo transformováno do dřevěného uhlí. [1]

- **Hoření**: Jedná se o silně exotermní část děje, ve které dochází k vlastnímu hoření, tedy k úplné oxidaci „dřevěného uhlí“ (odplyněná hořlavina) a prchavé hořlaviny. Přibližně 80 % odevzdaného tepla paliva je získáno právě až při této třetí fázi. Charakteristickou žlutou barvu dodává plamenům spalovaný uhlík. [1]

Po skončení celého cyklu všech těchto částí zůstává pouze popel, kterého je 1 % původního obsahu v případě dřeva a dřevěných pelet. [1]

Díky výše uvedeným znalostem je možné optimalizovat celý spalovací proces pomocí množství přivedeného vzduchu v jednotlivých částech spalovací komory, či roštu. V případě menších spalovacích zařízení, kterými se zabývá tato diplomová práce, je běžné setkat se s rozdělením přívodu vzduchu do dvou, nebo někdy i tří fází. [1]

2.8 Vhodná uplatnění kotlů na pelety

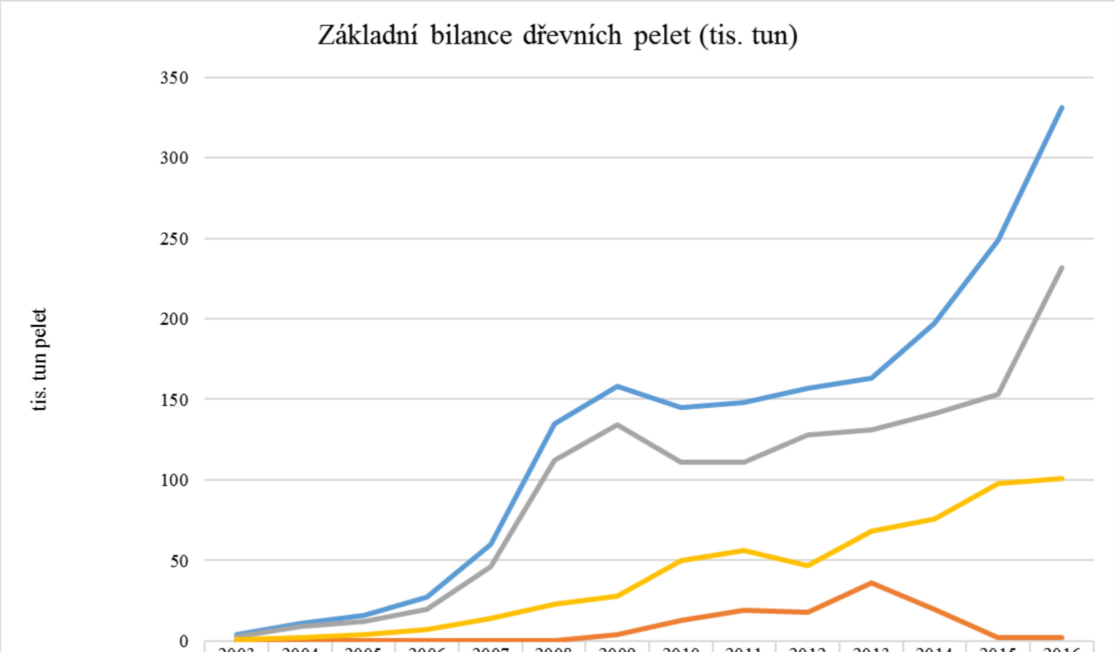
Kotle využívající jako palivo, nebo jako jedno z paliv, pelety jsou pro svou širokou regulační schopnost a pokročilou autonomii vhodné do řady umístění. Nejčastěji jsou využívány jako lokální vytápění rodinných domků a dvojdomků, popřípadě menších objektů živnostenských účelů. Méně častěji se používají pro vytápění větších objektů, jako jsou školy, či kostely, popřípadě k přípravě teplé užitkové vody na sídlištích, kdy je velice výhodné např. užití v kombinaci se solárními kolektory. [1]

2.9 Vývoj výroby a spotřeby pelet v ČR a ve světě

Vývoj produkce, dovozu, vývozu, a tedy i spotřeby dřevních pelet v ČR mezi lety 2003 až 2016 je znázorněn v Graf č. 2.3. Zatímco křivka produkce, kterou jasně kopíruje křivka vývozu, nabírala prudce rostoucí tendenci až do roku 2009, od kterého mírně propadla a opět vrátila na původní rostoucí směr, křivky charakterizující dovoz a spotřebu mají mírně rostoucí tendenci, až do roku 2013, od kterého klesá dovoz pelet do ČR. Prudký nárůst spotřeby pelet v ČR je parný v roce 2013 a v letech následujících. Zapříčinění tohoto nárůstu může mít z části na svědomí program Nová Zelená úsporám, který začal v tomto roce platit. [8;23;31]

Celková odhadovaná výrobní kapacita ČR je odhadována na více než 300 tis. tun dřevních pelet. Z níže uvedeného grafu je patrné, že tato kapacita je již plně využita. [8;23;31]

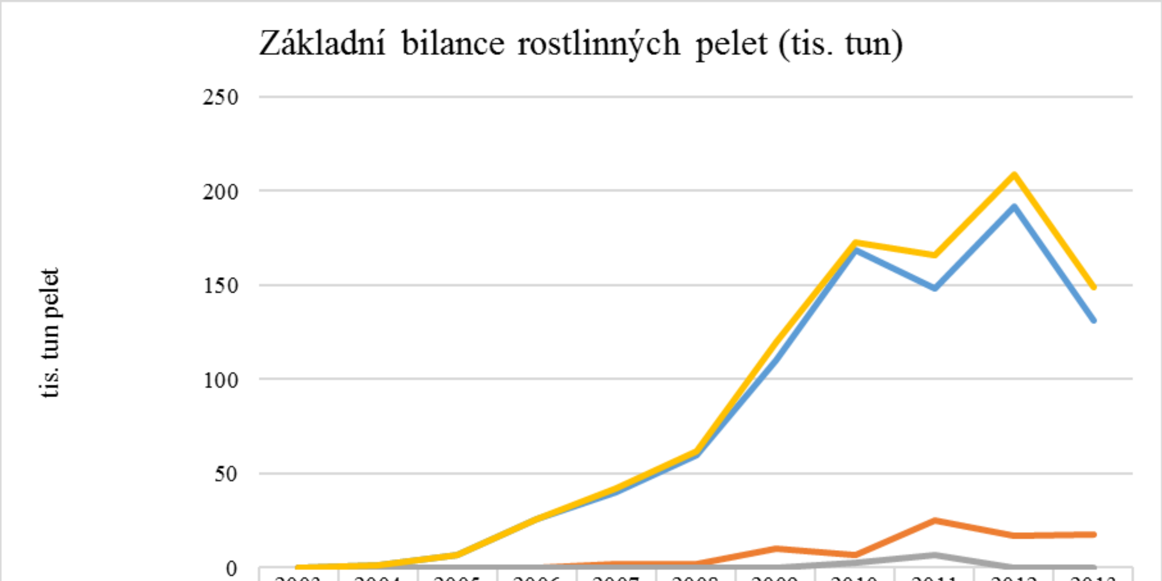
Hlavními odběrateli pelet vyrobených v ČR jsou Německo, Itálie a Rakousko s pravidelným odběrem pohybujícími se mezi 5 až 50 tis. tun pelet pro každou zemi. [8;23;31]



	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Produkce	4	11	16	27	60	135	158	145	148	157	163	197	249	331
Dovoz	0	0	0	0	0	0	4	13	19	18	36	20	2	2
Vývoz	3	9	12	20	46	112	134	111	111	128	131	141	153	232
Spotřeba v ČR	1	2	4	7	14	23	28	50	56	47	68	76	98	101

Graf č. 2.3 Základní bilance dřevních pelet (tis. tun) v ČR [8;23,31]

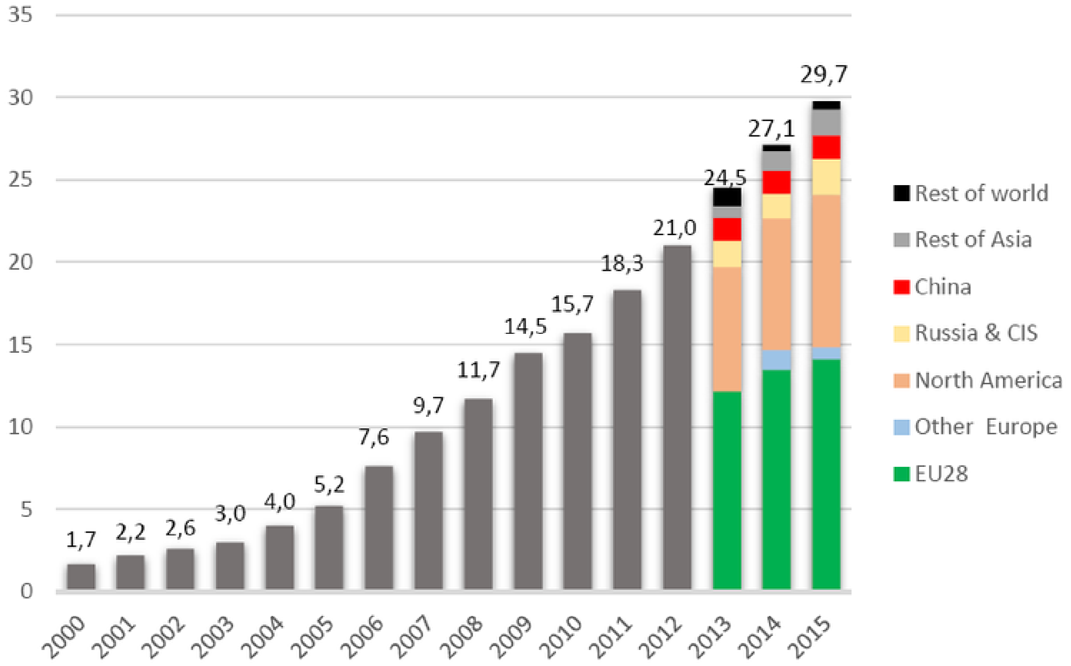
Kromě vysoce kvalitních dřevních pelet je detailně zmapován také vývoj produkce, dovozu, vývozu a spotřeby v ČR méně kvalitních rostlinných pelet. Tyto pelety jsou lisovány ze slámy, obilovin, olejnin, travin a energetických bylin. Charakteristické pro tyto pelety jsou větší sklon ke spékání a menší výhřevnost pohybující se okolo 15 MJ/kg. Vývoj bilance rostlinných pelet je uveden v Graf č. 2.4. Tento typ pelet je buď spalován ve speciálně upravených hořácích malých výkonů, nebo ve velkých elektrárnách. Právě druhá možnost navyšovala poptávku po tomto typu pelet a tím i výrobu až do roku 2013. Do té doby bylo velice výhodné, z hlediska dotací, spolu spalování pelet a fosilních paliv, avšak v roce 2014 byla změněna legislativa tak, že spolu spalování již není tak výhodné. [23]



	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Produkce	0	1	7	26	40	60	110	169	148	192	131
Dovoz	0	0	0	0	2	2	10	7	25	17	18
Vývoz	0	0	0	0	0	0	0	3	7	0	0
Spotřeba v ČR	0	1	7	26	42	62	120	173	166	209	149

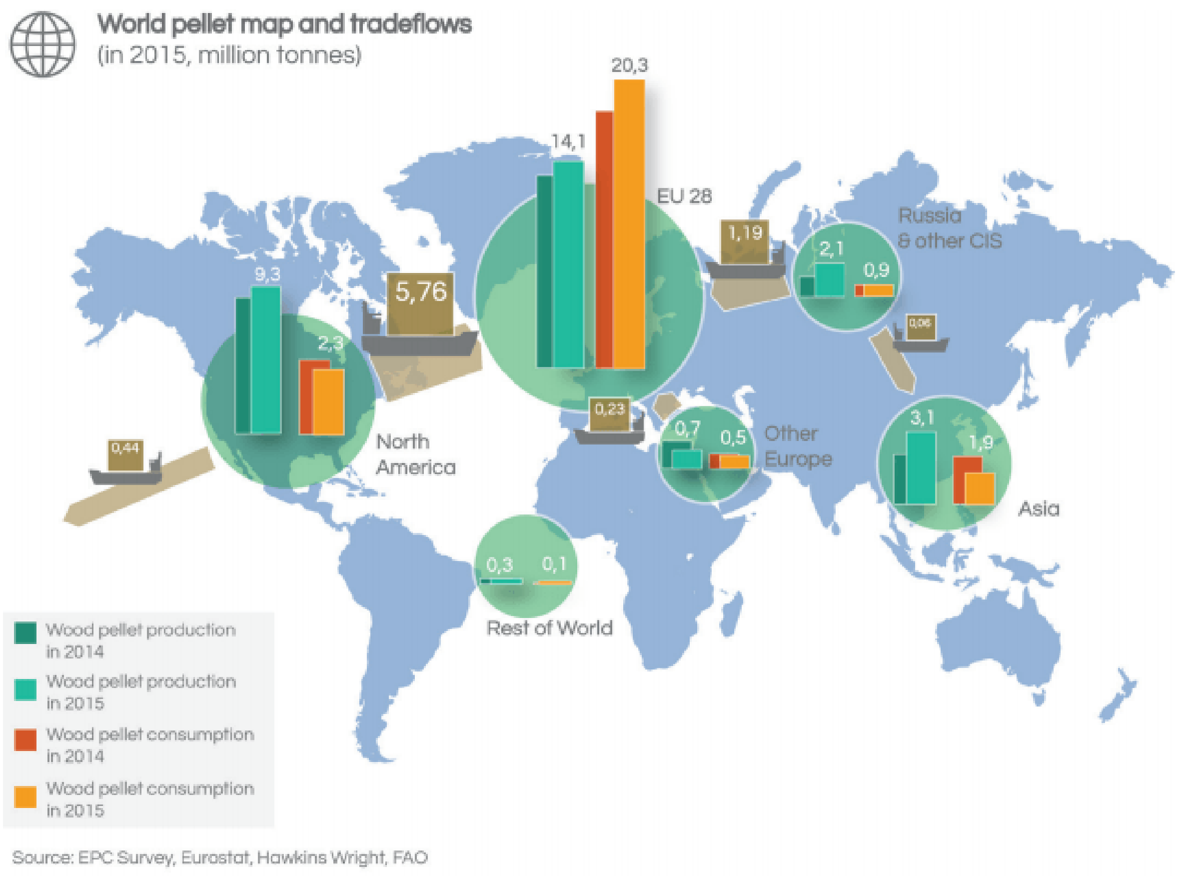
Graf č. 2.4 Základní bilance rostlinných pelet (tis. tun) v ČR [23]

Světový trend vývoje produkce pelet je do značné míry shodný jako trend v České republice. V posledních letech dochází k pravidelnému meziročnímu nárůstu této produkce, jak je znázorněno v Graf č. 2.5. Z grafu je také patrné, že Evropská Unie je lídrem výroby pelet, avšak Rusko zajímá rovněž nezanedbatelnou část, čímž reaguje na poptávku Evropské Unie. [30]



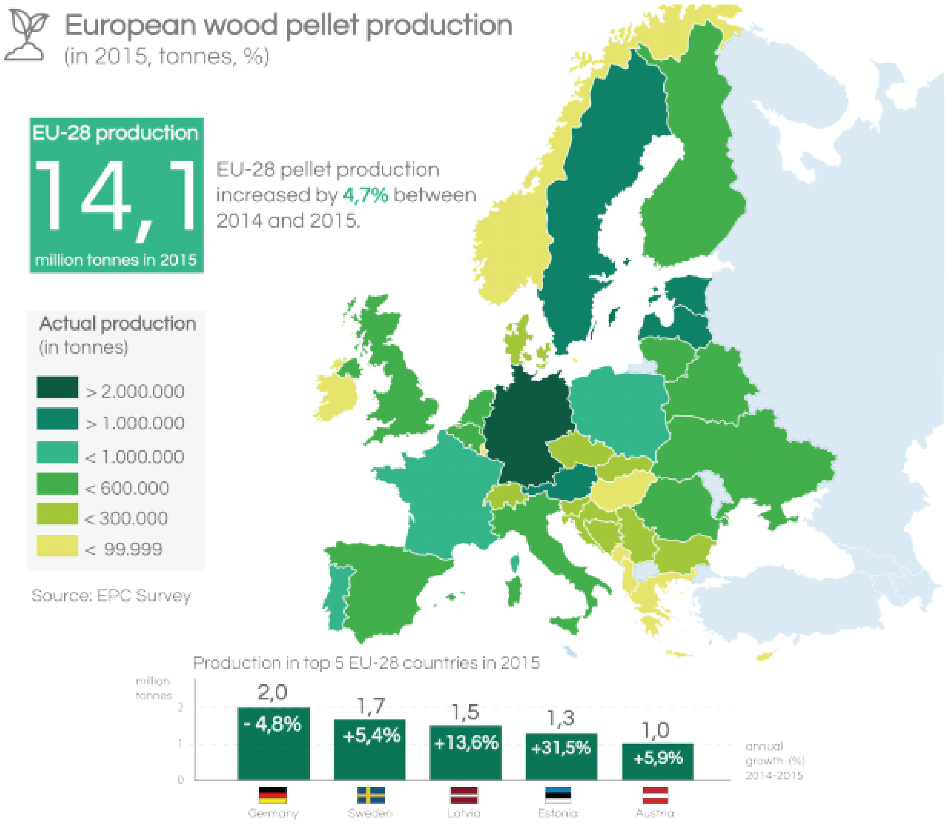
Graf č. 2.5 Vývoj celosvětové produkce pelet [30]

Co se týče spotřeby, zde Evropská unie zaujímá mnohem výraznější část. Jedná se až o 80 % všech pelet, které jsou na světě vyrobeny. Tomuto trendu jistě napomáhá průmyslové využití pelet především pro výrobu elektrické energie a tepla. Lídrem tohoto odvětví v Evropě jsou v dnešní době Anglie a Belgie. Spolu spalování dřevních pelet s fosilními palivy probíhá velice intenzivně např. v Japonsku, které je společně s Jižní Koreou největší asijský spotřebitel. Schématické znázornění výroby a spotřeby pelet na světové mapě je na Obr. č. 2.4. [40]

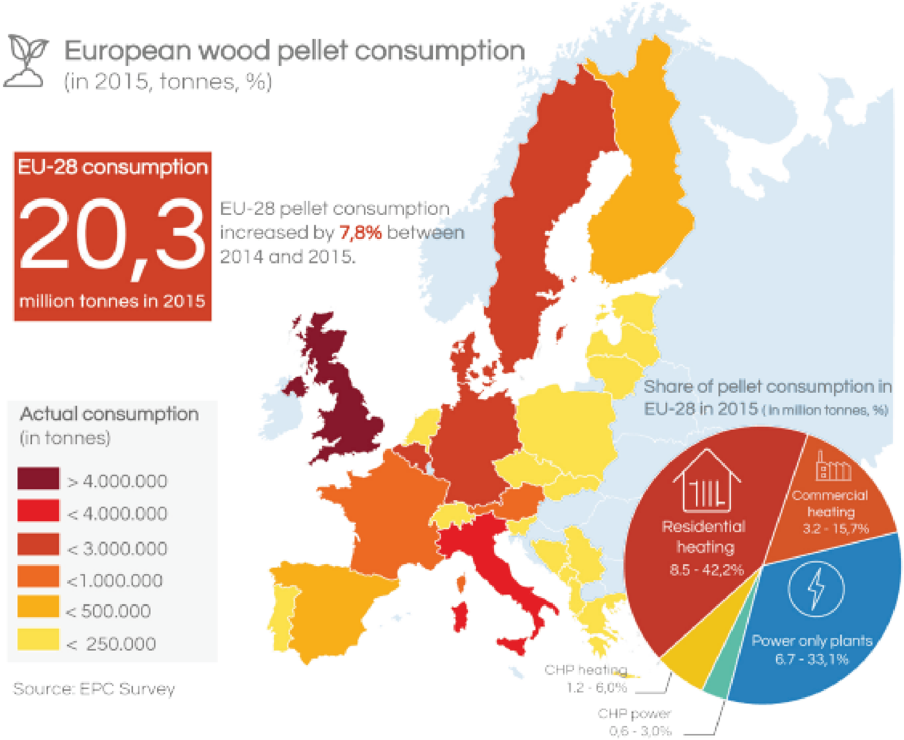


Obr. č. 2.4 Světová výroba a spotřeba pelet [40]

Podrobnější data o produkci dřevních pelet jsou patrná na Obr. č. 2.5 a Obr. č. 2.6. Na prvním z obrázků je znázorněna přibližná produkce dřevních pelet jednotlivých členských států EU v roce 2015 se zvýrazněním pěti největších producentů a porovnání jejich výroby v roce 2014. Na druhém z obrázků je zobrazena spotřeba dřevních pelet jednotlivých členských států EU s rozdělením jejich využití pro domácí/lokální vytápění, centrální vytápění, produkci elektrické energie a kombinovanou výrobu elektřiny a tepla. [40]



Obr. č. 2.5 Schématické znázornění produkce dřevních pelet v jednotlivých státech Evropy [40]



Obr. č. 2.6 Schématické znázornění spotřeby dřevních pelet v jednotlivých státech Evropy [40]

3. Typy teplovodních kotlů malých výkonů na pevná paliva

Při volbě nového kotle je zapotřebí uvážit mnoho parametrů, které jsou individuální pro každý vytápěný objekt. Mezi ty hlavní patří vlastní potřeba tepla, závislá na tepelných ztrátách budovy, možnosti skladování paliv, dostupnost paliv v dané lokalitě, míra komfortu obsluhy kotle a v neposlední řadě také pořizovací a provozní náklady. Dále budou rozděleny kotle dle úrovně řízení spalování a dle samotné technologie spalování. [24]

Pokud je kotel v technicky správném stavu a funguje tak, jak bylo výrobcem při jeho návrhu zamýšleno, platí, že čím více je schopen kotel sám ovlivňovat spalovací proces, tím kvalitněji hoření probíhá. Nejjednodušší regulace spalování kotlů malých výkonů je regulace množství přiváděného vzduchu a regulace množství přiváděného paliva. Kotle se dále dělí podle míry možností změny do těchto veličin. [24]

Dle přívodu spalovacího vzduchu:

- **Přirozený** – Přívod vzduchu je řízen pouze „sacím výkonem komínu“ spojeným s výškou komína, hustotou spalin (závislá na jejich teplotě), popřípadě mechanicky, nebo termostaticky regulovatelnými uzávěrami.
- **Nucený** – Podtlak, nebo přetlak v ohništi je řízen ventilátorem. Podtlakové kotle jsou konstruovány se spalinovým ventilátorem, přetlakové kotle jsou konstruovány se vzduchovým ventilátorem, je však nutné zde dbát na těsnost kotle. [24]

Dle přívodu paliva

- **Kotle s ručním přikládáním paliva** – Palivo je dávkováno uživatelem. Čas mezi dávkami závisí čistě na obsluze, přičemž se může odvíjet od rychlosti hoření, nebo od tepelného výkonu. [24]
- **Kotle s automatickým přikládáním paliva** – Palivo je dávkováno zcela kontrolovaně pomocí dopravníku. Aktuální potřebě dodávky tepla do teplovodního systému. Kotel je přizpůsobitelný změně kvality paliva. [24]

Z výše uvedeného textu se dá předpokládat, že kotle s nuceným přívodem vzduchu a s automatickým přikládáním paliva dosahují, díky větší kontrole nad spalovacím procesem, lepší úrovně spalování.

Rozdělení dle konstrukce

- **Kotel prohořívací** – probíhá v něm postupné spalování paliva, přičemž spaliny odcházejí přes vrstvu paliva

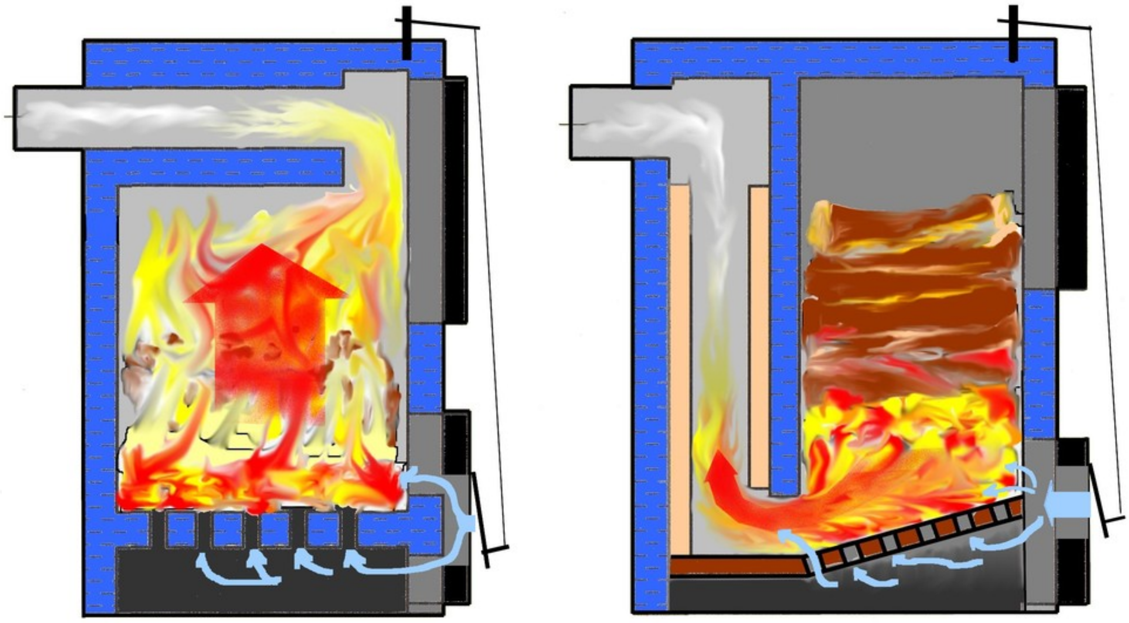
- **Kotel odhořívací** – probíhá v něm postupné spalování paliva, přičemž spaliny neprocházejí přes vrstvu paliva
- **Kotel zplyňovací –** kotle někdy nazývané také jako pryolýzní, jsou kotle s ručním přikládáním se sofistikovaným řízením přívodu vzduchu, přičemž spaliny neprocházejí přes vrstvu paliva
- **Kotel automatický** – kotle s automatickým přikládáním a automaticky řízeným přívodem vzduchu [24]

První dvě výše uvedené konstrukce kotlů jsou s přirozeným přívodem vzduchu a s ručním přikládáním paliva. Řízení spalování je tedy velice omezené. Výkon kotle je ovlivňován především kvalitou a vlhkostí paliva, jeho množstvím a účinností kotle. [24]

Prohořívací kotel se vyznačuje velice rychlým rozhořením celé vrstvy paliva, které zapříčiňuje ztrátu kontroly nad uvolňováním prchavé hořlaviny, což značně omezuje následující regulaci hoření. Konstrukce kotlů tohoto typu byla tradičně převážně litinová, přičemž kotle byly navrhovány především pro spalování koksu. V tomto typu kotlů lze při spalování černého uhlí dosáhnout emisní třídy 3, při spalování dřeva emisní třídy 2 a hnědé uhlí v něm nelze (dle předpisů a požadavků výrobce) spalovat vůbec. Dle aktuální legislativy se kotle emisních tříd 1 a 2 od roku 2013 nesmějí prodávat a po roce 2022 nebude možné je ani provozovat. Některé typy prohřívacích kotlů mohou být nachystány pro dodatečnou instalaci hořáku na pelety. Tedy je možné, že po roce 2022 může být dál kotel v provozu, pouze však s palivem, které umožňuje splnit požadovanou emisní třídu a pouze s certifikátem pro přestavbu kotle. [24]

Průběh hoření u odhořívacího kotle je odlišný tím způsobem, že palivo postupně odhořívá ve spodní části násypky. To způsobuje odchod prchavé hořlaviny do zóny vysokých teplot ve spalovací komoře, což způsobuje její kvalitnější vyhoření. Kotle této konstrukce běžně dosahují emisní třídy 2. Po určitých úpravách, jako například vložení správně tvarované keramické tvarovky, nebo změnou rozmístění distribuce vzduchu mohou tyto kotle plnit limity 4. emisní třídy. Výjimkou je výrobce OPOP, který dodává na trh odhořívací kotel plnící 5. emisní třídu. Takto upravené kotle mohou být tedy v prodeji do konce roku 2017 a po roce 2022 mohou být dále provozovány. [24]

Porovnání prvních dvou obou výše uvedených typů kotlů je znázorněno na Obr. č. 3.1. [25]



Obr. č. 3.1 Konstrukce prohořívacího a odhořívacího kotle [24]

Další kategorií kotlů na tuhá paliva jsou **kotle zplyňovací**. Kotle nesoucí tento název jsou zpravidla s ručním přikládáním, avšak na rozdíl od výše zmiňovaných zařízení je regulace spalování docíleno řízeným přísunem vzduchu pomocí ventilátoru, což omezuje míru vlivu komínového tahu na kvalitu spalování. Řídicí jednotka ovládající ventilátor tak může regulovat průběh spalování a výkon kotle změnou stavu ventilátoru mezi polohami zapnuto a vypnuto. [24]

Spalovací komora je vyzděna žárobetonovými tvarovkami, což má také velice pozitivní vliv na kvalitu splování, především tedy co se týče vyhoření prchavé hořlaviny. Nutno podotknout, že k jejímu uvolňování dochází při jakémkoliv spalování, tedy i u kotlů výše uvedených, zplyňovací kotle jsou však takto pojmenovány z hlediska jejího velice kvalitního využití, tedy spálení uvolněné prchavé hořlaviny. [24]

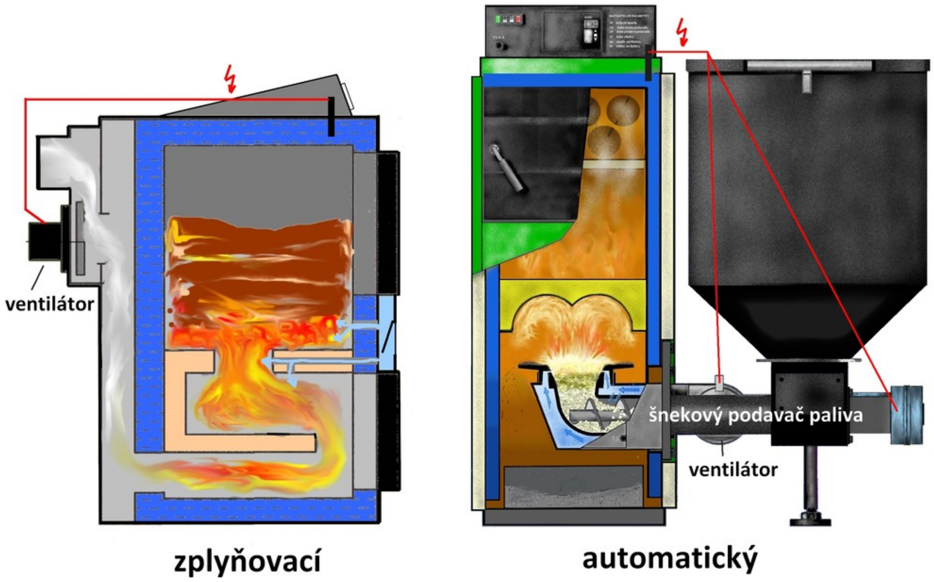
Nejkomfortnější technologií na spalování pevných paliv jsou **kotle automatické**. Tyto kotle mají nejširší možnosti regulace a to tak, že mohou regulovat množství vzduchu účastnícího se spalovacího procesu pomocí řízení ventilátoru, a také mohou regulovat množství paliva, které je do spalovacího prostoru dodáváno šnekovým dopravníkem. [24]

Tento typ kotlů pro použití v domácích podmínkách se začal v České republice objevovat až na konci minulého století. Definice samočinného (automatického) přikládání se pak objevila poprvé v evropské normě EN 303-5 pro malé teplovodní kotle až v roce 2000. Samočinnou dávkou paliva je myšleno *palivo dodávané samočinně závislosti na*

tepelném výkonu, přičemž se k této definice dále vztahuje poznámka, která říká, že *palivo může být dodáváno průběžně, nebo přerušovaně.* [24]

Co se týče obsluhy, je její vliv při spalování v těchto kotlích takřka eliminován. I z tohoto důvodu dnes automatické kotle dosahují 4. a 5. emisních tříd jak pro uhlí, tak pro fosilní paliva. [24]

Porovnání konstrukcí zplyňovacího a automatického kotle je znázorněno na Obr. č. 3.2.



Obr. č. 3.2 Konstrukce zplyňovacího a automatického kotle [24]

Ke srovnání jednotlivých technologií slouží tzv. „potenciál kotle", který představuje možnosti kotlů, co se týče produkovaných emisí a účinnosti. V Tab. č. 3.1 jsou uvedeny limitní hodnoty emisí CO, prachu a účinnosti, které jsou schopny kotle různých konstrukcí dosáhnout při běžném provozu a při spalování různých paliv. Hodnoty uvedené v tabulce jsou při běžném provozu v domácnosti, mohou se tedy lišit od hodnot naměřených v laboratorních podmínkách. [24]

	hnědé uhlí	dřevní pelety	nedřevní pelety	kusové dřevo
	emise CO [mg/m^3] při referenčních 10 % O_2			
automatický	200 – 1000	100 – 600	300 – 4000	–
zplyňovací	200 – 7000	–	–	200 – 6000
odhořívací	5000 – 15000	–	–	4000 – 15000
prohořívací	20000 – 30000	–	–	5000 – 25000
	emise TZL [mg/m^3] při referenčních 10 % O_2			
automatický	10 – 80	10– 100	30 – 150	–
zplyňovací	30 – 150	–	–	20 – 150
odhořívací	50 – 200	–	–	50 – 250
prohořívací	200 – 300	–	–	50 – 350
	účinnost [%]			
automatický	75 – 85	80 – 90	75 – 85	–
zplyňovací	70 – 80	–	–	75 – 85
odhořívací	60 – 75	–	–	60 – 75
prohořívací	40 – 60	–	–	55 –65

Tab. č. 3.1 Porovnání parametru „potenciál kotle" [24]

Někteří výrobci, jako například tuzemský ATMOS, nabízejí kotle, které jsou kombinací zplyňovacího a automatického, přičemž nabízejí možnost chodu na kusové dříví a po jejich vyhoření plynulý přechod na automatický režim s použitím pelet jako paliva. Možným příkladem této kategorie může být například kotel ATMOS DC18SP(L) vyobrazen na Obr. č. 3.3. [25]

Obr. č. 3.3 Kombinovaný kotel ATMOS DC18SP(L) [25]

U obchodníků se často můžeme setkat s dalšími názvy, jako například dvakrát zplyňující, popřípadě více či méně automatické, zpravidla se už ale nejedná o žádnou změnu, co se týče základního principu konstrukce kotle oproti výše zmíněným. [25]

3.1 Části kotle s automatickým podáváním paliva

Kotlem s automatickým podáváním paliva se myslí celek za sebou účelně řazených prvků, které zastřešuje do jednoho celku kotlové těleso. Všechny tyto prvky budou popsány v následující kapitole. Na Obr. č. 3.4 je znázorněno schéma zapojení kotle na pelety s okolním zařízením. Postupně jdou prvky na obrázku takto: 1 – mezi zásobník paliva s viditelnou zásobou paliva v řádech dnů s ohledem na výkon kotle; 2 – externí podavač paliva; 3 – hořák na pelety, zde hrncové konstrukce; 4 – ventilátor; 5 – přívodní vzduchová trubice; 6 – popelník; 7 – řídící jednotka. Dále je na obrázku možno vidět výměník tepla nad samotným hořákem. [1]

Obr. č. 3.4 Schéma sestavy kotle na pelety s okolním zařízením [41]

3.1.1 Hořák

Jako hořák nazýváme část kotle, kde dochází k dopravě paliva a spalovacího vzduchu na společné místo, ve kterém dochází k hoření. Nutno říct, že typu hořáku se často přizpůsobuje svou konstrukcí celý kotel. U většiny hořáků se místo, kde probíhá samotná reakce, nazývá rošt. Hořáky můžeme primárně rozdělit podle dopravy na několik kategorií, které jsou popsány níže. [1]

3.1.1.1 Hořáky s gravitační dopravou paliva

Jedná se o hořáky, které nepotřebují žádnou další hnací sílu k plynulému hoření, kromě podavače paliva ze zásobníku. Z něj palivo gravitačně padá přímo na rošt. [1]

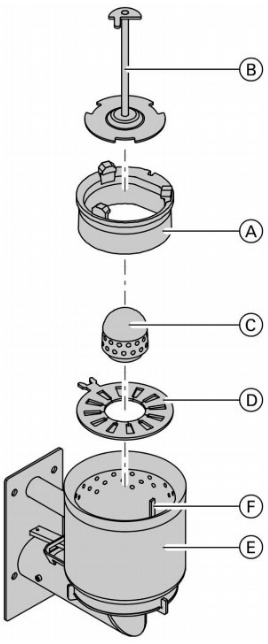
Hrncový hořák

Jejich použití se týká zejména kamen menších výkonů do 10kW, avšak výjimečně je možné narazit na větší kotel s tímto typem hořáku. Horní hranice výkonu, kdy je ještě hrncový hořák využitelný je do 30 kW. Klasický případ hrncového hořáku je vyobrazen na Obr. č. 3.5. Jak je na obrázku vidět, hořák se skládá z několika částí. Vnitřní (F) i vnější (E) stěny hrnce jsou vytvořeny z ohnivzdorné oceli, přičemž mezi stěnami proudí sekundární vzduch, který je do zapalovacího procesu zapojen až v nejvyšších partiích hořáku, tím se vzduch značně ohřeje, což působí velice kladně na snížení emisí CO. Ve spodní části hrnce je umístěna roštová deska (D), která zakrývá volný prostor. Primární vzduch pak k palivu proudí přes rozvod primárního vzduchu (C). [1]

Pro zapálení se běžně používá buďto horký vzduch o teplotě cca 400 °C, nebo se hořák zapaluje ručně. Pelety jsou do hořáku přiváděny samospádem přímo z podavače paliva. Kusovým dávkováním pelet je účinně zabráněno zahoření paliva, tedy nekontrolovanému prohoření paliva do zásobníku. Zbylý popel po dohoření paliva a případný nedopal propadává děrami v roštové desce, která může být otočná například s elektromotorem. Otočný pohyb je pak způsoben zasunutím čepu do výřezu a jeho otáčením kolem středu hořáku. [1]

Mezi výhody hrncového hořáku patří jednoduchá regulace výkonu, přijatelné emise a velice jednoduché čištění hořáku, který se většinou ukrývá za otevíracím sklem krbových kamen. [1]

Za nevýhody můžeme považovat způsob dopravy paliva na rošt, který narušuje strukturu žhavého jádra a rozvířením popela zvedá emise popílku (TZL). Rošt není vhodný pro spékavá paliva, jeho využití se tak vymezuje pouze na kvalitní bílé pelety. [1]



Obr. č. 3.5 Hořák používaný v kotli typu Vitolig 300; A – rozváděcí kužel; B – vyjímatelná otočná součást; C – rozvod primárního vzduchu; D – roštová deska; E – vnější plášť hrnce; F – vnitřní plášť hrnce [16]

Hořák s posuvným roštem

Jedná se o hořák vyvinutý za účelem umožnění spalování velice spékavých paliv, jako jsou kukuřice, pšenice, nebo obilí. Jeho funkčnost je zajištěna posuvnými roštnicemi, které narušují vrstvu spečeného paliva a posouvají jej směrem k popelníku. Palivo je zde jako u předchozího typu hořáku nabíráno mechanicky do místa nad hořákem, odkud gravitačně padá do prostoru hořáku. Lamely, které jsou na horní části ozubení posouvá klikový mechanismus vždy nahoru a vpřed. Tím je zajištěn kontinuální posuv a odvod popela. Tuto konstrukci využívala například firma VERNER a.s. ve svém kotli VERNER A251, jehož hořáková část je vyobrazena na Obr. č. 3.6. Na tomto obrázku je možné vidět přípravu pro spalování paliv s velkým obsahem popela, který je odváděn pomocí šnekového dopravníku, což je nezbytná součást hořáků s posuvným roštem. Dále je zde typická keramika, jejíž výška zajišťuje nižší emise CO. Výrobce u tohoto modelu garantuje bezproblémové spalování až 60 druhů paliv. Firma VERNER a.s. se sice dostala do insolvence, ale její výrobky jsou stále v prodeji díky společnosti PONAST spol. s r.o., která firmu odkoupila. [17,18]

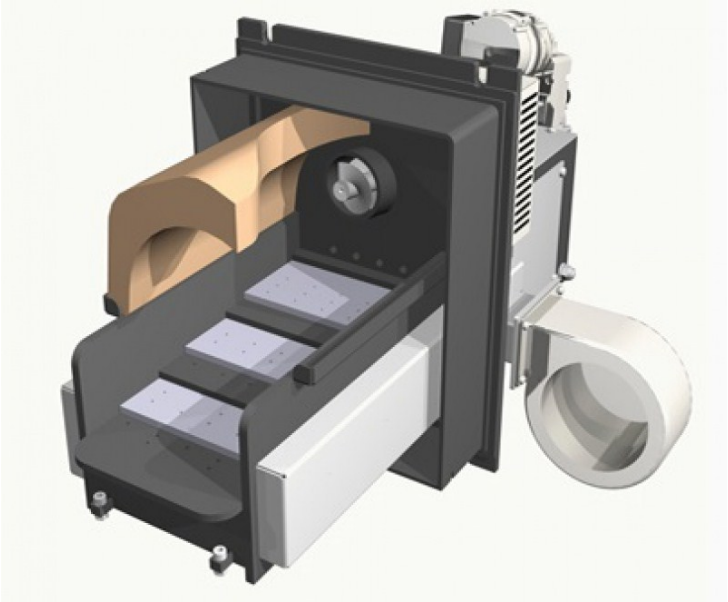
Výhodou těchto hořáků je velký rozsah možné regulace, dle výrobce 30 – 120 % a široké spektrum paliv, které je možno použít. Stejně jako u minulého typu hořáku zajišťuje až několika decimetrový volný pád jednotlivých pelet ochranu proti prohoření do zásobníku paliva. [17,18]

Nevýhodou je nevhodnost pro nízké výkony, pomalá odezva na regulaci a nutnost dalšího pohonu pro pohyb lamel. [17,18]

Obr. č. 3.6 Hořáková část kotle VERNER 251 [18]

Hořák s přesuvným roštem

Kotle vybavené těmito hořáky skýtají stejné výhody i nevýhody jako kotle s posuvným roštem. Odlišná konstrukce zajišťuje ještě lepší prohoření spékavého paliva. K podávání paliva dochází opět gravitačně na rošt, avšak pohyb roštu se liší od předchozího zmíněného. Rošt nedoplňují pohybující se lamely, avšak rošt samotný je tvořen deskami, které se mechanicky pohybují přes sebe. Takto vytvořený rošt je na Obr. č. 3.7. [19]



Obr. č. 3.7 Přesuvný rošt [19]

3.1.1.2 Hořáky s horizontální dopravou paliva

Jedná se o hořáky, které zahrnují kromě podavače paliva ještě další hnací sílu, většinou šnekový dopravník se středovou hřídelí, který dopravuje palivo na rošt. [1]

Hořák žlabový se zadním přívodem paliva

Tento typ konstrukce je hojně využíván především pro spalování jak kvalitních dřevních pelet, tak i pelet s mírným sklonem ke spékání. Posuv vrstvy zajišťuje tlak paliva z podavače, přičemž popel buď přepadne přes hranu hořáku, nebo je během hoření odfouknut vzduchem, který přichází z pod roštu, kde je tzv. směšovací prostor. Při návrhu toho hořáku je možné dle uvážení měnit úhel sklonu přívodu paliva z horizontálního až na stoupající úhel (u zavedených výrobců dosahuje cca 15°), stejně jako úhel roštu může být horizontální bez sklonu, nebo v druhém extrému může být až horizontální, v tomto případě však mluvím o jiném typu hořáku a roštu. Sklon běžného žlabového roštu se zadním přívodem paliva běžně dosahuje cca 15°. Tyto úhly ovlivňují dobu zdržení paliva v oblasti roštu a tím i množství nevyužité hořlaviny v popelu. Distribuce primárního a sekundárního vzduchu je zajištěna především děrami v roštu, popřípadě děrami umístěnými v horní části pod reflexní keramikou, která je běžnou součástí tohoto typu hořáku. Příklad hořáku se zadním přívodem paliva a pevným, nevyměnitelným roštem je na Obr. č. 3.8. [20]

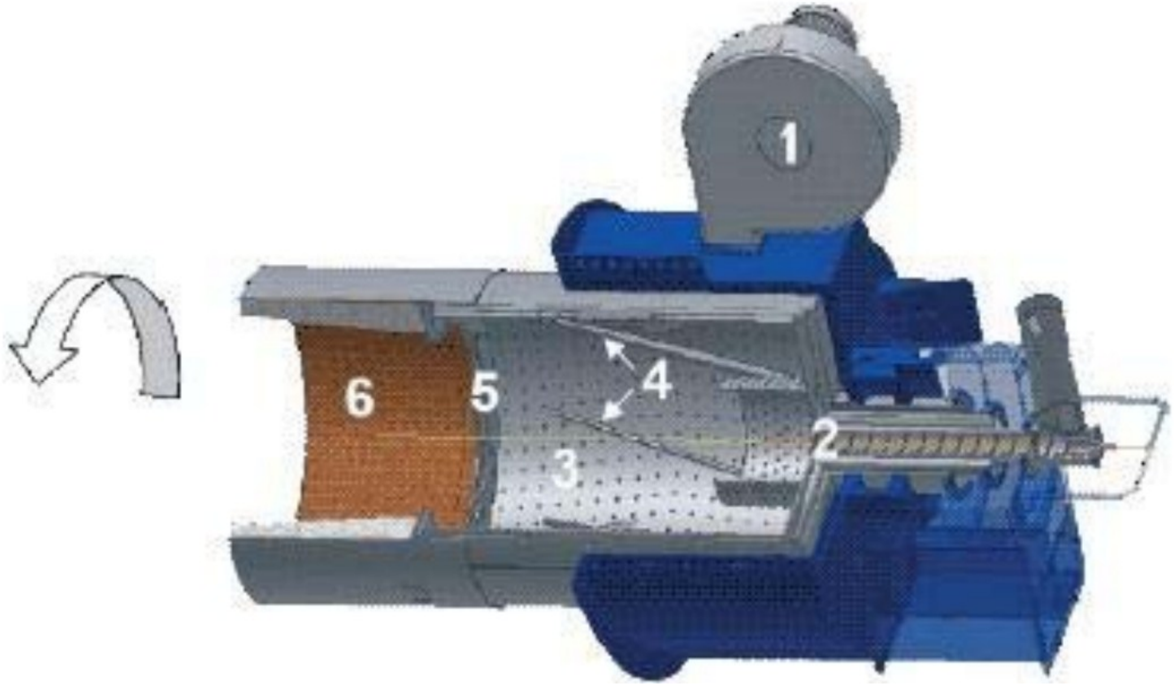
Obr. č. 3.8 Hořák univerzální (lopata) 25kW [20]

Mezi hlavní výhody patří menší hodnota mechanického nedopalu v případě stoupajícího hořáku a nižší emise CO v případě užití keramického reflektoru. Tento typ konstrukce hořáku umožňuje distribuci vzduchu dle uvážení konstruktéra po celé délce hořáku. Některé hořáky umožňují vyměnit rošt bez nutnosti vyměnit celý hořák a tím přizpůsobit kotel na jiný druh paliva. [1]

Nevýhodou je nutnost dalšího pohonu, tedy dalšího šnekového podavače.

Rotační bubnový hořák

Mezi běžné zástupce tohoto typu patří např. hořák umístěný v kotli PETROJET 40. Konstrukčně se kompletně liší od ostatních hořáků tím, že celé tělo tvoří rotující buben, který je opatřený lamelami, zajišťujícími míšení paliva. Buben se vyrábí více plášťový, přičemž primární vzduch je ohříván v mezi plášťovém prostoru a následně je vháněn do bubnu. Sekundární vzduch je pak dále přiváděn do koncové části bubnu tzv. tryskového kroužku, který je možné si představit jako sprchu, přes kterou se promývají všechny odcházející spaliny. Žádané turbulence spalin je docíleno rotačním pohybem bubnu. Pro hořáky tohoto typu větších výkonu je vhodné za samotný hořák zařadit také spalovací komoru, která zlepšuje proudění spalin. Pelety jsou do bubnu stejně jako v minulém případě přiváděny pomocí šnekového dopravníku se středovou osou. Následně přepadávají do malého tzv. interního bubnu, kde dochází k jejich sušení a ohřívání na zápalnou teplotu. Po tomto procesu přepadávají do samotného bubnu hořáku, kde probíhá samotný děj hoření pelet. Tento typ hořáku je znázorněn na Obr. č. 3.9. [17,21]



Obr. č. 3.9 Rotační bubnový hořák; 1 – ventilátor; 2 – šnekový dopravník; 3 – rotační buben pro spalování; 4 – šroubové lamely; 5 – tryskový kroužek; 6 – přídavná spalovací komora

Výhodou tohoto hořáku jsou velké dosažitelné výkony, možnost spalování agro pelet a alternativních pelet s velkým sklonem ke spékání. Hořák také zajišťuje široké spektrum regulace výkonu. Díky internímu bubnu je možné spalovat paliva s vyšší vlhkostí. [1]

Tento typ konstrukce je nevhodný pro nízké výkony, je zde zvýšené nebezpečí prohoření a do nákladů na vytápění je nutné připočíst náklady na elektrickou energii, které

jsou zde vyšší než u ostatních typů hořáků. Velkým problémem těchto hořáků je vysoká prašnost, tedy emise TZL. [1]

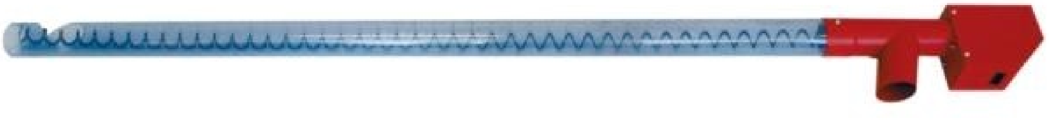
3.1.2 Hořáky s vytlačováním paliva vzhůru

Retortový hořák

Tento typ hořáku je vhodný především pro spalování velmi kvalitních dřevních pelet, popřípadě uhlí. Doprava paliva do hořáku je rovněž zajištěna pomocí šnekového dopravníku, tentokrát však umístěného pod úrovní vrstvy hořícího paliva. Palivo tedy vykonává pravoúhlou dráhu nejprve horizontálně a následně vertikálně směrem vzhůru. Do oblasti hoření, která může tvarem připomínat děravou misku. U těchto hořáků je běžná nutnost ručního zapalování. [1]

3.1.3 Podavač paliva

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, podavač paliva je zařízení dopravující pelety. Toto zařízení se vyrábí ve dvou různých variantách, a to jak šnekové, tak pneumatické. První zmiňované většinou fungující jako šnekový dopravník bez středové hřídele pracující pomocí elektromotoru ovládaného řídicí jednotkou. Podavač paliva může fungovat s totožnou konstrukcí, jak v systému s mezi zásobníkem paliva, tak v systému bez něj. V případě zapojení s mezi zásobníkem paliva jsou nutné dopravníkové prvky dva. Jeden ze skladu do mezi zásobníku a druhý pak z mezi zásobníku do hořáku. V případě zapojení bez mezi zásobníku může pelety podávat podavač rovnou ze skladu do hořáku. Příklad šnekového dopravníku paliva je znázorněn na Obr. č. 3.10. Průhledná trubice umožňuje vizuální kontrolu míry naplnění. Samotný proces plnění je časově poměrně náročný proces, který může trvat řádově desítky minut až hodiny, podle jeho délky. Celá trubice je dále velice náchylná na úhel naklonění. Nesprávná poloha může nepříznivě ovlivnit dávkování paliva, čas plnění, nebo dokonce nemusí vůbec umožnit kompletní naplnění. Při provozu je nutné dbát na neustálé zasypání spodního vstupního otvoru. Elektromotor, umístěný na opačné straně šneku, než je vstupní otvor musí být vždy v suchu, což musí být zajištěno i při nenadálém porušení tlakového celku. Orientační cena podavače při délce 3 m, který je vhodný pro výkony 10 – 20 kW je 10 000 Kč. [1,13]



Obr. č. 3.10 Podavač pelet značky OPOP o délce 3 m pro výkony hořáku 10 – 20 kW [13]

3.1.4 Ventilátor

Správným označením tedy tlačný radiální ventilátor je zařízení, které zajišťuje dostatečný přísun vzduchu pro co nejlepší průběh hoření. Většinou je umístěn bezprostředně v blízkosti hořáku. Otáčky elektromotoru hořáku jsou řízeny pomocí řídící jednotky. Vlastní spotřeba elektrické energie pro provoz ventilátoru se pohybuje v desítkách watthodin. Příklad běžně užívaného ventilátoru firmy MplusM fan je na Obr. č. 3.11. [15]

Druhou skupinou ventilátorů mohou být tzv. ventilátory tahové. Ty jsou umístěny za hořákem ve spalinovém traktu a zajišťují na rozdíl od výše zmiňovaného typu ventilátoru podtlak v kotli. Tyto ventilátory jsou vystaveny horším pracovním podmínkám, jako např. vyšší teploty, znečištěný pracovní plyn (spaliny). Z tohoto důvodu jsou také jejich pořizovací náklady vyšší a životnost menší. [1]

Obr. č. 3.11 Tlačný radiální ventilátor WPA 07 firmy MplusM fan [15]

3.1.5 Sklad paliva

Jedná se o prostor uzpůsobený k velkoobjemovému skladování paliva, které je dále dopravováno do zásobníku. Podle německé legislativy, přesněji tedy dle „Předpisu o topeništích a skladech paliv“ by se mělo jednat o prostor s ohnivzdornými stěnami s přihlédnutím na názor kominického mistra. Sklad bývá umístěn buďto přímo ve stejné budově jako kotel, využívající toto palivo, přičemž může být toto palivo volně, v pytlích, nebo v obřím vaku. Většinou je sklad umístěn se sklepích společně s kotlem. Méně rozšířená varianta je skladování paliva mimo budovu, a to v obřím vaku, tanku, nebo ve speciální nádrži. Často je možné se setkat s „přestavěním“ zásobníků původně využívající lehké topné oleje, dále jen LTO, na zásobník na pelety, což je možné provést s malými investičními náklady. Výše zmiňované obří vaky mají také velmi nízké pořizovací náklady, přičemž nabízejí možnost komfortního horního plnění a velice dobře využitelného spodního vyprazdňování. Příklad obřího vaku je uveden na Obr. č. 3.12. [1;11]

Obr. č. 3.12 Obří vak pro skladování pelet [11]

Požadavky pro sklad pelet:

- dostatečný prostor pro uskladnění (nejlépe sezónní) zásoby
- dostupná vzdálenost ke kotli
- dostupná vzdálenost pro naskladnění paliva (ručně, cisternou)
- dostatečný prostor pro manipulaci

Potřebné množství paliva na jedno topné období se zpravidla u novostaveb určuje výpočtem tepelných ztrát budovy, popřípadě potřeby teplé vody. U starších domů je tento

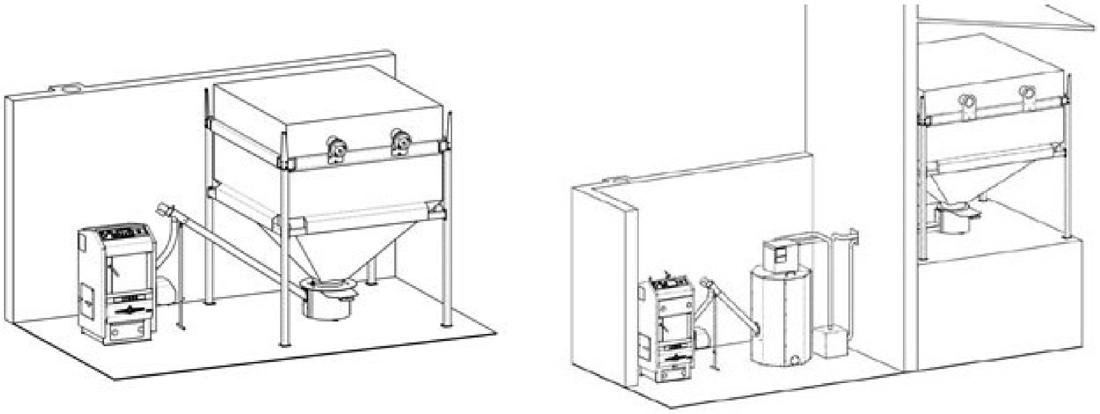
výpočet také možný, avšak nabízí se se odrazit od zkušenosti s jinými palivy z minulých topných sezón. Pokud bylo dříve v domě topeno LTO, nebo zemním plynem, vynásobením množství protopených litru, či m^3 dvěma získáme potřebné množství pelet v kg. Podobně je tomu u dřívějšího vytápění elektrickou energií, kdy je zapotřebí podělit množství spotřebovaných kWh pěti. Tento přepočet je přesný pro pelety s výhřevností 18 MJ/kg, za předpokladu, že účinnosti elektrokotle a kotle na pelety jsou srovnatelné. 18 MJ energie obsažené v jednom kilogramu pelet se rovná 5 kWh energie. Po přibližném určení potřebného množství pelet je možné si ověřit kapacitu chystaného skladu přiloženým výpočtem. [1]

Doporučený prostor skladu je možné zhruba spočítat:

$$PS = PT \cdot 0{,}9 \tag{2}$$

Při modelovém příkladu, kdy je potřeba tepla 10 kW vychází doporučený prostor skladu na 9 m^3. Při zaplnění výšky místnosti do 2/3 je možné počítat s využitelným prostorem 6 m3, což je přibližně 3900 kg dřevních pelet. [1]

Sklad paliv by měl být umístěn tak, aby bylo možné pomocí šnekového dopravníku bezobslužně dopravit pelety do zásobníku paliva, nebo přímo do kotle, pokud je to možné. Tyto dvě varianty jsou vyobrazeny na Obr. č. 3.13. V případě, že je sklad paliva ve velké vzdálenosti, je možné užít pneumatické dopravy. Často je běžná i praxe, kdy jsou pelety skladovány v pytlích a jednou za 2 – 3 dny, což jsou běžné kapacity mezi zásobníku, musejí být ručně dosypány. [1;12]



Obr. č. 3.13 Sklad pelet s přímým podáváním paliva do kotle (vlevo) a sklad s mezi zásobníkem paliva (vpravo) [12]

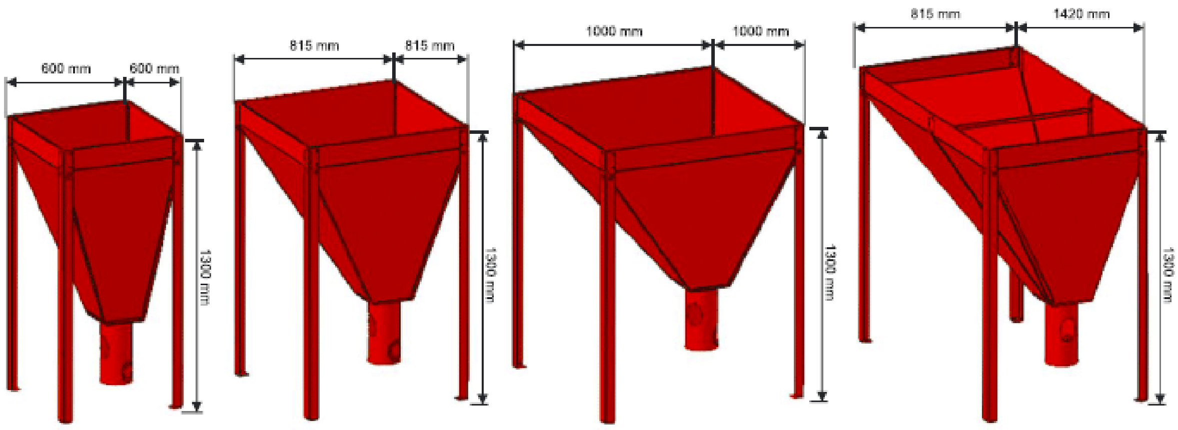
V případě, kdy je sklad paliv plněn z cisterny, je nutné jej umístit nejdále 30 m od místa, kam může cisterna přistavit a nejvýše 8 m nad úrovní výstupního hrdla cisterny, aby došlo k bezproblémové dodávce. S rostoucí vzdáleností skladu od cisterny však roste i poškození pelet, a to tak že na každých 5 m dopravované délky vzniká 0,2 % prachu.

V modelovém případě tak 30 m dlouhé potrubí při dopravě 1 tuny pelet dojde k poškození, tedy rozpadnutí 12 kg na prach. [1]

Největším nepřítelem při skladování pelet je vlhkost. Je nezbytně nutné zajistit suchý skladovací prostor bez zvýšené vlhkosti, nebo dokonce přítomnosti vody. Nedoporučuje se také sklad umisťovat do míst, kde vedou vodovodní trubky, na kterých by se mohla srážet voda. Nepřípustná je také odlupující se omítka, která ba mohl napadat mezi pelety a následně porušit dopravní cesty. [1]

3.1.6 Mezi zásobník paliva

Jedná se o nádobu určenou k přechodnému skladování pelet s intervalem plnění v řádech několika dnů dle objemu zásobníku, dle výkonu hořáku a dle četnosti fungování. Plnění probíhá buďto automaticky pomocí podavače paliva, nebo ručně, například z pytlů. Příklad mezi zásobníků pelet je uveden na Obr. č. 3.14. Cena takového zásobníku se odvíjí především od kvality zpracování a od objemu. Např. 400 l zásobník firmy PONAST spol. s r.o. stojí přibližně 6 000 Kč. Běžným případem je také mezi zásobník, který je přímo součástí kotle. Toto řešení je velice kompaktní, co se týče rozměrů. [1,14]



Obr. č. 3.14 Příklady mezi zásobníků pelet [14]

3.2 Ostatní části kotle s automatickým podáváním paliva

Žárobetonové tvarovky

Žáruvzdorné tvarovky často přímo navazují na hořák, nebo jsou v jejich těsné blízkosti. Jejich úkolem je zamezení rychlému vychlazení plamene v oblasti nad hořákem, což má kladný dopad na snížení emisí CO, které by ve příliš vychlazených spalinách nemohlo dále reagovat.

Výměník

Nedílná součást každého kotle pro vytápění je výměník. Jedná se o součást sloužící k výměně tepelných energií mezi médii o různých parametrech. V případě domácích kotlů se vždy jedná o výměník spaliny – voda. Co se týče provedení, nejčastějším řešením je výměník trubkový umožňující instalaci šroubových turbulátorů. Dalším možným provedením je lamelové, používající např. firma BENEKOV.

Turbulátory

Jedná se velmi důležitou součást výměníků tepla, která se vyskytuje u většiny kotlů s lepší účinností. Turbulátory jsou prvky, které jak jejich název napovídá, mají za úkol rozvířit tok spalin a tím z intenzifikovat přestup tepla. Částečně také zaujímají funkci odlučovače prachu. Tvarově se setkáváme s různými provedeními, nejběžněji pak se šroubovicí, která s minimální vůlí zapadá do trubkového výměníku. Účinky turbulátorů ovlivňují jeho rozměry, a to, jak co se týče délky (ovlivňuje velikost kotle a výměníku), tak co se týče stoupání, popřípadě tvarového provedení (s plným středem, s volně průchozím středem). V případě pohyblivé konstrukce těchto prvků udává výrobce v návodu kotle počet pohybů turbulátoru nahoru a dolů před topnou sezonou, což by mělo zajistit jejich vyčištění od prachu. Tento pohyb je z pravidla vyvozován klikou na straně kotlového tělesa.

Často pomíjená funkce brzdičů, jak se také tyto prvky nazývají, je akumulace tepla, čímž vyhlazují výkonovou charakteristiku kotle, velikost kotle je úměrná hmotnosti použitých turbulátorů.

Spalinový ventilátor

Stejně jako je ventilátor umístěn před hořákem, může být také umístěn (z pohledu proudu spalin) až na konci kotle. Jedná se pak o ventilátor spalinový, místo ventilátoru vzduchového. Kotel je pak v tzv. podtlakovém režimu, protože spalinový ventilátor udržuje v průběhu hoření v kotli konstantní podtlak.

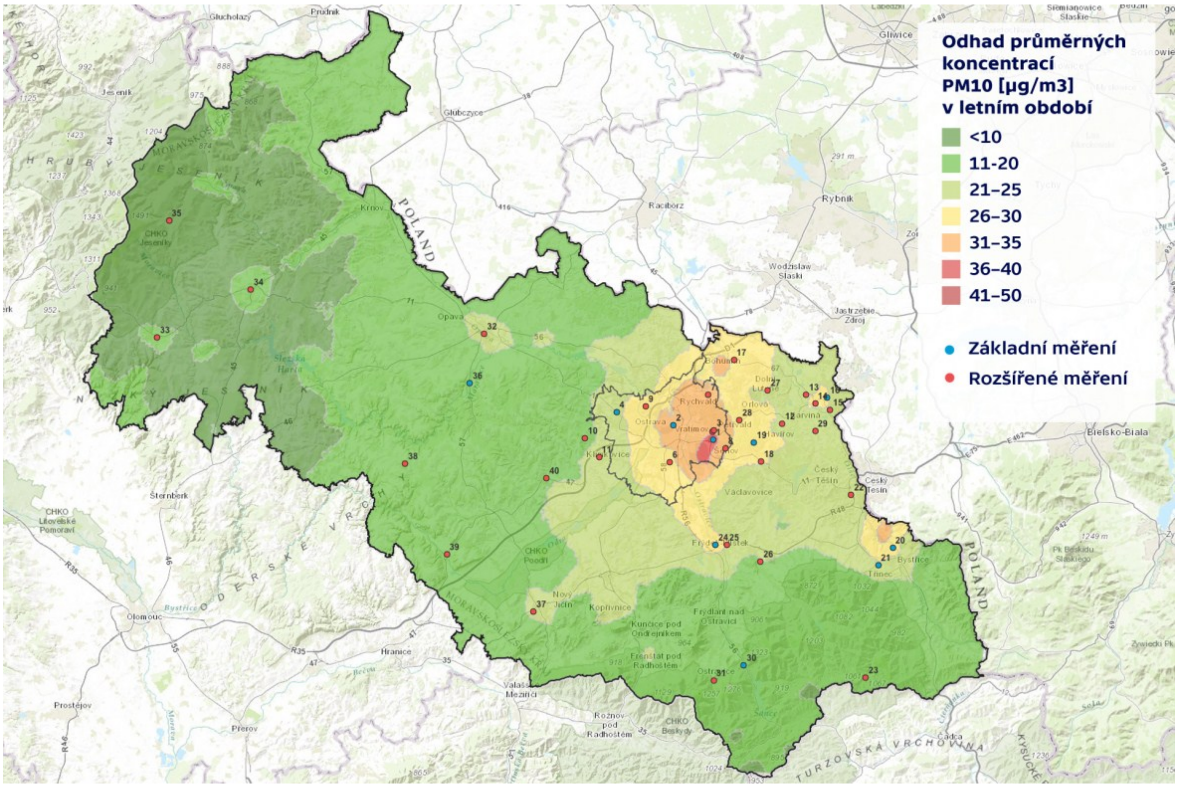
Snímače

Aby mohl vůbec automatický kotel fungovat bez nutného zásahu obsluhy, musí mít o svém provozu dostatek informací. Ty mu zajišťuje řada snímačů. Pro představu se může jednat o teplotu vstupní a výstupní vody, teplotu vstupního (okolního) vzduchu, či lambda sondu, jakožto čidlo množství kyslíku ve spalinách. Velice důležité je pak čidlo světla, které vyhodnocuje stav plamene v hořáku a podle toho řídí zapalování a vyhasínání.

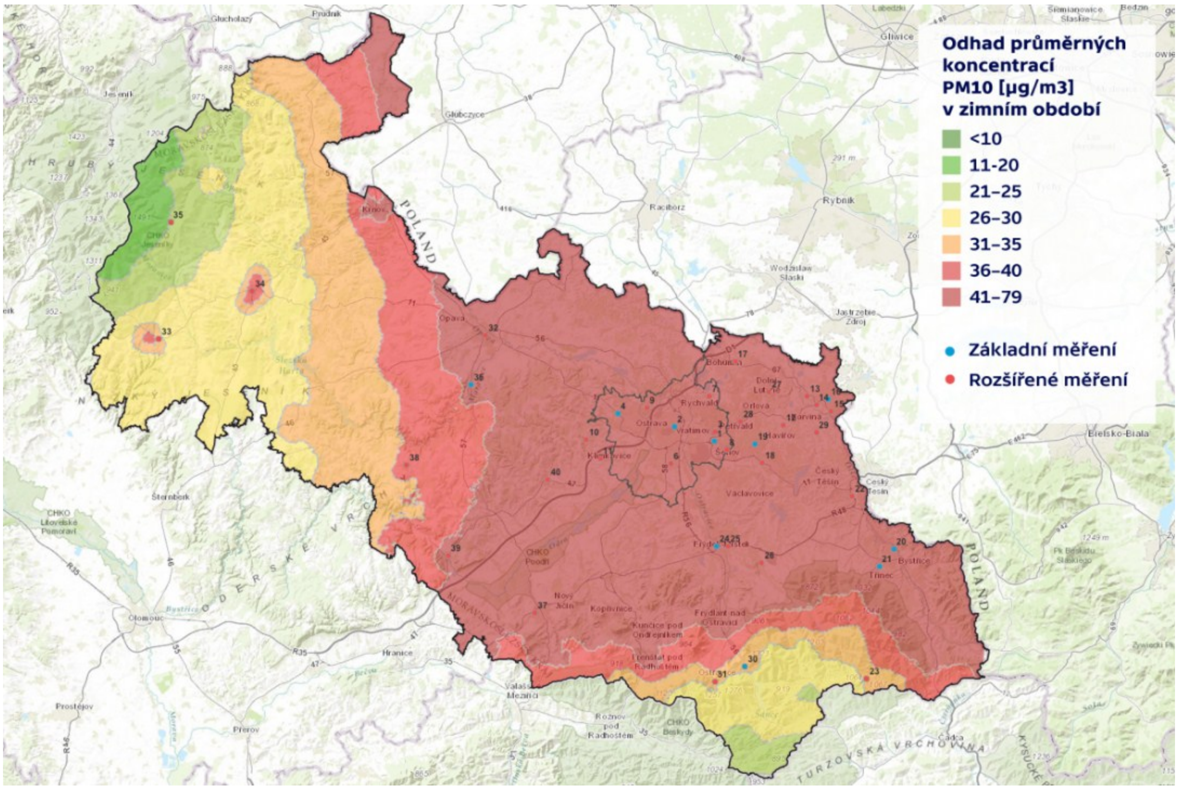
4. Legislativa v oblasti malých spalovacích zařízení

Při jakémkoliv spalování vznikají emise různých látek, které mají různý dopad na životní prostředí. Z tohoto důvodu dochází ke zvyšování požadavků na kvalitu spalování a účinnost spalovacích zařízení. Tyto požadavky jsou dány jak evropskou legislativou, tak legislativou jednotlivých států. V této kapitole bude uveden přehled zákonů a nařízení, které ovlivňují aktuální situaci v České republice a v Evropě. [26]

Na základě poslední studie důležitosti vlivu malých spalovacích zařízení na kvalitu ovzduší se hovoří o těchto topeništích jako o dominantních znečišťovatelích, co se týče emisí tuhých znečišťujících látek. Běžně nastává situace, kdy je v malých městech a na vesnicích horší kvalita ovzduší než v oblastech se silně rozvinutým průmyslem, a to zejména při kombinaci zhoršených rozptylových podmínek společně s malými výškami komínů a velkým množstvím vypouštěných znečišťujících látek z topenišť těchto komínů využívajících. Tuto skutečnost popisují Obr. č. 4.1 a Obr. č. 4.2, na kterých jsou vyobrazeny koncentrace prachových částic v moravskoslezském kraji v letním období, tedy mimo topnou sezónu, a na druhém obrázku pak v topné sezóně. Je Jasně patrné, že v topné sezóně je situace mnohem horší. [26;44]



Obr. č. 4.1Koncentrace poletavého prachu PM10 v Moravskoslezském kraji mimo topnou sezónu [44]



Obr. č. 4.2 Koncentrace poletavého prachu PM10 v Moravskoslezském kraji v topné sezóně [44]

Důležitost regulace malých spalovacích zařízení podtrhuje nezanedbatelné množství domácností, které jsou v České republice vytápěny tuhými palivy. Jedná se o cca 336 000 domácností vytápěných uhlím a cca 285 000 domácností, které jsou vytápěny palivem na bázi dřeva. Trend se ubírá směrem větší oblíbenosti spalování biopaliv, které zaznamenaly nárůst o 88 % oproti roku 2001. Tyto hodnoty jsou převzaty z posledního sčítání lidu v letech 2001 a 2011. [26]

Legislativní nařízení, která mají za cíl kontrolovat intenzitu znečišťování ovzduší se ubírají dvěma směry. [26]

- **Testování zařízení v autorizované zkušebně před jejich vstupem na trh** – cesta do značné míry zavádějící z toho důvodu, že testování probíhá vždy s optimálním palivem a proškolenou obsluhou, což má značný vliv především na měřené emise a účinnost prohřívacích a odhořívacích kotlů. Tyto dva faktory se pak mohou v běžných domácích podmínkách značně různit a podle toho se mohou lišit také produkované emise.
- **pravidelné měření v reálném provozu** – mnohem efektivnější možnost legislativně uzákoněna pouze v Rakousku a Německu [26]

4.1 Požadavky dle ČSN EN 303-5 a platných českých zákonů

Aktuálně je v platnosti norma ČSN EN 303-5:2013, která popisuje způsoby zkoušení kotlů, požadavky na konstrukční materiály a bezpečnost. Dále norma udává mezní hodnoty emisí, na základě kterých jsou pak jednotlivým kotlům přidělovány třídy 3 až 5, přičemž historicky udávala nejprve třídy 1 až 3 avšak zplyňovací a automatické kotle takřka vždy splňovaly hodnoty emisí pro třídu 3, a tak byla norma v novějším vydání přepracována tak, že byly umazány třídy 1 a 2 a byly přidány třídy 4 a 5. Mezní hodnoty emisí pro třídu 3 zůstaly v novém vydání beze změn. Další obměny mezi vydáními normy se týkaly odlišného přístupu k emisním limitům prachu u alternativních biopaliv a odlišné metodiky měření emisí prachu, přičemž kotle musely nově plnit jeho emisní limity nejen při 100 % P_{jm} ale i při 30 % P_{jm}. [26]

Dle výsledků vstupních spalovacích zkoušek při uvedení každého kotle na trh je mu přiřazena třída. Kotli je přiřazena vždy nejnižší třída jak z hlediska emisí, tak z hlediska dosažené účinnosti. Přehled těchto emisních tříd je v Tab. č. 4.1, Tab. č. 4.2 a Tab. č. 4.3 [26]

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný výkon [kW]	Mezní hodnoty emisí (koncentrace)		
			CO		
			mg/m^3_N při 10% O_2 (mg/m^3_N při 13% O_2)		
			Třída 3	Třída 4	Třída 5
Ruční	Biologické	≤ 50	5 000 (3 636)	1 200 (873)	700 (509)
		> 50 až 150	2500 (1818)		
		> 150 až 500	1 200 (873)		
	Fosilní	≤ 50	5 000 (3636)		
		> 50 až 150	2 500 (1818)		
		> 150 až 500	1 200 (873)		
Samočinná	Biologické	≤ 50	3 000 (2182)	1 000 (727)	500 (364)
		> 50 až 150	2 500 (1818)		
		> 150 až 500	1 200 (873)		
	Fosilní	≤ 50	3 000 (2 182)		
		> 50 až 150	2 500 (1 818)		
		> 150 až 500	1 200 (873)		

Tab. č. 4.1Mezní hodnoty emisí CO dle ČSN EN 303-5:2013[26]

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný výkon [kW]	Mezní hodnoty emisí (koncentrace) OCG mg/m^3_N při 10% O_2 (mg/m^3_N při 13% O_2)		
			Třída 3	Třída 4	Třída 5
Ruční	Biologické	≤ 50	150 (109)	50 (36)	30 (22)
		> 50 až 150	100 (73)		
		> 150 až 500	100 (73)		
	Fosilní	≤ 50	150 (109)		
		> 50 až 150	100 (73)		
		> 150 až 500	100 (73)		
Samočinná	Biologické	≤ 50	100 (73)	30 (22)	20 (15)
		> 50 až 150	80 (58)		
		> 150 až 500	80 (58)		
	Fosilní	≤ 50	100 (73)		
		> 50 až 150	80 (58)		
		> 150 až 500	80 (58)		

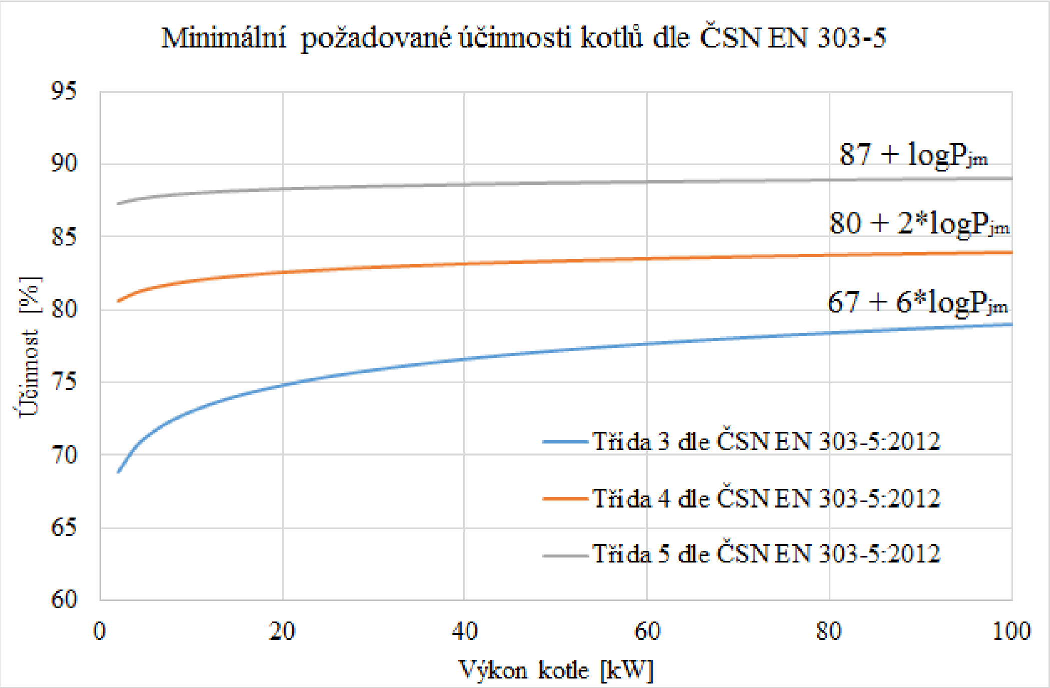
Tab. č. 4.2 Mezní hodnoty emisí OCG dle ČSN EN 303-5:2013[26]

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný výkon [kW]	Mezní hodnoty emisí (koncentrace) Prach (TZL) mg/m^3_N při 10% O_2 (mg/m^3_N při 13% O_2)		
			Třída 3	Třída 4	Třída 5
Ruční	Biologické	≤ 50	150 (109)	70 (55)	60 (44)
		> 50 až 150	150 (109)		
		> 150 až 500	150 (109)		
	Fosilní	≤ 50	125 (91)		
		> 50 až 150	125 (91)		
		> 150 až 500	125 (91)		
Samočinná	Biologické	≤ 50	150 (109)	60 (44)	40 (29)
		> 50 až 150	150 (109)		
		> 150 až 500	150 (109)		
	Fosilní	≤ 50	125 (91)		
		> 50 až 150	125 (91)		
		> 150 až 500	125 (91)		

Tab. č. 4.3 Mezní hodnoty emisí prachu (TZL) dle ČSN EN 303-5:2013[26]

Dalším kontrolovaným parametrem před vstupem kotle na trh je jeho účinnost. Minimální účinnost kotle je definována vztahem na základě zařazení do emisní třídy a na základě jeho výkonu. Nutno říct, že měření výkonu se v České republice provádí při 100 % P_{jm} a při 30 % P_{jm}, pouze u zplyňovacích kotlů, u kterých výrobce uvede, že musí být spojeny s akumulační nádobou, se toto měření při sníženém výkonu nevykonává. Se snižujícím se výkonem pak klesají hodnoty účinnosti, což ale není jediný negativní dopad. Dále se

většinou zvyšují emise prachu, CO a uhlovodíků. Minimální požadované účinnosti kotlů jsou znázorněny v Graf č. 4.1. Graf je pro kotle do výkonu 100 kW. [26]



Graf č. 4.1 Minimální požadované účinnosti kotlů dle ČSN EN 303-5:2013 [26]

Kromě těchto povinností prodejce, uvádět na trh „způsobilá“ zařízení, jsou legislativně dány i povinnosti pro provozovatele. Dle zákona č. 201/2013 Sb. je zakázáno v kotlích do 300 kW příkonu spalování lignitu, kalů a hnědého energetického uhlí. V případě nedodržení hrozí provozovateli kotle pokuta až 50 000 Kč. Stejně vysoká pokuta hrozí provozovateli kotle na tuhá paliva, který po září 2012 nedodrží přípustnou tmavost kouře. Rovněž pokuta 50 000 Kč může být udělena provozovateli kotle, který nesplňuje hodnoty emisí odpovídající 3 třídě dle ČSN EN 303-5:2013 po datu 1.9.2022. Dále zákon hovoří o povinných revizích způsobilou osobou, která bude muset být opakována pravidelně vždy co 2 roky, přičemž první musí být do 31.12.2016. V případě nedodržení této podmínky hrozí majiteli pokuta až do výše 20 000 Kč. Tato kontrola obnáší kontrolu celistvosti kotle, řídící jednotky, regulačních a zabezpečovacích prvků, kvality a typu používaného paliva, funkčnosti podavače paliva a skladu paliva. Na základě této kontroly je provozovateli kotle vystaven doklad o kontrole. [26]

Jak je patrné výše, provozovatelé kotlů, krbových kamen a krbových vložek do příkonu 10 kW jsou nadále povinni provádět pouze kontrolu spalinových cest, a to vždy v intervalu nejdéle co 2 roky. [26]

Pro komplexní orientaci jsou dále uvedena stěžejní data pro prodejce a provozovatele malých kotlů na tuhá paliva:

1.1.2014 Zákaz prodeje kotlů 1 a 2. emisní třídy

1.1.2017	Počátek povinnosti předložení revizní zprávy kotle na základě žádosti obecního úřadu (pro majitele kotlů o výkonu od 10 do 300kW)
1.1.2018	Konec legálního prodeje kotlů 3. emisní třídy
1.1.2020	Konec legálního prodeje kotlů 4. emisní třídy
1.9.2022	Konec legálního užívání kotlů 1. a 2. emisní třídy (nezáleží na datu pořízení kotle) [26]

Novela zákona 201/2012 Sb. – zákon 369/2016 Sb.

Dne 19.10.2016 byl Senátem České republiky schválen jeden z nejdiskutovanějších zákonů roku 2016 a to zákon 369/2016 Sb., o ochraně ovzduší. Jedná se novelu staršího zákona z roku 2012 a upravuje některé zvláště zásadní práva a povinnosti provozovatelů kotlů. [28]

Nejdůležitější části výše zmiňovaného zákona je ta, která umožňuje na základě opakovaného důvodného podezření vstoupit do domu podezřelého, z nedodržování povinností provozovatele stacionárního zdroje. Tato prohlídka je ohlášena předem úřadem s rozšířenou působností, přičemž vlastník je povinen kontrolu umožnit. V případě opačného případu je možné podezřelému provozovateli uložit pokutu až 50 tisíc korun. [28]

Ze zákona byla dále vyňata část věty, která udělovala výjimku spalovacím stacionárním zdrojům o jmenovitém výkonu do 300 kW, které nesloužily jako zdroj tepla pro teplovodní soustavu ústředního vytápění, ty nemusely splňovat emisní požadavky. Emisní limity jsou tedy v platnosti pro všechna lokální topidla. [28]

Mezi další změny patří například povinnost prodejce paliva předložit kupujícímu doklad, který dokazuje splnění požadované kvality paliva. [28]

4.1.1 Německo

Stejně jako v České republice je základem Legislativy ovlivňující malá spalovací zařízení norma EN 303-5:2012, která je dále zpřísňována vyhláškou BlmSchv[32] (2010). Zpřísnění se týká koncentrací CO a TZL ve spalinách. Limitní hodnoty těchto koncentrací jsou znázorněny v Tab. č. 4.4. Těchto požadavků musí být dosaženo pouze při jmenovitém výkonu. [26]

	Palivo	Jmenovitý tepelný výkon [kW]	1) Prach (TZL) [mg/m^3_N]	1) CO [mg/m^3_N]
Zdroje instalované po 31.12.2014 - Etapa 2	Uhlí, rašelina, dřevo, štěpka, piliny, dřevní pelety a brikety	≥ 4	20	400
	Povrchově upravené dřevo, překližky	≥ 30 až 500	20	400
		> 500	20	300
	Sláma a podobné materiály	≥ 4 až 100	200	400

Tab. č. 4.4 Limitní hodnoty emisí, CO a TZL (prachu) dle 1. BImSchV [26]; 1) je vztaženo k suchým spalinám za normálních podmínek a obsahu referenčního kyslíku O_2 = 13% [26]

Při přímém porovnání české a německé legislativy je jasně patrné, že v u našich západních sousedů již několik let není možné uvést do provozu kotel, který by nesplňoval přísnější emisní limity, co se týče tuhých znečišťujících látek, než jsou hraniční pro kotle 5. emisní třídy, mimo kotle na slámu a podobná paliva. Dále je patrné, že již nerozlišují rozdíl mezi ručním a automatickým přikládáním. [26]

Za povšimnutí stojí také fakt, že v rozšiřující německé legislativě nejsou dány limity pro účinnost zdroje. Minimální účinnost nově uváděných zařízení na německý trh je stejně jako v České Republice legislativně regulována pouze normou ČSN EN 303-5:2013. Zajištění uvádění do provozu pouze kotlů s vysokou účinností probíhá nastavováním podmínek dotačních programů, které požadují minimální účinnost 89 % pro kotle s ručním přikládáním a dokonce 90 % pro kotle s automatickým přívodem paliva. [26]

I podmínky pro provozovatele jsou mnohem přísnější, než je tomu v České republice. Provozovatel je povinen zajistit kontrolu splnění požadavků emisí CO a tuhých znečišťujících látek při měření v domácnosti v reálném provozu v pravidelném intervalu, nejpozději však co 2 roky prověřenou kominickou firmou. [26]

4.1.2 Rakousko

Stejně jako tomu je v Německu, i pro Rakousko platí jako základ norma EN 303–5:2012, která je zde však rozšiřována dohodou 15a B-VG[33]. Rozšiřující požadavky na maximální hodnoty emisí jsou v Tab. č. 4.5 pro kotle s ručním přikládáním a v Tab. č. 4.6 pro kotle s automatickým podáváním paliva. Ustanovení platí pro kotle do jmenovitého výkonu 400 kW. [26]

	Emisní limity [mg/MJ]					
	Dřevěná paliva		Ostatní standardizovaná biogenní paliva		Fosilní paliva	
Parametr	**Lokální spotřebiče**	**Kotle pro ústřední vytápění**	**< 50kW jmenovitého výkonu**	**> 50kW jmenovitého výkonu**	**< 50kW jmenovitého výkonu**	**> 50kW jmenovitého výkonu**
CO	1 100	500	1 100	500	1 100	500
NOx	150	100	300	300	100	100
OCG	50	30	50	30	80	30
Prach (TZL)	35	30	35	35	35	35

Tab. č. 4.5 Emisní limity dle 15a B-VG pro kotle s ručním přikládáním paliva; [26]

Parametr	Emisní limity [mg/MJ]			
	Dřevěné pelety - lokání spotřebiče	**Dřevěné pelety - kotle pro ústřední vytápění**	**Ostatní dřevěné palivo**	**Ostatní standardizovaná biogenní paliva**
CO	500[a]	250[a]	250[a]	500
NO_x	100	100	100	300
OCG	30	20	30	20
Prach (TZL)	25	20	30	35

Tab. č. 4.6 Emisní limity dle 15a B-VG pro kotle s automatickým přikládáním paliva; a – limitní hodnota může být překročena o 50% v případě zkoušky při sníženém výkonu (30% jmenovitého výkonu [26]

Výše zmíněné emisní limity musí být splněny, stejně jako v České republice i Německu, jak při jmenovitém výkonu, tak při sníženém výkonu. U kotlů s automatickým přikládáním je dán snížený výkon na 30 % jmenovitého výkonu a u kotlů s ručním přikládáním paliva je dán na 50 % jmenovitého výkonu. Výjimka z této časti zkoušky je dána pro kotle s ručním přikládáním paliva o jmenovitém výkonu do 8 kW a pro kotle s automatickým přikládáním paliva o výkonu do 10kW při zapojení v sestavě s akumulační nádobou. V Tab. č. 4.7 jsou uvedeny minimální povolené hodnoty účinností kotlů do 400 kW výkonu dle 15a B-VG. [26]

Typ zařízení	Jemnovitý tepelný výkon [kW]	Minimální účinnost [%]
Obecně	-	75
Roční přikládání	$\leq$ 10	79
	> 10 až 200	(71,3 + 7,7 · log P_{jm})
	> 200	89
Automatické přikládání	$\leq$ 10	80
	> 10 až 200	(72,3 + 7,7 · log P_{jm})
	> 200	90

Tab. č. 4.7 Minimální povolená účinnost dle 15a B-VG [26]

4.1.3 Ekodesign

Zjednodušeně řečeno se jedná o soubor parametrů udaných směrnicí Evropské unie, rozšiřující požadavky na kotle splňující emisní limity natolik, že jim byla přiřazena 5. třídu (dle EN 303-5:2012), tedy jediné možné kotle, které bude možno v EU legálně zakoupit po 1.1.2020. Kompletní parametry pro splnění Nařízení EU 2015/1189 o ekodesignu jsou uvedeny v Tab. č. 4.8. Hlavním důvodem pro zavedení této směrnice je rozšíření nejúčinnějších technologií a snížení spotřeby energie při používání výrobku. [27;45]

Kotle na tuhá paliva - parametry pro Ekodesign	Limitní hodnoty – platnost od 1.1.2020
sezónní energetická účinnost vytápění [%]	75 (kotle o výkonu $\leq$ 20 kW)
	77 (kotle o výkonu > 20 kW)
Pevné částice (PM)	40 (kotle s automatickým podáváním paliva)
	60 (kotle s manuálním podáváním paliva)
organické plynné sloučeniny (OGC) [mg/m^3]	20 (kotle s automatickým podáváním paliva)
	30 (kotle s manuálním podáváním paliva)
oxid uhelnatý (CO) [mg/m^3]	500 (kotle s automatickým podáváním paliva)
	700 (kotle s manuálním podáváním paliva)
oxidy dusíku (NOx) [mg/m^3]	200 (kotle s automatickým podáváním paliva)
	350 (kotle s manuálním podáváním paliva)

Tab. č. 4.8 Přehled schválených hodnot emisních limitů a účinností pro kotle na tuhá paliva při 10% podílu O_2 [27;45]

4.2 Shrnutí

Zatímco emisní limity CO, OCG a Prachu (TZL) má vnitrostátním nařízením nejpřísněji regulováno Německo, vůbec nesleduje emise NO_X. Ty má v legislativě zakořeněné pouze Rakousko, které má současně nejtvrdší požadavky na účinnost kotlů.

Na druhou stranu jediná Česká republika nemá zavedenou legislativu pro pravidelné měření množství emisí v domácnostech, což je podle autora vhodná cesta, která jako jedna z mála umožňuje kontrolu provozovatelů kotlů s důrazem na jejich stav. [26]

V následujících letech by se evropský trh měl dočkat sjednocení hodnocení kvality spalovacích zařízení, díky nařízení EU 2015/1189 o ekodesignu. Jak již bylo výše zmiňováno, jedná se o požadavky mírně rozšiřující dnešní třídu 5. Rozšíření se projevuje především v zavedení kontroly emisí NO_x. [26]

Mezi další nástroje směřující ke snížení produkovaných emisí lokálními topeništi patří především dobrovolné ekologické programy, jako například v České republice běžící Nová zelená úsporám, která nabízí dotaci pro koupi kotlů na biomasu jak automatických, tak i s ručním přikládáním, avšak splňující přísnější emisní limity, než je povoleno legislativou. Tato podpora je povolena pouze do objektů, které jsou současně s instalací kotle také zatepleny, popřípadě které byly zatepleny již dříve. [26]

Kromě Nové zelené úsporám v České republice funguje také společný program kraje a MŽP na podporu výměny stávajících ručně plněných kotlů na tuhá paliva za kotle plnící nařízení EU 2015/1189 o ekodesignu. Tento program je zkráceně nazýván také kotlíková dotace. Vyhlašovatelem je vždy kraj společně s Ministerstvem životního prostředí. Tento program umožňuje získat až 127 500 Kč na zakoupení nového kotle na tuhá paliva, na zemní plyn, nebo na tepelné čerpadlo. [26]

Pokud opět porovnáme stav v České republice například se sousedním Německem, je zde odlišný přístup k vyhlašování těchto dobrovolných akcí. V České republice jsou uvolněny určité prostředky, přičemž akce trvá do úplného využití těchto prostředků. V Německu se upravuje tzv. nabídka dle poptávky občanů, a proto jsou schopni pružněji reagovat na aktuální situaci. [26]

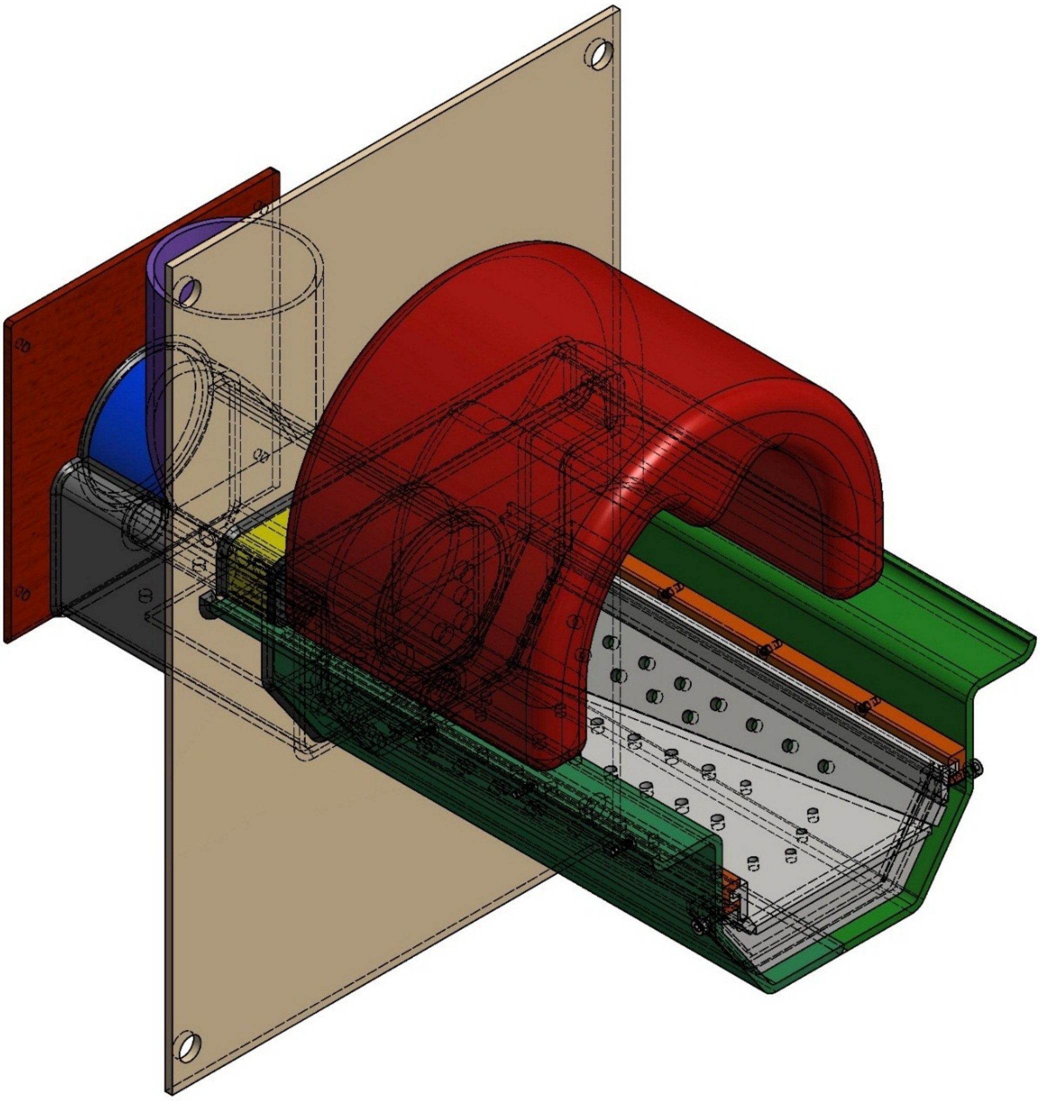
Jak legislativa, tak dobrovolné dotační programy vyvíjejí neustálý tlak na uživatele malých domácích kotlů na tuhá paliva. Ačkoliv v sousedních státech tedy v Německu a Rakousku jsou legislativní požadavky, které musí jak výrobci, tak i spotřebitelé plnit mnohem vyšší, i v České republice se situace posouvá k lepšímu a pomalu se uzavírají možnosti jak výroby a prodeje nevyhovujících kotlů, tak i spalování domovních odpadů. [26]

5. Návrh a kontrolní měření hořáku dle zadaných parametrů

5.1 Konstrukční návrh nízkoemisního hořáku na bílé dřevní pelety

V rámci této diplomové práce byl ve spolupráci s panem Ing. Pešatem navrhnut nový hořák spalující bílé dřevní pelety o předpokládaném jmenovitém výkonu 20 kW. Tento hořák je na Obr. č. 5.1.

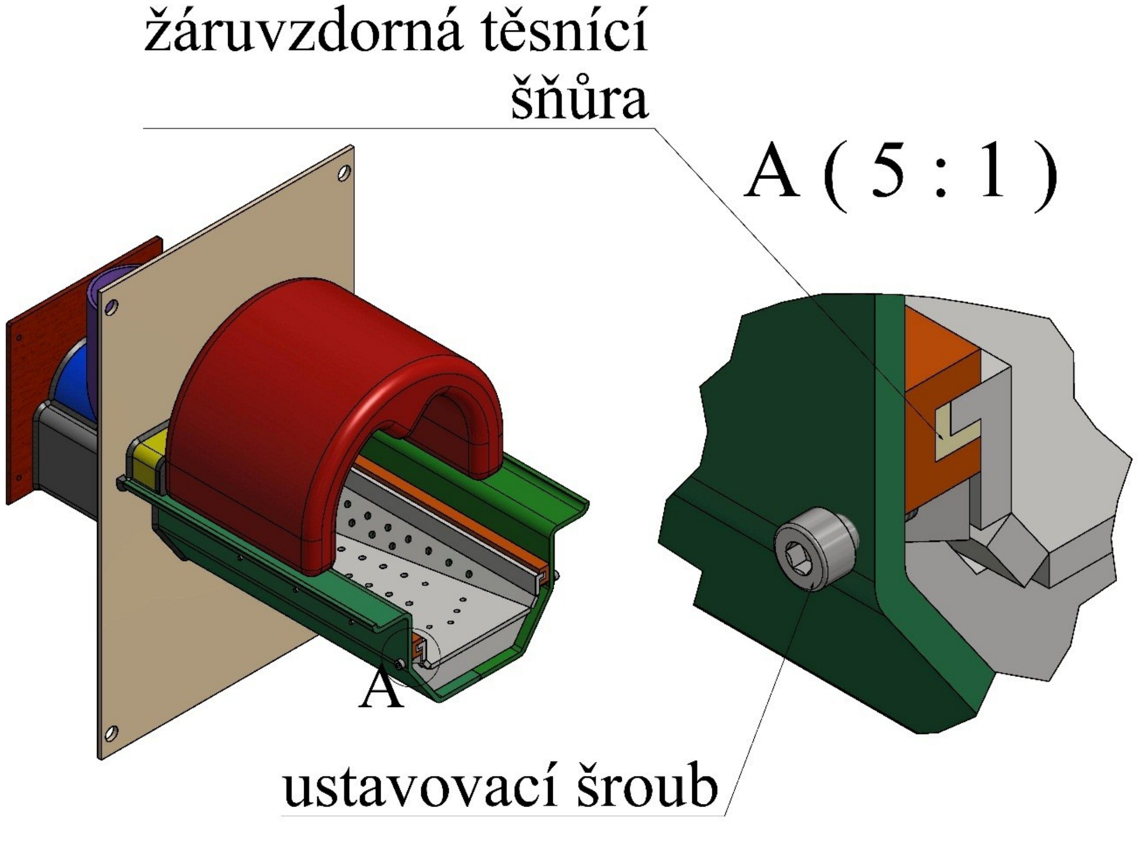
Hořák byl navržen jako svařenec ohýbaných dílů z materiálu 1.4845, dle starého označení 17 255. Jedná se o chrom niklovou austenitickou nestabilizovanou ocel s žáruvzdornými vlastnostmi.



Obr. č. 5.1 Nový hořák

Stěžejní prvky hořáku, odlišné od konkurenčních výrobků:

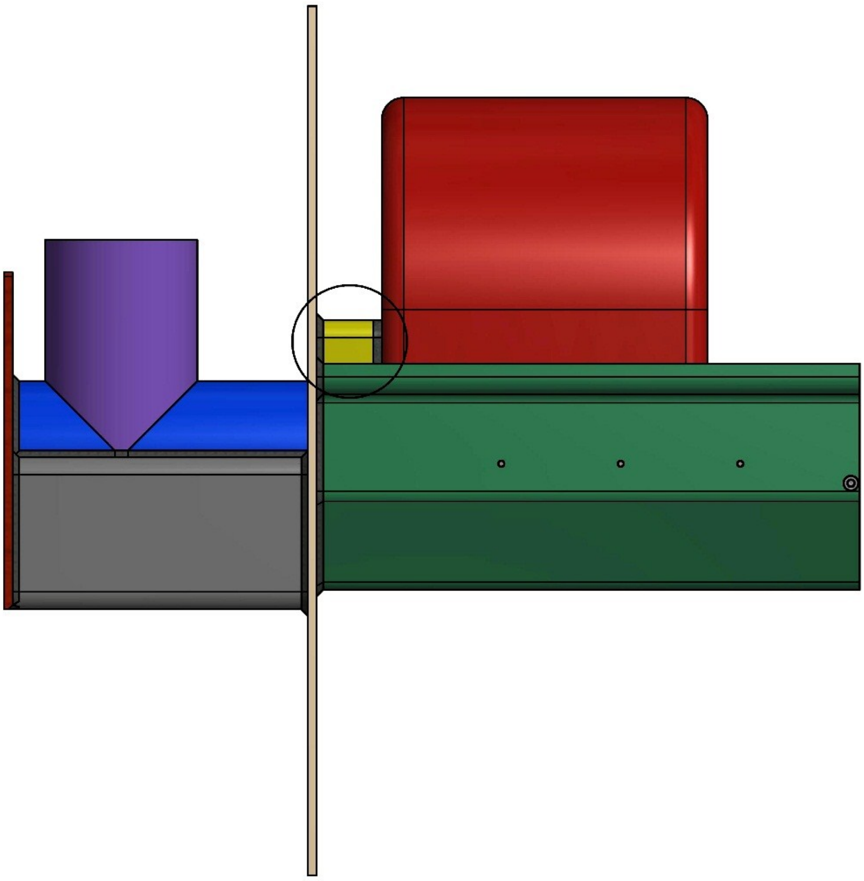
- Rošt je možno vyměnit bez nutnosti demontáže celého hořáku ven z kotle. Pro jeho uvolnění postačí pouze povolení dvou ustavovacích šroubů. Umístění těchto šroubů je na Obr. č. 5.2..
- Variabilní konstrukce hořáku umožňuje umístění roštu jak bez sklonu, tedy čistě horizontálního, tak se sklonem až 15° - tímto sklonem je možné regulovat délku setrvání paliva na roštu.
- Uložení vyměnitelného roštu v drážce vystlané keramickou šňůrou pro maximální možnou kontrolu přívodu vzduchu do oblasti hoření. Detail uložení žáruvzdorné těsnící šňůry je na Obr. č. 5.2..



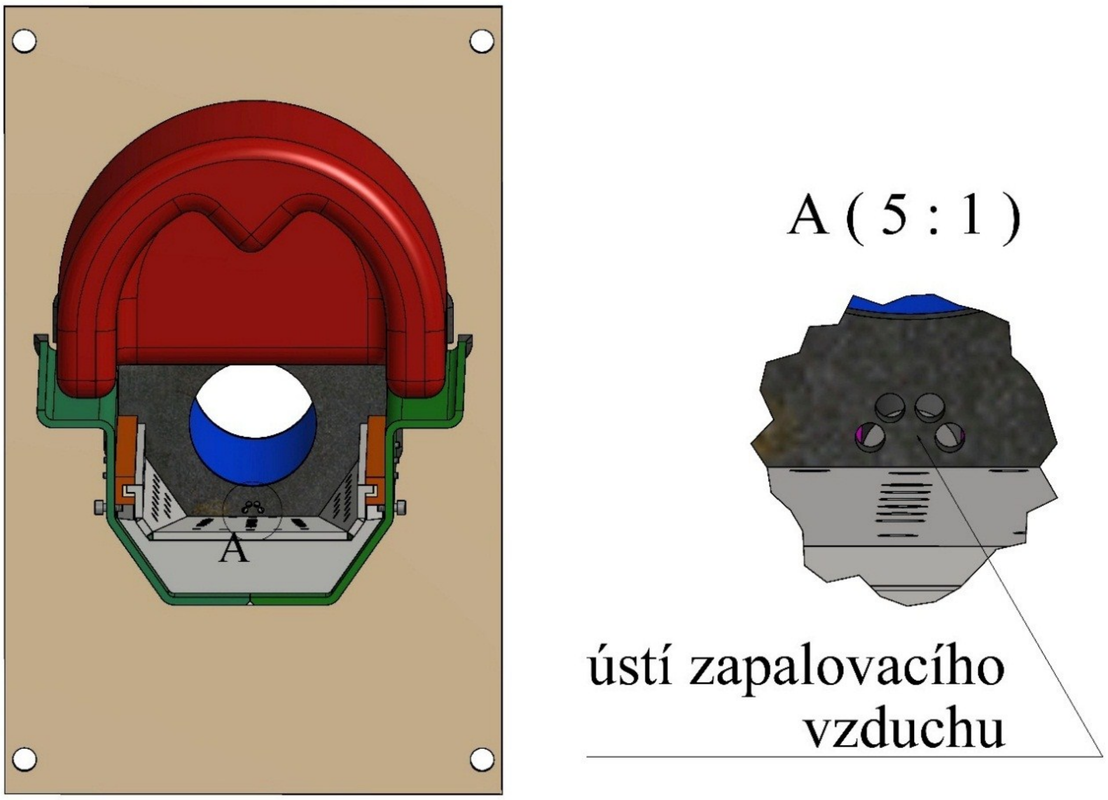
Obr. č. 5.2 Umístění žáruvzdorné těsnící šňůry a ustavovacího šroubu

- Vhodně zvolený tvar žárupevné tvarovky, s výstupkem ve tvaru „V“, umístěné nad oblastí hoření by měl zajistit žádoucí víření spalin v oblasti vyšších teplot a tím tedy možnost dohoření vzniklého CO na CO_2.
- Část mezi žárupevnou tvarovkou a přírubou umožňuje nutné oddělení části hořáku o vysokých teplotách od části hořáku, které mají volný styk s okolím. Tato část bude doplněna o vysokoteplotní izolaci SIBRAL pro zajištění minimalizace tepelných ztrát do okolí. Tato oddělovací část je vyznačena na Obr. č. 5.3..

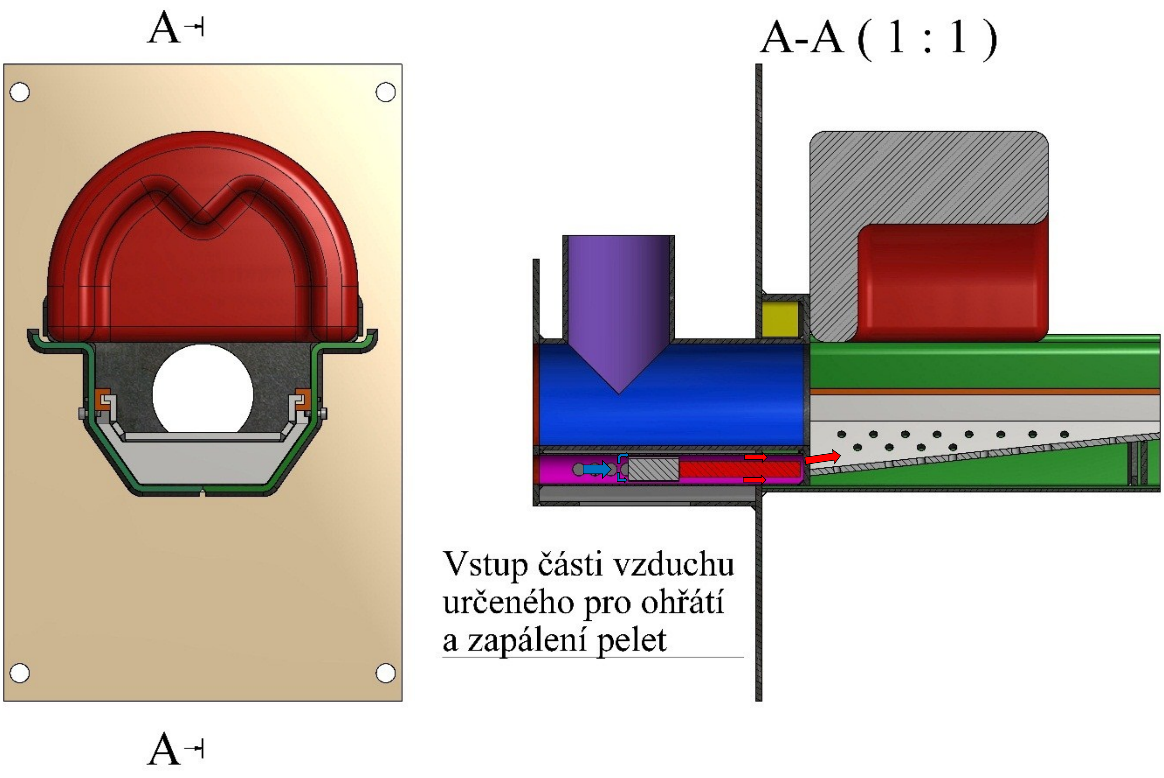
- Trubky pro vedení pelet z šnekového podavače do hořáku a následné vedení pelet v hořáku jsou standartních rozměrů z katalogu Ferona, a.s., stejně jako profil určený k připevnění ventilátoru za účelem snížení celkové výrobní ceny hořáku
- Hořák má samo zapalovací schopnost. K zapálení dochází pomocí keramického válečku zahřívaného elektrickým odporem. Tento keramický váleček je oproti některým konkurentům energeticky úspornější a nedochází tak k zbytečně vysoké spotřebě elektrické energie při zapalování. Ústí trubičky, ve které je umístěn tento váleček je vyobrazeno na Obr. č. 5.4. Zamýšlený tok zapalovacího vzduchu kolem keramického válečku je vyobrazen na Obr. č. 5.5.



Obr. č. 5.3 Pohled z boku na nový hořák s vyznačením oddělovací části



Obr. č. 5.4 Ústí trubičky s odporovým keramickým válečkem pro zapalování



Obr. č. 5.5 Zamýšlený proud ohřívaného vzduchu kolem keramickéhoválečku a skrz něj, určeného pro zapálení pelet

5.2 Kotel

Hořák je pro testování nutno umístit do vhodného kotle. Při výrobě bylo zamýšleno umístění do kotle výrobce PONAST označení KP21. Tomuto kotli byla částečně přizpůsobena příruba pro upevnění hořáku. Pro koncové ustavení hořáku do kotle byla na míru vyrobena příruba zohledňující výšku keramiky. Zadní část hořáku se tedy skládá ze dvou na sobě připevněných plechů, což má zabránit jeho možnému pokroucení při vystavení vysokým teplotám a také zajišťuje snížení teploty vnějšího povrchu kotle.

Jedná se o kotel s trubkovým výměníkem a s turbulátory ve tvaru spirály bez střední osy určený pro hořáky o výkonu 25 kW.

Těleso kotle je vybaveno jedněmi vstupními dvířky, sloužícími pro odstranění popela, popřípadě pro vizuální kontrolu stavu plamene. Těleso kotle, na kterém byly prováděny zkoušky nově navrhnutého hořáku je vyobrazeno na Obr. č. 5.6. Na shodném obrázku je rovněž vidět zásobník pelet, ze kterého pod úhlem 45° stoupá šnekový podavač paliva.

Obr. č. 5.6 Kotel Ponast KP21 použitý pro testování nového hořáku

5.3 Testovací trať a použité přístroje

Testovací trať pro měření nového hořáku při spalovacích zkouškách byla sestavena v akreditované zkušebně Výzkumného energetického centra, jemuž také patřily všechny níže zmiňované přístroje.

Analyzátor spalin

Jedná se o zařízení sloužící k určení složení spalin. Měření založené na principu infračerveného záření detekuje obsahy oxidu uhelnatého, oxidu uhličitého a oxidů dusíku. Plamenoionizační detekcí jsou pak zjišťovány obsahy uhlovodíků (TOC). Koncentraci kyslíku ve spalinách je rovněž možné monitorovat tímto přístrojem, a to díky paramagnetickým vlastnostem kyslíku. Spaliny jsou do tohoto analyzátoru přiváděny řádově několik metrů dlouhou vytápěnou hadicí, které předchází vytápěná keramická sonda obsahující keramický filtr pro nezbytné odloučení prachových částic. Analyzátor spalin je vyobrazen na Obr. č. 5.7

Princip plamenoionizační detekce

Tento typ detektoru se vyznačuje velmi širokým dynamickým rozsahem a vysokou citlivostí. Vodík je v malé trysce směšován s nosným plynem. Cylindrická elektroda obklopuje plamínek a mezi trysku a elektrodu je vloženo relativně vysoké napětí, sbírající ionty, které se formují v plamenu. Vysoko-impedanční zesilovač dále zesiluje výsledný proud, který je veden do data-sběrného systému, který vyhodnocuje množství iontů

Obr. č. 5.7 Analyzátor spalin

Wöhler SM 500

Zařízení analyzující množství prachových částic ve spalinách. Měření probíhá metodou měření přírůstku na filtru, během kontinuálního měření trvající do 15 minut. Rozsah měření tohoto přístroje je 0 – 1000 mg/m^3, což je dostačující pro zamýšlená měření. Zařízení zároveň měří také objemové proudění spalin principem diferenčního tlaku, avšak pro výpočet tato hodnota nebyla použita, byla použita hodnota odečtená z výše uvedeného analyzátoru spalin. Schéma zařízení je na Obr. č. 5.8.

Spaliny přicházejí do přístroje přes sondu pro odběr spalin (3), přes vyhřívanou hadici (4) a vstupují rovnou do vyhřívaného modulu (6). Teplotní senzor hadice (5) slouží k monitoringu teploty spalin a na jeho základě je regulována teplota, na kterou je vyhřívaná přívodní hadice. Ve váhovém modulu se nachází patrona filtru (8), která je nasunutá na konec přívodní trubičky až k držáku filtru (7). Obsah prachu ve vzorku se stanovuje podle množství zachyceného prachu na filtru a podle objemu odsátého vzorku.

Z vyhřívané části přístroje odcházejí spaliny přes krytku (9) a hadici (16) a jdou do kondenzátoru spalin (17). Dále jdou spaliny přes první filtrační rouno (20a), ochladí se ve vyvrtaných kanálcích a skrz druhé filtrační rouno (20b). Spaliny následně pokračují přes propojovací hadici (18) a vatový filtr (19), sloužící jako pojistka proti prachu a kondenzátu, do měřícího kufru k čerpací jednotce analyzátoru spalin.

Dalším vybavením kufru je měřící jednotka (25) řídící nastavení rotačního čerpadla (26) na požadované konstantní proudění. Membránová pumpa (27) dále přivádí spaliny k plynovému senzoru (28) sloužícímu pro analýzu plynu. Plyn odchází z přístroje spalinovou hadicí (29).

Legenda k obrázku:

1 On/Off – tlačítko

2 Připojení do sítě

3 Sonda pro odběr prachu

4 Vyhřívaná hadice sondy

5 Teplotní senzor hadice

6 Váhový modul

7 Přívodní trubička k držáku filtru

8 Patrona filtru

9 Krytka

10 Připojení napájení pro vyhřívání hadice

11 Fixace pro vyhřívanou hadici sondy

12 Ovládací jednotka s váhovým modulem

13 4 tlačítka – pole pro ovládání

14 USB-připojení a infraport pro tiskový výstup

15 Kabel ovládání

16 Propojka „Váhový modul – Kondenzátor spalin“

17 Kondenzátor spalin

18 Propojovací hadice „Kondenzátor spalin – kufr“

19 Připojení hadice s vatovým filtrem

20 Filtrační rouno

21 Připojení kabelu hadice sondy pro měření teploty spalin *

22 Připojení kabelu hadice sondy pro měření diferenčního tlaku v komíně*

23 Držák pro vyhřívanou hadici sondy

24 Stativ a upevňující svorky

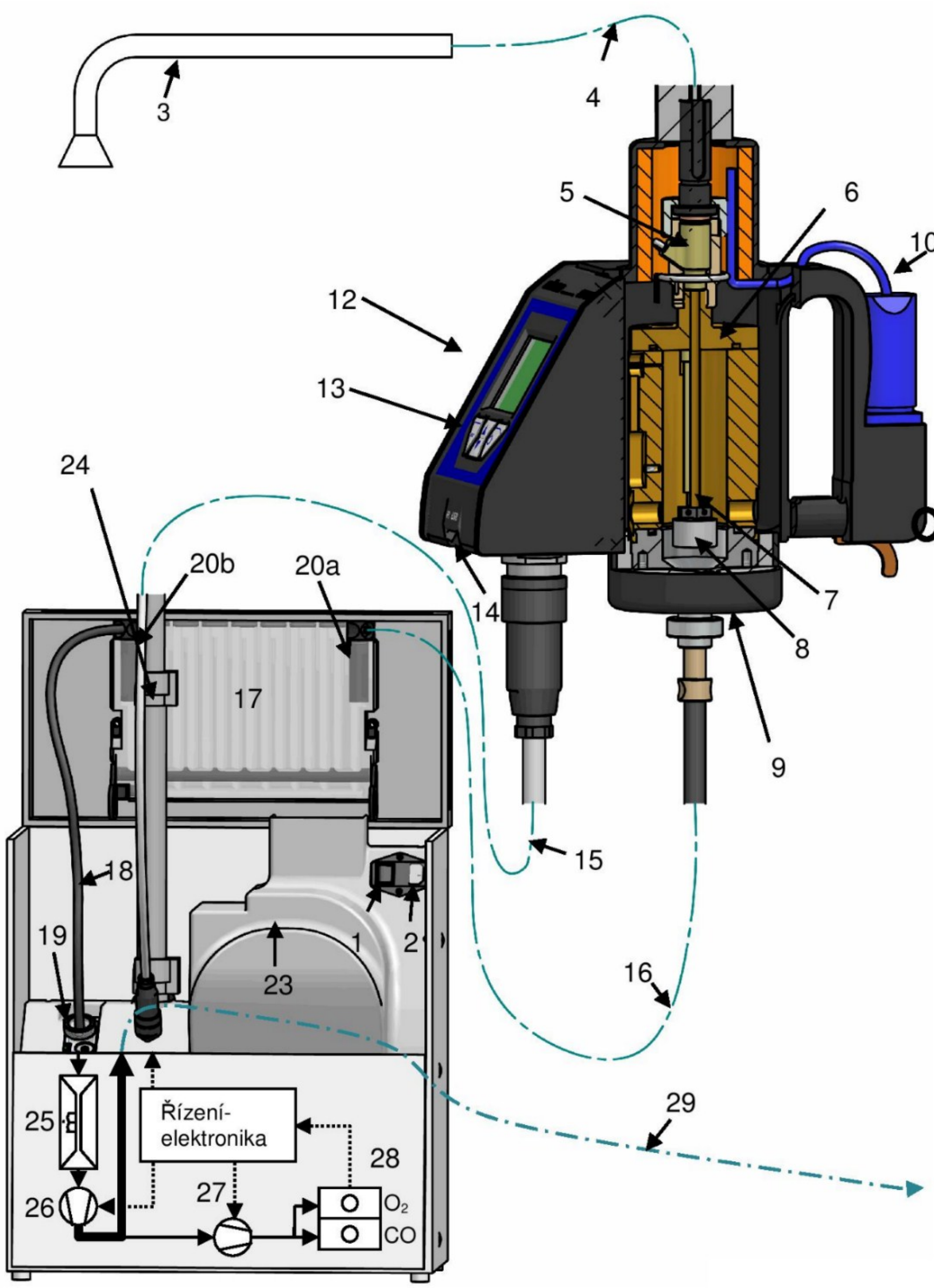
25 Měření normovaného objemového proudění

26 Rotační pumpa

27 Membránová puma pro senzory plynu

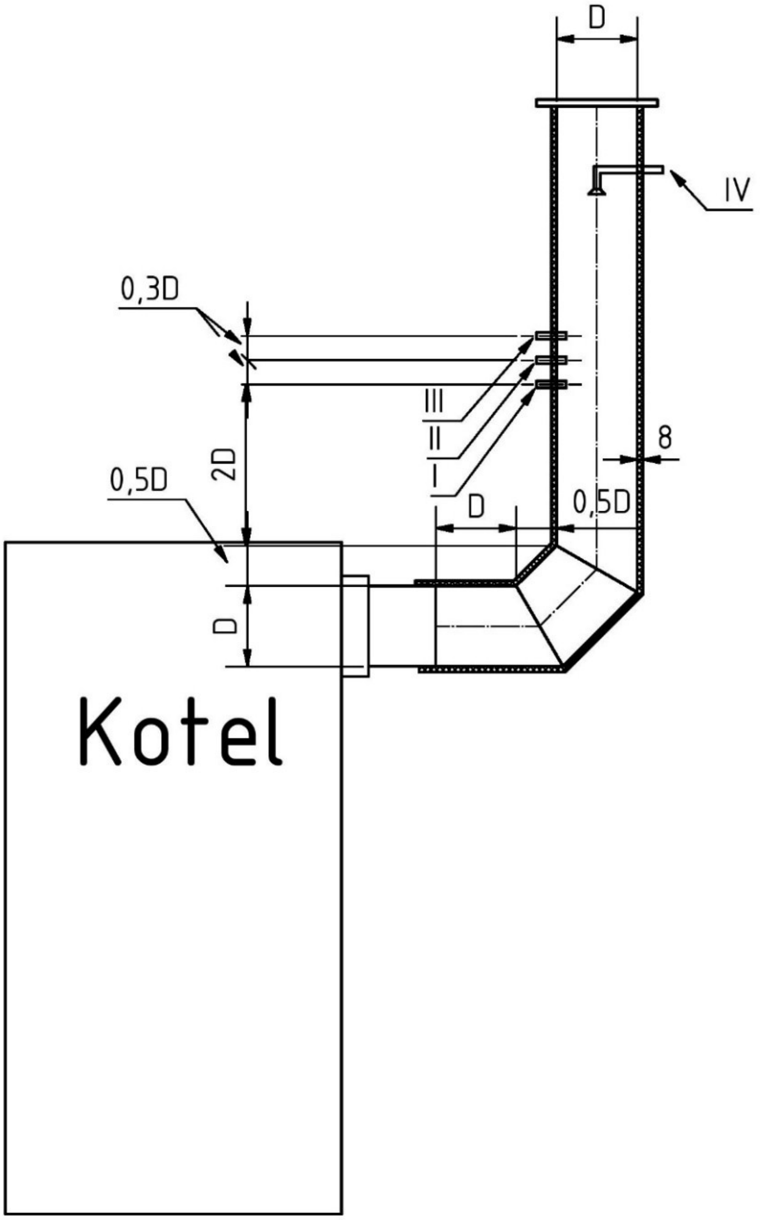
28 Plynový senzor O2 a CO

29 Spalinová hadice pro odvod plynu z pří – stroje

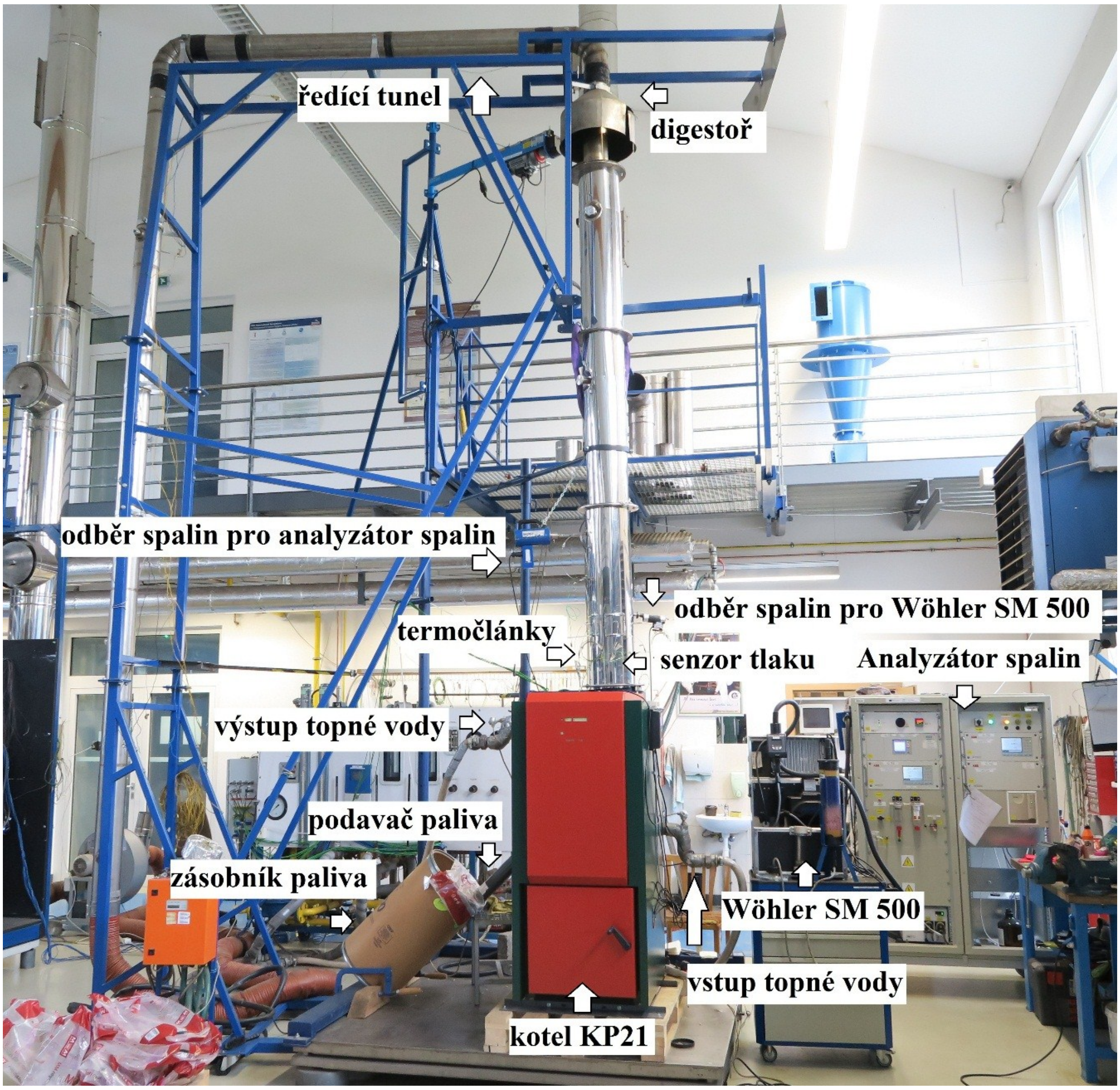


Obr. č. 5.8 Schéma stroje Wöhler SM 500 na měření prachu

Schéma správného uspořádání těchto přístrojů společně s termočlánky pro měření teploty spalin, a tlakoměru pro měření tlaku dle normy ČSN EN 303-5 je uvedeno na Obr. č. 5.9. Měření pro vyhodnocení nově navrhnutého hořáku probíhalo v souladu s touto normou, tedy i s tímto schématem. Reálná fotografie rozložení testovací trati pro spalovací zkoušky je na Obr. č. 5.10.



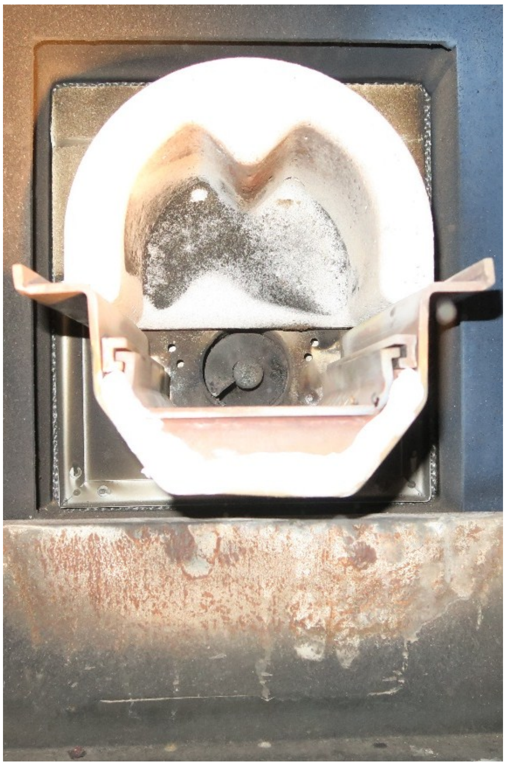
Obr. č. 5.9 Schéma zapojení měřících přístrojů při spalovacích zkouškách dle normy ČSN EN 303-5; I – úsek pro měření tahu; II – úsek pro měření teploty; III – úsek pro měření obsahu tuhých znečišťujících látek ve spalinách; IV – úsek pro měření koncentrace znečišťujících látek ve spalinách [35]

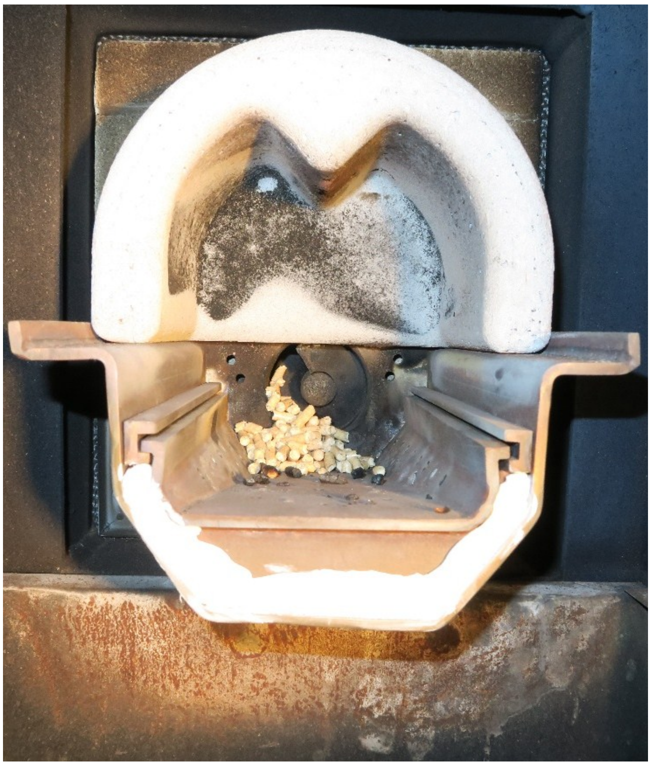


Obr. č. 5.10 Reálné rozmístění vybavení pro spalovací zkoušky

5.4 Průběh zapalování a vyhasínání hořáku

Automatické zapálení a vyhasínání hořáku probíhá v několika fázích, řízených automaticky pomocí řídící jednotky. Tyto fáze jsou znázorněny na obrázcích Obr. č. 5.11, Obr. č. 5.12, Obr. č. 5.13, Obr. č. 5.14, Obr. č. 5.15 a Obr. č. 5.16 a jsou detailněji popsány níže.





Obr. č. 5.11 vpravo 1. fáze zapalování – vyfoukávání popela z předešlého provozu

Obr. č. 5.12 vlevo 2. fáze zapalování – navážka hromádky paliva

Obr. č. 5.13 vlevo 3. fáze zapalování – ohřívání vzduchu průtokem kolem a skrz keramický váleček

Obr. č. 5.14 vpravo 4. fáze – první plameny, počátek hoření

Obr. č. 5.15 5. fáze – stabilní hoření

Obr. č. 5.16 6. fáze – vyhasínání

Vyfoukávání slouží k odstranění případných zbytků popela po předešlém provozu hořáku a je uskutečněno nastavením otáček ventilátoru vstupního vzduchu na maximální možnou hodnotu.

Dávka paliva neboli hromádka paliva pro zapálení velice ovlivňuje samotný zapalovací proces. Je nezbytné, aby podavač dodal na správné místo, tedy k výstupu vzduchu, proudícího kolem a skrz keramický váleček správné množství paliva.

Zapalování probíhá již zmíněným principem. Část vzduchu vstupuje v zadní části hořáku do trubičky, ve které je umístěn keramický žhavící váleček. Tento vzduch se průchodem kolem a skrz tento váleček ohřívá na teplotu dostatečnou k zapálení dřevních pelet. Správnost konstrukčního návrhu zadní části hořáku se projeví až v této fázi, přičemž v případě, že by šlo trubičkou pro ohřátí moc vzduchu, tak by nedošlo k jeho ohřátí na dostatečně vysokou teplotu. Celý proces zapálení je otázkou řádově desítek sekund. Rychlost této fáze je vysoce ovlivněna příkonem zapalovacího válečku, který je 300 W.

První plameny vystřídají silný vývin kouře z hořáku řádově několik desítek sekund po začátku žhavení. Následně na to řídící jednotka začne dávkovat předem určené množství paliva

Stabilní hoření se prezentuje při plném výkonu vyplněním hořákové části kotle plameny. Podle plánu u nově navrženého hořáku dochází k rotaci plamenů pod keramickou tvarovkou, což má kladný vliv na snížení emisí. Hoření se dostane do stabilní fáze po několika minutách běžného provozu.

Vyhasínání je doprovázeno vyprázdněním šnekového podavače a navýšením otáček ventilátoru na maximální hodnotu, aby došlo k rychlému dohoření zbývajícího paliva. Na Obr. č. 5.16 je patrná vrstva zachyceného uhlíku na keramické tvarovce, který během vyhasínání rovněž dohořívá.

5.5 Vyhodnocení

V rámci této diplomové práce proběhlo mezi dny 24.4.2017 – 26.4.2017 třídenní měření nově navrženého hořáku na zkušebně Výzkumného energetického centra. První den byl zaměřen na měření jmenovitého výkonu, nastavení tedy mělo odpovídat 20 kW pro které byl hořák navrhován, druhý den bylo měření zaměřeno na snížený výkon, tedy 6 kW, což je 30 % z výkonu jmenovitého. Třetí den bylo měření zaměřeno na experimentální stanovení množství paliva jdoucího do kotle pro výpočet přímé účinnosti kotle.

Jak již bylo výše zmíněno, použité přístroje a jejich zapojení, společně se zapojením spalinového traktu odpovídalo normě ČSN EN 303-5.

Pro spalovací zkoušky bylo použito palivo interního označení VZ 1155/14, tedy pelety Royal Pellets výrobce MM Holz Paskov.

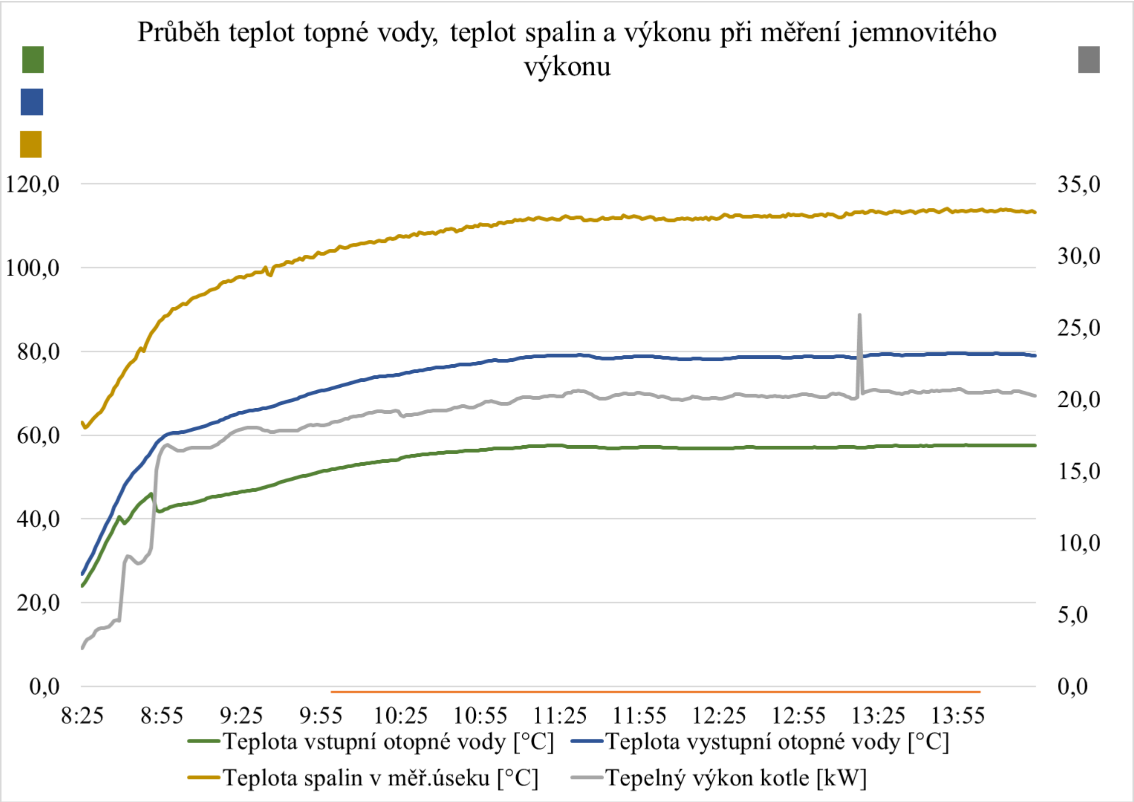
Při zkoušení bylo užito dvou různých ventilátorů z důvodu nutnosti navýšení maximálního přívodu vzduchu pro jmenovitý výkon.

5.5.1 Jmenovitý výkon

Při jmenovitém výkonu bylo užito ventilátoru značky MplusM fan o jmenovitém výkonu 111 W bez možnosti plynulé regulace. Celkové výsledky jsou patrné v Tab. č. 5.1, v Graf č. 5.1 a v Graf č. 5.2. Úsek použitý pro vyhodnocení měření, tedy úsek ustáleného stavu, je v grafech vyznačen červenou linkou. Náhlé výkyvy výkonu jsou dány změnou průtoku topné vody.

V Graf č. 5.2 je patrný nárůst emisí CO ke konci spalovací zkoušky. Tento nárůst byl pravděpodobně způsoben množstvím nevyhořelého paliva v popelníku, které pozvolna dohořívalo.

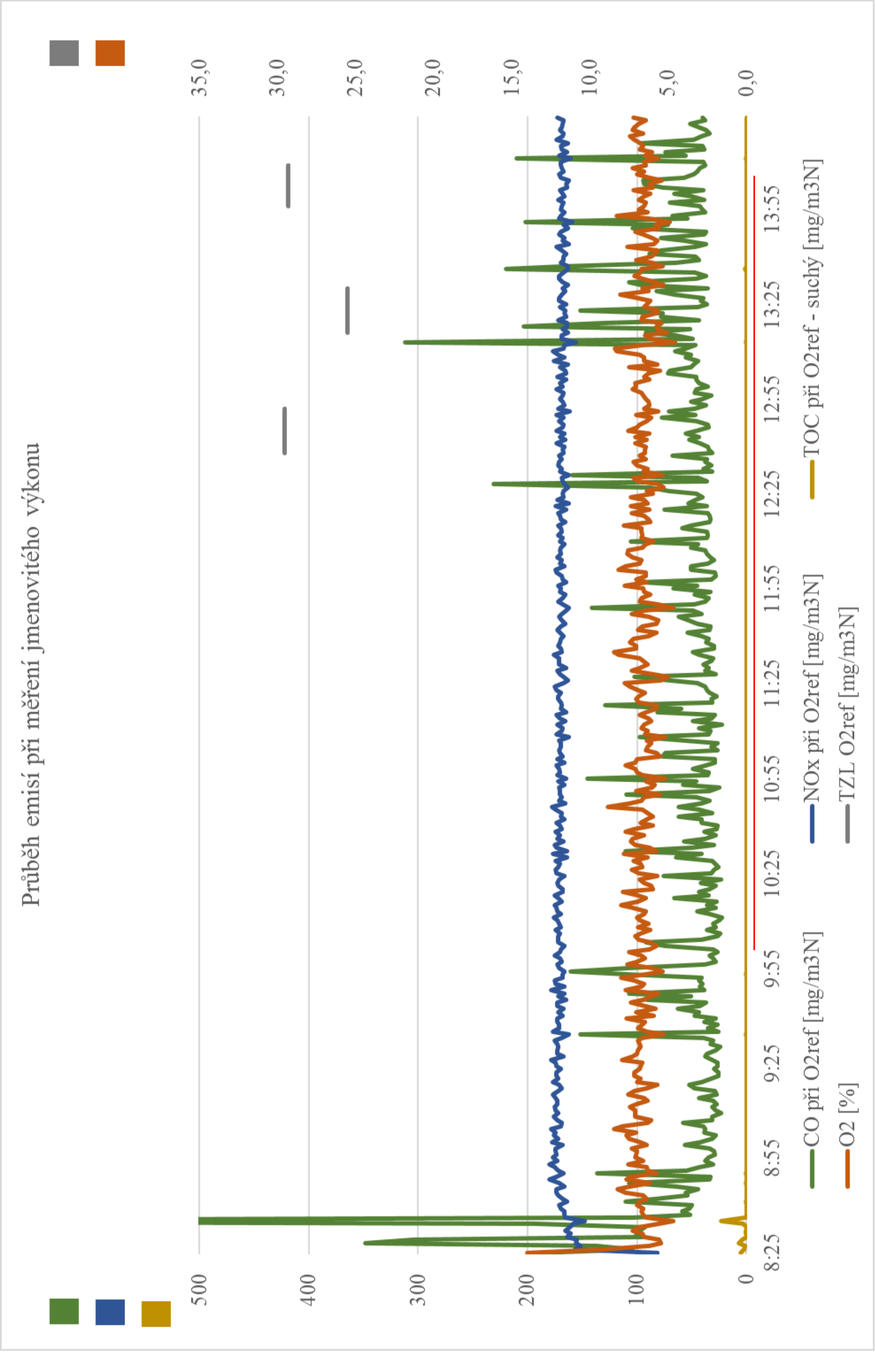
Z výsledků je patrné, že se koncentrace tuhých znečišťujících látek blíží limitu pro německou normu. Při nezaokrouhlování však tento limit není splněn.



Graf č. 5.1 Průběh teplot topné vody, tepot spalin a výkonu při měření jmenovitého výkonu

Datum zkoušky	-	**24.4.2017**	**ČSN EN 303-5 (5. třída)**	**Ekodesign**	**1. BImSchV - Německo (1)**	**15a B-VG - Rakousko**
Palivo	-	**VZ 1155**				
Počátek měření	hod:min	**8:30**				
Konec měření	hod:min	**14:30**				
Počátek úseku pro vyhodnocení	hod:min	**10:00**				
Konec úseku pro vyhodnocení	hod:min	**14:00**				
Doba úseku pro vyhodnocení	hod:min	**4:00**				
Nastavení přívod paliva/výkon ventilátoru	%/%	**65/100**				
Průměrný tepelný výkon kotle	kW	**20**				
Obsah kyslíku ve spalinách	%	**6,6**				
Teplota spalin	° C	**111**				
Koncentrace **CO** při referenčním obsahu kyslíku 10%	mg/m^3	**54**	≤ 500	-	≤ 550	-
	mg/MJ	**23**	-	-	-	≤ 500
Sezónní koncentrace **CO** při referenčním obsahu kyslíku 10%	mg/m^3	**150**	-	≤ 500	-	-
Koncentrace **NO_x** při referenčním obsahu kyslíku 10%	mg/m^3	**169**	-	-	-	-
	mg/MJ	**72**	-	-	-	≤ 100
Sezónní koncentrace **NO_x** při referenčním obsahu kyslíku 10%	mg/m^3	**160**	-	≤ 200	-	-
Koncentrace **OCG** při referenčním obsahu kyslíku 10%	mg/m^3	pod mezí detekce	≤ 20	-	-	-
	mg/MJ	pod mezí detekce	-	-	-	≤ 30
Sezonní koncentrace **OCG** při referenčním obsahu kyslíku 10%	mg	pod mezí detekce	-	≤ 20	-	-
Koncentrace **TZL** při referenčním obsahu kyslíku 10%	mg/m^3	**28**	≤ 40	-	≤ 28	-
	mg/MJ	**12**	-	-	-	≤ 30
Sezónní koncentrace **TZL** při referenčním obsahu kyslíku 10%	mg/m^3	**28**	-	≤ 40	-	-
Účinnost kotle přímá metoda	%	**88,6%**	≥ 87	-	-	-
Sezónní energetická **účinnost**	%	**80,5%**	-	≥ 75	-	-
Účinnost kotle nepřímá metoda	%	**90,4%**	≥ 87	-	-	-

Tab. č. 5.1 Vyhodnocení spalovacích zkoušek pro měření jmenovitého výkonu; (1) – hodnoty pro Německo byly přepočteny na referenční obsah kyslíku O_{2ref} = 10%



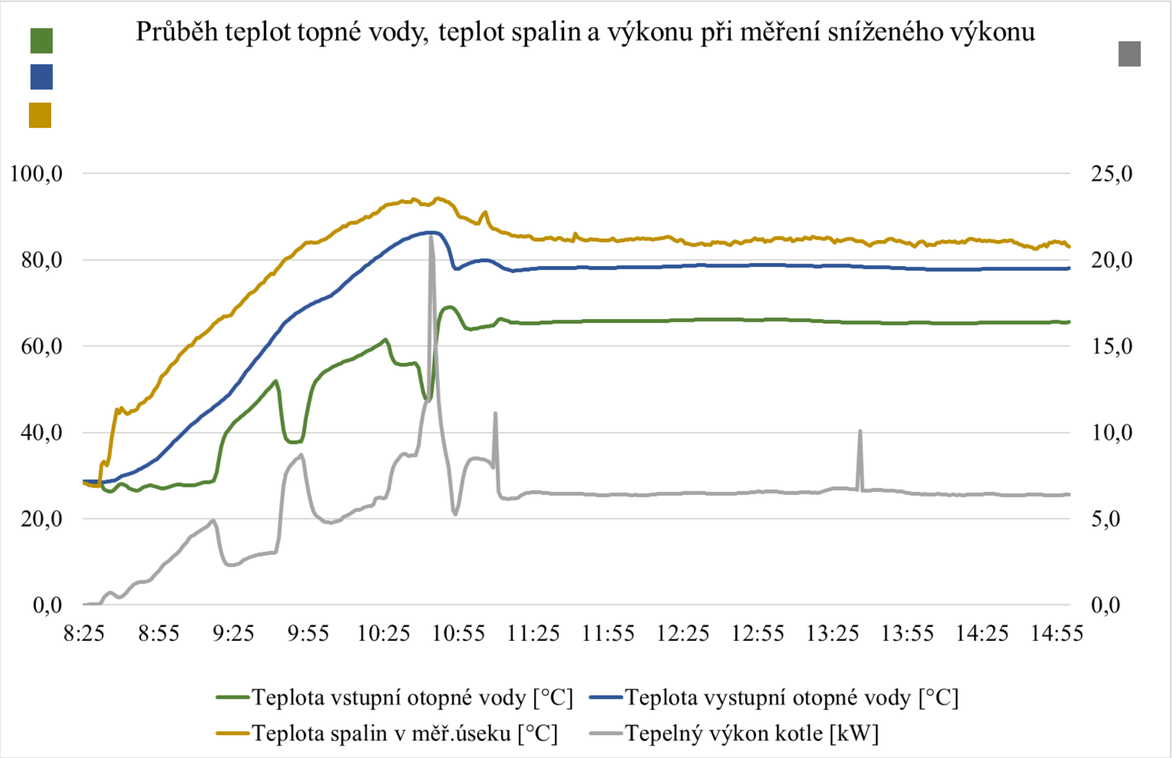
Graf č. 5.2 Průběh emisí CO, NO_x, TOC, O_2 a TZL při měření jmenovitého výkonu

5.5.2 Snížený výkon

Při sníženém výkonu bylo užito ventilátoru značky MplusM fan o jmenovitém výkonu 43 W s možností plynulé regulace. Celkové výsledky jsou patrné v Tab. č. 5.2, v Graf č. 5.3 a v Graf č. 5.4. Úsek použitý pro vyhodnocení měření, tedy úsek ustáleného stavu, je v grafech vyznačen červenou linkou. Náhlé výkyvy výkonu jsou dány změnou průtoku topné vody.

V Graf č. 5.4 je vidět patrný nárůst emisí CO v čase cca 12:55. Tento nárůst emisí CO vznikl v důsledku utvoření hromádky mírně spečeného popela v zadní části roštu (myšleno blíže podavači paliva). Tato hromádka při nízkých rychlostech vstupního vzduchu nemohla být rozfoukána. Situaci ztížil také rošt s rostoucím sklonem, který zabraňoval vypadnutí popela. Řešením tohoto stavu by mohla být změna úhlu sklonu roštu, který by mohl v krajním případě zůstat horizontální. Jinou variantou řešení může být také snížení počtu děr, zmenšení průměru některých děr, popřípadě jejich přemístění či úplné zalepení, tak aby vstupní vzduch rozfoukal tuto hromádku. Těmito cestami se bude ubírat následující výzkum.

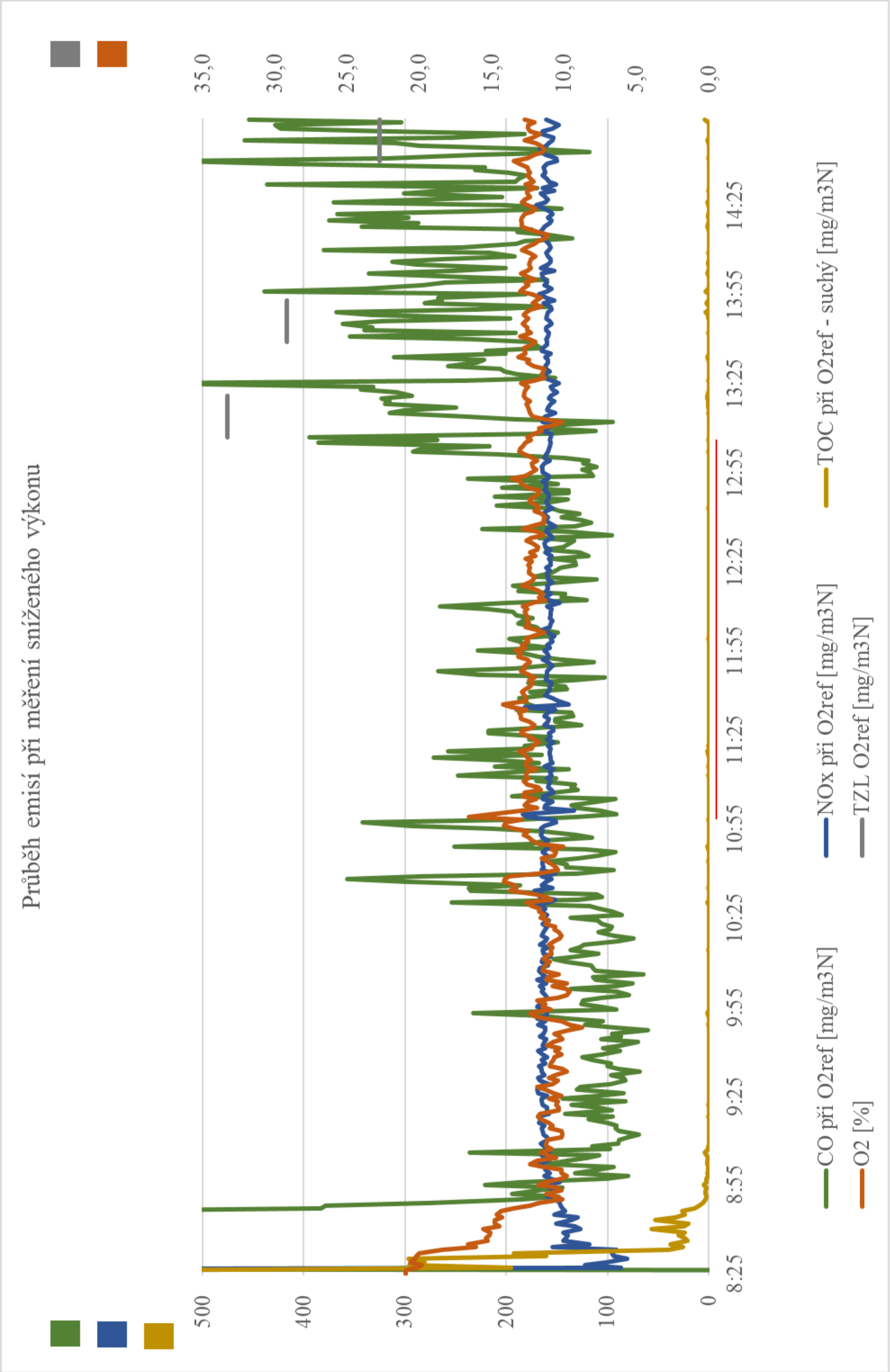
Z výsledků je patrné, že se koncentrace tuhých znečišťujících látek blíží limitu pro německou normu. Při nezaokrouhlování však tento limit není splněn.



Graf č. 5.3 Průběh teplot topné vody, tepot spalin a výkonu při měření sníženého výkonu

Datum zkoušky	-	**25.5.2017**	**ČSN EN 303-5 (5. třída)**	**Ekodesign**	**1. BImSchV - Německo (1)**	**15a B-VG - Rakousko**
Palivo	-	**VZ 1155**				
Počátek měření	hod:min	**8:30**				
Konec měření	hod:min	**15:00**				
Počátek úseku pro vyhodnocení	hod:min	**11:00**				
Konec úseku pro vyhodnocení	hod:min	**13:00**				
Doba úseku pro vyhodnocení	hod:min	**2:00**				
Nastavení přívod paliva/výkon ventilátoru	%/%	**20/17**				
Průměrný tepelný výkon kotle	kW	**6,6**				
Obsah kyslíku ve spalinách	%	**12,5**				
Teplota spalin	° C	**85,0**				
Koncentrace **CO** při referenčním obsahu kyslíku 10%	mg/m^3	**167**	< 500	-	< 550	-
	mg/MJ	**115**	-	-	-	< 500
Sezónní koncentrace **CO** při referenčním obsahu kyslíku 10%	mg/m^3	**150**	-	< 500	-	-
Koncentrace **NO_x** při referenčním obsahu kyslíku 10%	mg/m^3	**158**	-	-	-	-
	mg/MJ	**109**	-	-	-	< 100
Sezónní koncentrace **NO_x** při referenčním obsahu kyslíku 10%	mg/m^3	**160**	-	< 200	-	-
Koncentrace **OCG** při referenčním obsahu kyslíku 10%	mg/m^3	pod mezí detekce	< 20	-	-	-
	mg/MJ	pod mezí detekce	-	-	-	< 30
Sezonní koncentrace **OCG** při referenčním obsahu kyslíku 10%	mg/m^3	pod mezí detekce	-	< 20	-	-
Koncentrace **TZL** při referenčním obsahu kyslíku 10%	mg/m^3	**28**	< 40	-	< 28	-
	mg/MJ	**20**	-	-	-	< 30
Sezónní koncentrace **TZL** při referenčním obsahu kyslíku 10%	mg/m^3	**28**	-	< 40	-	-
Účinnost kotle přímá metoda	%	**91,7%**	> 87	-	-	-
Sezónní energetická **účinnost**	%	**80,5%**	-	> 75	-	-
Účinnost kotle nepřímá metoda	%	**87,8%**	> 87	-	-	-

Tab. č. 5.2 Vyhodnocení spalovacích zkoušek pro měření sníženého výkonu ;(1) – hodnoty pro Německo byly přepočteny na referenční obsah kyslíku O_{2ref} = 10%



Graf č. 5.4 Průběh emisí CO, NO_x, TOC, O_2 a TZL při měření sníženého výkonu

5.5.3 Měření spotřeby paliva

Třetí den proběhlo experimentální měření dávkování paliva při režimech užitých v předchozích dvou dnech. Měření probíhalo zavedením hadice vedoucí z primárního podavače mimo hořák do nádoby na váze. Pro každý režim bylo měřeno průměrných hodnot vždy v časovém intervalu 15 minut. Tyto hodnoty byly stěžejní pro výpočet účinnosti přímou metodou. Výsledky měření jsou znázorněny v Tab. č. 5.3 a Tab. č. 5.4.

Měření	Čas	Hmotnost	Spotřeba
[-]	[hod]	[kg]	[kg/hod]
1	0,25	1,238	4,954
2	0,25	1,222	4,888
3	0,25	1,180	4,720
4	0,25	1,206	4,822
5	0,25	1,171	4,683
6	0,25	1,170	4,679
7	0,25	1,196	4,785
8	0,25	1,162	4,650
9	0,25	1,209	4,835
Průměr	0,25	1,195	4,779

Tab. č. 5.3 Výsledky měření dávkování paliva při jmenovitém výkonu, tedy nastavení podavače na 65 %

Měření	Čas	Hmotnost	Spotřeba
[-]	[hod]	[kg]	[kg/hod]
1	0,25	0,393	1,572
2	0,25	0,400	1,600
3	0,25	0,390	1,560
4	0,25	0,378	1,512
5	0,25	0,391	1,564
6	0,25	0,389	1,556
7	0,25	0,359	1,436
8	0,25	0,366	1,464
9	0,25	0,375	1,500
Průměr	0,25	0,382	1,529

Tab. č. 5.4 Výsledky měření dávkování paliva při sníženém výkonu, tedy nastavení podavače na 20 %

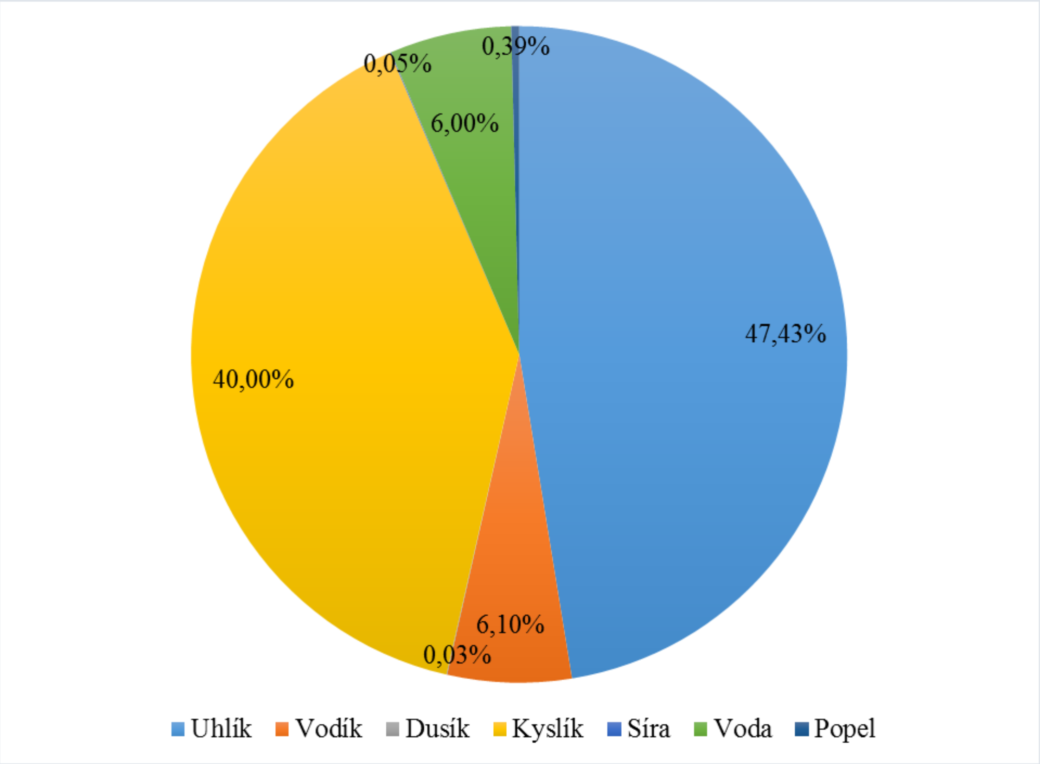
5.6 Výpočty

Výpočet statiky spalování

Pelety vyrobené firmou M&M použité pro testování hořáku byly podrobeny prvkovému rozboru v laboratoři paliv. Výsledkem je podrobné chemické složení těchto pelet, které je uvedeno v Tab. č. 5.5 a graficky je znázorněno v Graf č. 5.5.

Prvek	Označení	Množství
Uhlík	C^r [%]	47,43
Vodík	H^r [%]	6,10
Dusík	N^r [%]	0,04
Kyslík	O^r [%]	40,00
Síra	S^r [%]	0,05
Voda	W^r [%]	6,00
Popel	A^r [%]	0,39

Tab. č. 5.5 Chemické složení testovaných pelet



Graf č. 5.5 Chemické složení testovaných pelet

- Výhřevnost výše zmiňovaného vzorku je 17 020 kJ/kg

Spalovací rovnice

Reakce uhlíku s kyslíkem při spalování

C	+	O_2	→	CO_2 + Q	(3)
1 kmol C	+	1 kmol O_2	→	1 kmol CO_2	
12,01 kg C	+	12,01 O_2	→	44,01 kg CO_2	
12,01 kg C	+	22,39 m^3_N O_2	→	22,26 m^3_N CO_2	

Reakce síry s kyslíkem při spalování

S	+	O_2	→	SO_2 + Q	(4)
1 kmol S	+	1 kmol O_2	→	1 kmol SO_2	
32,06 kg S	+	32,00 kg O_2	→	64,06 kg SO_2	
32,06 kg S	+	22,39 m^3_N O_2	→	21,89 m^3_N SO_2	

Reakce vodíku s kyslíkem při spalování

$2H_2$	+	O_2	→	$2H_2O_2$ + Q	(5)
2 kmol H_2	+	1 kmol O_2	→	2 kmol H_2O	
4,032 kg H_2	+	32,00 kg O_2	→	36,032 kg H_2O	
4,032 kg H_2	+	22,39 m^3_N O_2	→	44,80 m^3_N H_2O	

Teoretický objem kyslíku potřebného pro spálení 1 kg paliva

$$V_{O_2;t} = \frac{22,39}{12,01} \cdot C^r + \frac{22,39}{4,032} \cdot H^r + \frac{22,39}{32,06} \cdot S^r - \frac{22,39}{32} \cdot O^r \left[\frac{m^3_{N;O_2}}{kg_{pal}}\right]$$

$$V_{O_2;t} = \frac{22,39}{12,01} \cdot 0,4744 + \frac{22,39}{4,032} \cdot 0,06009 + \frac{22,39}{32,06} \cdot 0,0005 - \frac{22,39}{32} \cdot 0,3999 \quad (6)$$

$$V_{O_2;t} = 0,9386 \ \frac{m^3_{N;O_2}}{kg_{pal}}$$

Objem teoretického suchého vzduchu potřebného pro stechiometrické spálení 1 kg paliva

$V_{vzd;t}^{s} = \frac{1}{0{,}21} \cdot V_{O_2;t} \left[\frac{m_{N;vzd}^3}{kg_{pal}}\right]$ $V_{vzd;t}^{s} = \frac{1}{0{,}21} \cdot 0{,}9386$ $V_{vzd;t}^{s} = 4{,}469 \frac{m_{N;vzd}^3}{kg_{pal}}$	(7)

Objem teoretického vlhkého vzduchu potřebného pro stechiometrické spálení 1 kg paliva

υ – poměrné zvětšení objemu vlhkého vzduchu oproti suchému vzduchu

V klimatických podmínkách České republiky nabývá tento součinitel zanedbatelných hodnot, tedy hodnot blížících se 1. Pro výpočet v této diplomové práci bude zachováno $\upsilon = 1$ [−].

$V_{vzd;t}^{V} = V_{vzd;t} \cdot \upsilon \left[\frac{m_{N;vzd}^3}{kg_{pal}}\right]$ $V_{vzd;t}^{V} = 4{,}469 \cdot 1$ $V_{vzd;t}^{V} = 4{,}469 \frac{m_{N;vzd}^3}{kg_{pal}}$	(8)

Výpočet skutečného přebytku vzduchu při provedených spalovacích zkouškách

$n = \frac{21}{21 - O_{2;spalin}}$ [1] $n = \frac{21}{21 - 6{,}59}$ $n = 1{,}457$ [1]	(9)

Teoretický objem suchých spalin po spálení 1 kg paliva

$V_{sp,t}^{S} = \frac{22{,}26}{12{,}01} \cdot C^r + \frac{21{,}89}{32{,}06} \cdot S^r + \frac{22{,}40}{28} \cdot N^r + 0{,}79 \cdot V_{vz,t}^{S} \left[\frac{m_{N;sp}^3}{kg_{pal}}\right]$	(10)

$V_{sp,t}^{S} = \frac{22{,}26}{12{,}01} \cdot 0{,}4744 + \frac{21{,}89}{32{,}06} \cdot 0{,}0005 + \frac{22{,}40}{28} \cdot 0{,}0004 + 0{,}79 \cdot 4{,}469$ $V_{sp,t}^{S} = 4{,}41 \frac{m_{N;sp}^{3}}{kg_{pal}}$	

Skutečný objem suchých spalin po spálení 1 kg paliva

$V_{sp}^{S} = V_{sp,t}^{S} + (n-1) \cdot V_{vzd;t}^{s} \left[\frac{m_{N;sp}^{3}}{kg_{pal}}\right]$ $V_{sp}^{S} = 4{,}41 + (1{,}457 - 1) \cdot 4{,}469$ $V_{sp}^{S} = 6{,}454 \frac{m_{N;sp}^{3}}{kg_{pal}}$	(11)

Množství vody ve spalinách po spálení 1 kg paliva

$V_{H_2O} = \frac{44{,}80}{4{,}032} \cdot H^{r} + \frac{22{,}40}{18} \cdot W^{r} \left[\frac{m_{H_2O}^{3}}{kg_{pal}}\right]$ $V_{H_2O} = \frac{44{,}80}{4{,}032} \cdot 0{,}06009 + \frac{22{,}40}{18} \cdot 0{,}06$ $V_{H_2O} = 0{,}7423 \frac{m_{H_2O}^{3}}{kg_{pal}}$	(12)

Teoretický objem vlhkých spalin po spálení 1 kg paliva

$V_{sp,t}^{V} = V_{sp,t}^{S} + V_{H_2O} \left[\frac{m_{N;sp}^{3}}{kg_{pal}}\right]$ $V_{sp,t}^{V} = 4{,}41 + 0{,}7423$ $V_{sp,t}^{V} = 5{,}152 \frac{m_{N;sp}^{3}}{kg_{pal}}$	(13)

Skutečný objem vlhkých spalin po spálení 1 kg paliva

$V_{sp}^{V} = V_{sp,t}^{V} + (n-1) \cdot V_{vzd;t}^{V} \left[\frac{m_{N;sp}^{3}}{kg_{pal}}\right]$ $V_{sp}^{V} = 5{,}152 + (1{,}457 - 1) \cdot 4{,}469$ $V_{sp}^{V} = 7{,}194 \frac{m_{N;sp}^{3}}{kg_{pal}}$	(14)

Teoretický obsah vodní páry ve vlhkých spalinách

$V_{sp;H2O}^{V} = \frac{V_{sp,t}^{V} - V_{sp,t}^{S}}{V_{sp,t}^{V}} \cdot 100[\%]$ $V_{sp;H2O}^{V} = \frac{5{,}152 - 4{,}41}{5{,}152} \cdot 100[\%]$ $V_{sp;H2O}^{V} = 0{,}15[\%]$	(15)

Výpočet účinnosti přímou metodou dle normy ČSN EN 304

$Q_B = B \cdot H_U \; [-]$ $Q_B = 4{,}798 \cdot 17{,}02 \; [-]$ $Q_B = 81{,}66 \frac{MJ}{hod} = 22{,}68 \; kW$	(16)

$\eta_k = \frac{Q}{Q_B} \; [-]$ $\eta_k = \frac{20{,}0}{22{,}68}$ $\eta_k = 0{,}882$	(17)

Výpočet účinnosti nepřímou metodou dle normy ČSN EN 304

$C_{pm;Atr} = 0{,}361 + 0{,}008 \cdot \left[\frac{t_A}{1000}\right] + 0{,}034 \cdot \left[\frac{t_A}{1000}\right]^2 + \left[0{,}085 + 0{,}19 \cdot \left[\frac{t_A}{1000}\right] - 0{,}14 \cdot \left[\frac{t_A}{1000}\right]^2\right] \cdot \left[\frac{CO_2}{100}\right] + \left[0{,}3 \cdot \left[\frac{t_A}{1000}\right] - 0{,}2 \cdot \left[\frac{t_A}{1000}\right]^2\right] \cdot \left[\frac{CO_2}{100}\right]^2 \left[\frac{J}{m^3 \cdot K}\right]$ $C_{pm;Atr} = 0{,}361 + 0{,}008 \cdot \left[\frac{106{,}7}{1000}\right] + 0{,}034 \cdot \left[\frac{106{,}7}{1000}\right]^2 + \left[0{,}085 + 0{,}19 \cdot \left[\frac{106{,}7}{1000}\right] - 0{,}14 \cdot \left[\frac{106{,}7}{1000}\right]^2\right] \cdot \left[\frac{13{,}7}{100}\right] + \left[0{,}3 \cdot \left[\frac{106{,}7}{1000}\right] - 0{,}2 \cdot \left[\frac{106{,}7}{1000}\right]^2\right] \cdot \left[\frac{13{,}7}{100}\right]^2 \left[\frac{J}{m^3 \cdot K}\right]$ $C_{pm;Atr} = 0{,}377 \frac{J}{m^3 \cdot K}$	(18)

$q_A = \frac{V_{sp}^S \cdot C_{pm;Atr}}{H_U} \cdot (t_A - t_L)[-]$ $q_A = \frac{6{,}454 \cdot 0{,}377 \cdot 3600}{17020000} \cdot (106{,}7 - 20)$ $q_A = 0{,}0446$	(19)

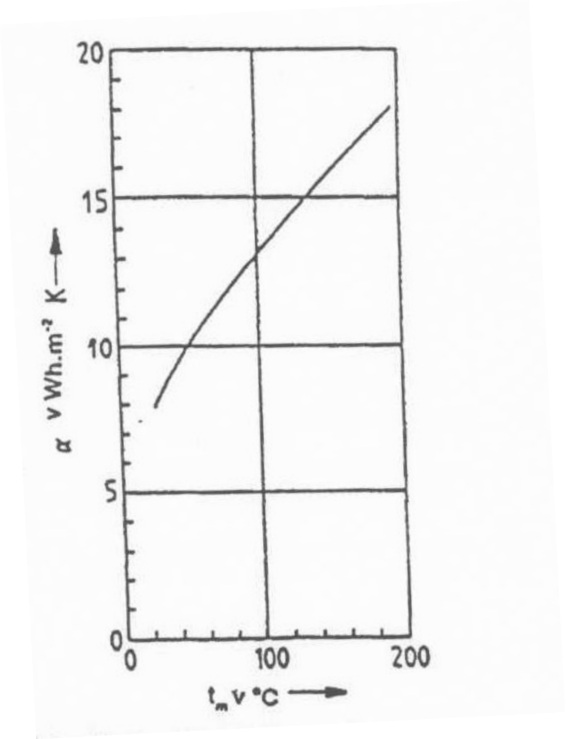
$V_{CO_2} = V_{CO_2 n} \cdot \frac{V_{sp}^V}{V_{sp}^S} \cdot V_{sp}^S \left[\frac{m_{N;CO_2}^3}{kg_{pal}}\right]$ $V_{CO_2} = 0{,}137 \cdot \frac{7{,}194}{6{,}454} \cdot 6{,}454$ $V_{CO_2} = 0{,}9865 \frac{m_{N;CO_2}^3}{kg_{pal}}$	(20)

$V_{CO} = \frac{V_{CO\ n}}{1000000} \cdot \frac{V_{sp}^{V}}{\rho_{CO}} \left[\frac{\frac{mg_{CO}}{m^3_{spalin;vlhkých}}}{1000000} \cdot \frac{m^3_{spalin;vlhkých}}{kg_{pal}} \cdot \frac{m^3_{N;CO}}{kg_{CO}} \right]$ $V_{CO} = \frac{75}{1000000} \cdot 7{,}194 \cdot \frac{1}{0{,}6244}$ $V_{CO} = 0{,}000864 \frac{m^3_{N;CO}}{kg_{pal}}$	

V_{Atr} je nutno počítat pouze u nedokonalého spalování, kdy množství CO ve spalinách místo množství CO_2 může ovlivnit objem spalin vytvořených na 1 kg paliva. V tomto případě změna objemu není ohrožena z toho důvodu, že CO ve spalinách zaujímá řádově tisíc krát menší objem než CO_2. Můžeme tedy V_{Atr} zjednodušit na následující.

$V_{Atr} = V_{sp}^{S} \left[\frac{m^3_{N;sp}}{kg_{pal}} \right]$ $V_{Atr} = 6{,}454 \frac{m^3_{N;sp}}{kg_{pal}}$	(21)

$q_U = CO \cdot V_{Atr} \cdot \frac{12{,}64}{H_u} [\%]$ $q_U = \frac{0{,}000864}{0{,}06454} \cdot 6{,}454 \cdot \frac{12{,}64}{17020000}$ $q_U = 6{,}42 \cdot 10^{-8}\ \%$	(22)



Obr. č. 5.17 Přibližné hodnoty součinitele přestupu tepla α vnějšího horizontálního a vertikálního povrchu kotle v závislosti na průměrné teplotě povrchu t_m při teplotě okolního prostředí t_L = 20 °C

Dle Obr. č. 5.17 byla zvolena hodnota součinitele přestupu tepla α = 8 W·(m²·K)⁻¹

$Q_x = F_x \cdot \alpha \cdot (t_m - 20)[W]$ $Q_x = 5{,}72 \cdot 8 \cdot (30 - 20) + 0{,}06 \cdot 13 \cdot (100 - 20)$ $Q_x = 520\ W$	(23)

$q_S = \frac{\sum Q_x}{Q_B}[\%]$ $q_S = \frac{520}{20000}$ $q_S = 0{,}026$	(24)

Ztráta podílem uhlíku v tuhých zbytcích byla stanovena na $q_B = 0{,}025$.

$\eta_{k;n} = 1 - q_A - q_U - q_S - q_B[-]$	(25)

$\eta_{k;n} = 1 - 0{,}0446 - 6{,}42 \cdot 10^{-8} - 0{,}026 - 0{,}025$ $\eta_{k;n} = 0{,}904 \rightarrow 90{,}4\%$	

Výpočty potřebné k vyhodnocení výsledků měření

Hodnoty pro tento reprezentativní výpočet byly naměřeny při spalovací zkoušce na jmenovitém výkonu v čase 10:15.

Přepočet koncentrace CO z ppm na mg/m^3$_N$ při naměřeném obsahu kyslíku

$CO_{mg/m_N^3} = \frac{M_{CO}}{V_{molární}} \cdot CO_{ppm} \left[\frac{mg}{m_N^3}\right]$ $CO_{mg/m_N^3} = \frac{M_C + M_O}{V_{molární}} \cdot CO_{ppm}$ $CO_{mg/m_N^3} = \frac{12{,}0107 + 15{,}994}{22{,}414} \cdot 33{,}9$ $CO_{mg/m_N^3} = 42{,}7 \frac{mg}{m_N^3}$	(26)

Přepočet koncentrace CO v mg/m^3$_N$ při nulovém obsahu kyslíku ve spalinách

$CO_{mg/m_N^3;O_2=0\%} = CO_{mg/m_N^3} \cdot \frac{21}{21 - O_{2;naměřené}} \left[\frac{mg}{m_N^3}\right]$ $CO_{mg/m_N^3;O_2=0\%} = 42{,}7 \cdot \frac{21}{21 - 8}$ $CO_{mg/m_N^3;O_2=0\%} = 69 \frac{mg}{m_N^3}$	(27)

Přepočet koncentrace CO v mg/m^{3}N při referenčním obsahu kyslíku ve spalinách

$CO_{mg/m_N^3;O_{2;ref}=10\%} = CO_{mg/m_N^3;O_2=0\%} \cdot \frac{21 - O_{2;ref}}{21} \left[\frac{mg}{m_N^3}\right]$ $CO_{mg/m_N^3;O_{2;ref}=10\%} = 69 \cdot \frac{21 - 8}{21}$ $CO_{mg/m_N^3;O_{2;ref}=10\%} = 36 \frac{mg}{m_N^3}$	(28)

Přepočet koncentrace NO_x z ppm na mg/m^3_N při naměřeném obsahu kyslíku

$NO_{x_{mg/m^3_N}} = \frac{M_{NO_x}}{V_{molární}} \cdot NO_{x_{ppm}} \left[\frac{mg}{m^3_N}\right]$ $NO_{x_{mg/m^3_N}} = \frac{M_N + M_{O_2}}{V_{molární}} \cdot NO_{x_{ppm}}$ $NO_{x_{mg/m^3_N}} = \frac{14{,}0067 + 15{,}994 \cdot 2}{22{,}414} \cdot 101{,}1$ $NO_{x_{mg/m^3_N}} = 207{,}3 \frac{mg}{m^3_N}$	(29)

Přepočet koncentrace NO_x v mg/m^3_N při nulovém obsahu kyslíku ve spalinách

$NO_{x_{mg/m^3_N;O_2=0\%}} = NO_{x_{mg/m^3_N}} \cdot \frac{21}{21 - O_{2;naměřené}} \left[\frac{mg}{m^3_N}\right]$ $NO_{x_{mg/m^3_N;O_2=0\%}} = 207{,}3 \cdot \frac{21}{21 - 8}$ $NO_{x_{mg/m^3_N;O_2=0\%}} = 335 \frac{mg}{m^3_N}$	(30)

Přepočet koncentrace NO_x v mg/m3N při referenčním obsahu kyslíku ve spalinách

$NO_{x_{mg/m^3_N;O_{2;ref}=10\%}} = NO_{x_{mg/m^3_N;O_2=0\%}} \cdot \frac{21 - O_{2;ref}}{21} \left[\frac{mg}{m^3_N}\right]$ $NO_{x_{mg/m^3_N;O_{2;ref}=10\%}} = 335 \cdot \frac{21 - 10}{21}$ $NO_{x_{mg/m^3_N;O_{2;ref}=10\%}} = 175 \frac{mg}{m^3_N}$	(31)

- V této diplomové práci nejsou uvedeny přepočty koncentrací SO_2 z toho důvodu, že hmotnostní podíl síry v palivu se blíží nule a emise této složky ve spalinách jsou pod hranicí detekce.

Přepočet koncentrace TOC z ppm na mg/m³N při naměřeném obsahu kyslíku

$$TOC_{mg/m_N^3} = \frac{M_{C_3} \cdot \left(M_{C_3} + M_{H_8}\right)}{\left(M_{C_3} + M_{H_8}\right) \cdot V_{molární}} \cdot C_3H_{8_{ppm}} \left[\frac{mg}{m_N^3}\right]$$

$$TOC_{mg/m_N^3} = \frac{12{,}0107 \cdot 3 \cdot (12{,}0107 \cdot 3 + 1 \cdot 8)}{(12{,}0107 \cdot 3 + 1 \cdot 8) \cdot 22{,}414} \cdot C_3H_{8_{ppm}}$$

$$TOC_{mg/m_N^3} = \frac{12{,}0107 \cdot 3 \cdot (12{,}0107 \cdot 3 + 1 \cdot 8)}{(12{,}0107 \cdot 3 + 1 \cdot 8) \cdot 22{,}414} \cdot 0$$

$$TOC_{mg/m_N^3} = 0 \frac{mg}{m_N^3} \tag{32}$$

Přepočet koncentrace TOC v mg/m³N při nulovém obsahu kyslíku ve spalinách

$$TOC_{mg/m_N^3;O_2=0\%} = TOC_{mg/m_N^3} \cdot \frac{21}{21 - O_{2;naměřené}} \left[\frac{mg}{m_N^3}\right]$$

$$TOC_{mg/m_N^3;O_2=0\%} = 0 \cdot \frac{21}{21 - 8}$$

$$TOC_{mg/m_N^3;O_2=0\%} = 0 \frac{mg}{m_N^3} \tag{33}$$

Přepočet koncentrace TOC v mg/m3N při referenčním obsahu kyslíku ve spalinách

$$TOC_{mg/m_N^3;O_{2;ref}=10\%} = TOC_{mg/m_N^3;O_2=0\%} \cdot \frac{21 - O_{2;ref}}{21} \left[\frac{mg}{m_N^3}\right]$$

$$TOC_{mg/m_N^3;O_{2;ref}=10\%} = 0 \cdot \frac{21 - 10}{21}$$

$$TOC_{mg/m_N^3;O_{2;ref}=10\%} = 0 \frac{mg}{m_N^3} \tag{34}$$

Přepočet koncentrace CO2 z % na g/m³N při naměřeném obsahu kyslíku

$$CO_{2_{g/m_N^3}} = \frac{M_{CO_2}}{V_{molární}} \cdot CO_{2_{ppm}} \cdot 10 \left[\frac{g}{m_N^3}\right]$$

$$CO_{2_{g/m_N^3}} = \frac{M_C + M_{O_2}}{V_{molární}} \cdot CO_{2_{ppm}} \cdot 10$$

$$CO_{2_{g/m_N^3}} = \frac{12{,}0107 + 15{,}994 \cdot 2}{22{,}414} \cdot 12{,}5 \cdot 10 \tag{35}$$

$CO_{2_{g/m_N^3}} = 246{,}8 \dfrac{g}{m_N^3}$	

Přepočet koncentrace CO_2 v mg/m^3_N při nulovém obsahu kyslíku ve spalinách

$CO_{2_{g/m_N^3;O_2=0\%}} = CO_{2_{mg/m_N^3}} \cdot \dfrac{21}{21 - O_{2;naměřené}} \left[\dfrac{g}{m_N^3}\right]$ $CO_{2_{g/m_N^3;O_2=0\%}} = 246{,}8 \cdot \dfrac{21}{21-8}$ $CO_{2_{g/m_N^3;O_2=0\%}} = 399 \dfrac{g}{m_N^3}$	(36)

Přepočet koncentrace CO2 v mg/m3N při referenčním obsahu kyslíku ve spalinách

$CO_{2_{g/m_N^3;O_{2;ref}=10\%}} = CO_{2_{mg/m_N^3;O_2=0\%}} \cdot \dfrac{21 - O_{2;ref}}{21} \left[\dfrac{g}{m_N^3}\right]$ $CO_{2_{g/m_N^3;O_{2;ref}=10\%}} = 399 \cdot \dfrac{21-10}{21}$ $CO_{2_{g/m_N^3;O_{2;ref}=10\%}} = 209 \dfrac{g}{m_N^3}$	(37)

Střední teplota vody

$t_{stř} = \dfrac{t_{vstupní} + t_{výstupní}}{2} \; [°C]$ $t_{stř} = \dfrac{73{,}8 + 53{,}5}{2} \; [°C]$ $t_{stř} = 63{,}6 \; [°C]$	(38)

Měrná tepelná kapacita otopné vody dle střední teploty

$c_{vody} = -0{,}000000000052149 \cdot t_{stř}^5 + 0{,}000000016249411 \cdot t_{stř}^4 - 0{,}000001991605396 \cdot t_{stř}^3 + 0{,}000128266361408 \cdot t_{stř}^2 - 0{,}004090183621258 \cdot t_{stř} + 4{,}22509056205308 \left[\dfrac{kJ}{kg \cdot K}\right]$ [29]	(39)

$c_{vody} = -0{,}000000000052149 \cdot 63{,}6^5 + 0{,}000000016249411 \cdot 63{,}6^4 - 0{,}000001991605396 \cdot 63{,}6^3 + 0{,}000128266361408 \cdot 63{,}6^2 - 0{,}004090183621258 \cdot 63{,}6 + 4{,}22509056205308$ $c_{vody} = 4{,}183 \frac{kJ}{kg \cdot K}$	

Hustota vstupní otopné vody

$\rho_{vstupní} = -0{,}000000121864764 \cdot t_{vstupní}^4 + 0{,}000039583795051 \cdot t_{vstupní}^3 - 0{,}007373096287665 \cdot t_{vstupní}^2 + 0{,}047796257993468 \cdot t_{vstupní} + 999{,}917624696012$ $\rho_{vstupní} = -0{,}000000121864764 \cdot 53{,}5^4 + 0{,}000039583795051 \cdot 53{,}5^3 - 0{,}007373096287665 \cdot 53{,}5^2 + 0{,}047796257993468 \cdot 53{,}5 + 999{,}917624696012$ $\rho_{vstupní} = 986{,}4 \frac{kg}{m^3}$	(40)

Hmotnostní průtok otopné vody

$\dot{m}_{vody} = \rho \cdot \dot{V}_{vody} \left[\frac{kg}{h}\right]$ $\dot{m}_{vody} = 986{,}4 \cdot 0{,}823$ $\dot{m}_{vody} = 811{,}3 \frac{kg}{h}$	(41)

Tepelný výkon kotle

$Q_{kotle} = \dot{m}_{vody} \cdot c_{vody} \cdot \frac{t_{výstupní} - t_{vstupní}}{3600} [kW]$ $Q_{kotle} = 809{,}62 \cdot 4{,}185 \cdot \frac{77{,}8 - 56{,}5}{3600}$ $Q_{kotle} = 20{,}0\ kW$	(42)

Sezónní energetická účinnost a sezónní emise kotle [42;45]

- Výpočet sezónní energetické účinnosti vychází z účinnosti stanovené na základě spalného tepla paliva, ne na základě výhřevnosti

$\eta_s = \left(0{,}85 \cdot \eta_{k;Psn} + 0{,}15 \cdot \eta_{k;Pjm}\right) - F(1) - F(2) - F(3) - F(4) + F(5)$ [%] [42;45] $\eta_s = (0{,}85 \cdot 83{,}93 + 0{,}15 \cdot 81{,}38) - 3 - 0{,}012 - 0 - 0{,}0195 + 0$ $\eta_s = 80{,}52\ \%$	(43)

F(1) - opravný součinitel vyjadřující ztrátu při vytápění vnitřních prostor F(1) = 3 %

F(2) – opravný součinitel zohledňující vedlejší spotřebu elektrické energie – potřebné hodnoty pro jeho výpočet zjištěné na základě experimentálního měření jsou uvedeny v Tab. č. 5.6.

$F(2) = 2{,}5 \cdot \frac{(0{,}15 \cdot elmax + 0{,}85 \cdot elmin + 1{,}3 \cdot P_{SB})}{(0{,}15 \cdot P_4 + 0{,}85 \cdot P_1)}\ [-][42;45]$ $F(2) = 2{,}5 \cdot \frac{(0{,}15 \cdot 50 + 0{,}85 \cdot 40 + 1{,}3 \cdot 0{,}1)}{(0{,}15 \cdot 20000 + 0{,}85 \cdot 6600)}$ $F(2) = 0{,}012\ [-]$	(44)

F(3) – opravný součinitel zohledňující tepelné ztráty v pohotovostním režimu

F(4) – opravný součinitel zohledňující spotřebu energie pro zapálení

$F(4) = 1{,}3 \cdot \frac{P_{IGN}}{P_4}\ [-]\ [42]$ $F(4) = 1{,}3 \cdot \frac{300}{20000}$ $F(4) = 0{,}0195\ [-]$	(45)

F(5) – opravný součinitel zohledňující energetickou účinnost kogeneračních ohřívačů

elmax	příkon energie při plném zatížení	50 W
elmin	příkon energie při částečném zatížení	40 W
$\mathbf{P_{SB}}$	příkon energie v pohotovostním režimu	0,1 W
P4	užitečný tepelný výkon při jmenovitém tepelném výkonu	20 000 W
P1	užitečný tepelný výkon při sníženém tepelném výkonu	6 600 W
$\mathbf{P_{IGN}}$	příkon energie pro zapalovací tělísko	300 W

Tab. č. 5.6 Hodnoty pro výpočet opravných součinitelů

Sezonní emise kotle, které jsou základem pro srovnání s limitními hodnotami pro splnění podmínek dle NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2015/1189 ze dne 28. dubna 2015 jsou vypočítávány stejně jako sezonní účinnost, tedy jako vážený průměr hodnot emisí při jmenovitém a sníženém výkonu při zohlednění pravděpodobné doby činnosti obou režimů. Výpočet je pak shodný jako ve výpočtu (**Chyba! Záložka není definována.**), jen bez opravných koeficientů. [45]

6. Závěr

V rámci této diplomové práce jsem se zabýval návrhem a následným testováním nového typu hořáku na bílé dřevní pelety. Při zpracování teoretické části této práce jsem se seznámil s podstatou dřeva, jednak jako hmoty, ale také jako paliva. Další část byla zaměřena především na dřevní pelety, a to z hlediska jejich výroby i spotřeby ve spalovacích zařízeních malých výkonů, kterým byla věnovaní samostatná kapitola s podrobným popisem všech částí těchto zařízení. Část této práce byla věnována platné legislativě týkající se spalovacích zařízení, a to nejen s ohledem na český trh, ale také s ohledem na trh evropský se zvláštním důrazem na německý a rakouský.

V experimentální části této práce jsem se zabýval detailním konstrukčním návrhem těla hořáku na dřevní pelety společně s roštem pro toto tělo určeným. Záměrem bylo navrhnout takový hořák, který bude umožňovat snadnou výměnu roštu a celkově jeho výroba bude jednoduchá, a tedy i levná. S těmito základními poznatky a zkušenostmi pana Ing. Pešata byly navrženy obě části hořáku, tedy hořák samotný a rošt. Prototyp tohoto zařízení byl vyroben na zakázku výrobní firmou.

Po dodání hořáku jsem se podílel na sestavení experimentálního stanoviště pro spalovací zkoušky na zkušebně Výzkumného energetického centra, jehož hlavním prvkem bylo kotlové těleso společnosti PONAST spol. s r.o., přesněji model KP21. Na tomto stanovišti také probíhalo třídenní měření, na jehož základě proběhlo také vyhodnocení tohoto hořáku v porovnání s platnou legislativou.

Jak je patrné z výsledků uvedených výše, navržený hořák splňuje parametry pro 5. třídu dle ČSN EN 303-5 a splňuje také parametry pro Ekodesign. Emise CO jsou při jmenovitém výkonu (54 mg/m^3_N) takřka desetinové při srovnání s limitem (500 mg/m^3_N). Při sníženém výkonu emise CO narůstaly, avšak průměrná hodnota vyhodnocovaného úseku (167 mg/m^3_N) zůstala na třetinové výši oproti emisnímu limitu dle platné evropské normy. Emise NO_x (169 mg/m^3_N; 158 mg/m^3_N) zůstávaly při obou režimech na úrovni kolem tři čtvrtin emisního limitu (200 mg/m^3_N) daného vyhláškou o Ekodesignu. Koncentrace OCG byla při obou zkouškách pod mezí detekce, tedy řádově maximálně na setině platného limitu. Koncentrace TZL byly u obou zkoušek měřeny ve třech časových intervalech, ze kterého pak byly vypočteny průměrné hodnoty (28 mg/m^3_N; 28 mg/m^3_N). Nutno říct, že u druhého měření, tedy u sníženého výkonu bylo měření TZL prováděno v jiném intervalu, než, který byl užit pro vyhodnocení ostatních znečišťujících látek. K tomuto došlo z toho důvodu, že se přibližně v půlce měření na roštu vytvořila hromádka paliva, jejíž vznik byl popsán v kapitole 5.5.2, přičemž tato hromádka zásadně ovlivnila výsledky měření. I při tomto režimu však byly mezní hodnoty emisí pro splnění 5. třídy dodrženy. Koncentrace TZL byla rovněž u obou měřených režimů takřka shodná, a to na přibližné tříčtvrtinové úrovni vzhledem k mezní hodnotě (40 mg/m^3_N) pro 5. třídu danou normou ČSN EN 303 - 5.

Nutno také zmínit, že při měření sníženého výkonu nebylo dosaženo výkonu pod 30 % jak udává norma. Řídící jednotka, která ovládá přívod paliva do hořáku umožňuje minimální nastavení paliva od 20 do 100 % přičemž pro tuto zkoušku byla užita nejnižší možná hodnota 20 %.

V roce 2017 budou práce na vývoji hořáku pokračovat, tak aby hořák byl schopen plnit i přísnější emisní limity. Tento vývoj také jistě povede ke konstrukčním úpravám hořáku jako například prodloužení a zvýšení žáruvzdorné tvarovky, zvětšení otvorů pro vzduch mezi zadní a přední částí hořáku, lepší rozmístění děr na roštu, změnu úhlu stoupání roštu pro zamezení utvoření spečené hromádky popela, popřípadě lepší uchycení a utěsnění roštu v těle hořáku.

7. Seznam použité literatury

[1] HOLZ, Thomas. *Topíme dřevěnými peletami: návrh, instalace a provoz*. Praha: Grada, 2007. Profi. ISBN 978-80-247-1634-3.

[2] Ceny paliv a energií – přehled cen pelet. *Tzbinfo: stavebnictví, úspory energií, technická zařízení budov* [online]. Topinfo s.r.o., Křenova 438/3, 162 00 Praha 6, 2016 [cit. 2016-07-12]. Dostupné z: http://www.tzb-info.cz/ceny-paliv-a-energii/43-prehled-cen-pelet

[3] Ceny paliv a energií – přehled cen dřevní štěpky. *Tzbinfo: stavebnictví, úspory energií, technická zařízení budov* [online]. Topinfo s.r.o., Křenova 438/3, 162 00 Praha 6, 2016 [cit. 2016-07-12]. Dostupné z: http://www.tzb-info.cz/ceny-paliv-a-energii/43-prehled-cen-pelet

[4] *Silmet* [online]. Příbram, 2016 [cit. 2016-07-12]. Dostupné z: http://www.silmetoil.cz/

[5] Cenníky. *RWE* [online]. Praha, 2016 [cit. 2016-07-12]. Dostupné z: https://www.rwe.cz/stavajici-zakaznici/ceniky/

[6] Tabulky a výpočty – porovnání nákladů na vytápění podle druhu paliva. *Tzbinfo: stavebnictví, úspory energií, technická zařízení budov* [online]. Topinfo s.r.o., Křenova 438/3, 162 00 Praha 6, 2016 [cit. 2016-07-12]. Dostupné z: http://vytapeni.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/139-porovnani-nakladu-na-vytapeni-podle-druhu-paliva

[7] SKLENÁŘ, V. *Automatický kotel na pelety.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 101 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D..

[8] *Česká Peleta* [online]. Dobřichovice: Klastr Česká peleta – Česká peleta, z.s.p.o., 2016 [cit. 2016-11-15]. Dostupné z: http://www.ceska-peleta.cz/

[9] ČSN EN ISO 17225-1 Tuhá biopaliva - Specifikace a třídy paliv - Část 1: Obecné požadavky; Praha: Český normalizační institut, Leden 2015.

[10] Celulóza. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-11-24]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Celul%C3%B3za

[11] *Renewable Living* [online]. Unit B, Templars Way Industrial Estate Royal Wootton Bassett, Wiltshire SN4 7SR Main, 2016 [cit. 2016-11-24]. Dostupné z: https://www.google.cz/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&ved=0ahUKEwjU-OWG4sHQAhVBlRQKHW0CC3QQjxwIAw&url=http%3A%2F%2Fwww.renewable-living.com%2Fwood-pellet-silos%2F&bvm=bv.139782543,d.ZGg&psig=AFQjCNGZrKuSznWajP8CxFc6J-JgWZQAPQ&ust=1480089726404330

[12] *Atmos* [online]. Velenského 487 294 21 Bělá pod Bezdězem Česká Republika, 2016 [cit. 2016-11-25]. Dostupné z: http://www.atmos.eu/

[13] Centrum vytýpění. *Centrum vytýpění* [online]. Tábor: Radek Janů, 2016 [cit. 2016-12-02]. Dostupné z: http://www.centrumvytapeni.cz/

[14] *OPOP: partner for your heating* [online]. Valašské Meziříčí, 2016 [cit. 2016-12-02]. Dostupné z: http://test27.nowonet.com/

[15] *MplusM fan* [online]. Lipník nad Bečvou, 2016 [cit. 2016-12-02]. Dostupné z: http://www.mplusm-fan.com/

[16] *Viessmann* [online]. Allendorf, 2016 [cit. 2016-12-02]. Dostupné z: http://www.viessmann.com/vires/product_documents/5681618VSA00001_1.PDF

[17] SUK, L. Vytápění rodinného domu biomasou. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 58 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Lisý, Ph.D.

[18] *VERNER expert na teplo: expert na teplo* [online]. Bratislava, 2016 [cit. 2016-12-02]. Dostupné z: http://www.kotle-verner.cz/produkty/automaticke-kotle/verner-a251

[19] *ESVEKO* [online]. Kostelec nad Černými lesy, 2016 [cit. 2016-12-02]. Dostupné z: http://esveko.esel.cz/w/6219/automaticky-kotel-a602

[20] Malotraktory Silesia. *Malotraktory Silesia* [online]. Ludgeřovice: Malotraktory Silesia, 2017 [cit. 2017-01-24]. Dostupné z: http://www.malotraktorysilesia.cz/peletovaci-technika/univerzalni-horak-na-pelety/

[21] *Šetrná energie* [online]. Louny, 2016 [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: http://www.setrnaenergie.cz/index.php/ekoefekt/ekoefektpetrojet

[22] Dřevo. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-01-24]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/D%C5%99evo

[23] *TZB-info: Brikety a pelety – statistika domácí výroby a spotřeby do roku 2013* [online]. Křenova 438/3, 162 00 Praha 6: Topinfo, 2015 [cit. 2017-01-24]. Dostupné z: http://oze.tzb-info.cz/peletky/12372-brikety-a-pelety-statistika-domaci-vyroby-a-spotreby-do-roku-2013

[24] *TZB-info*: *Jak vybírat nový kotel na pevná paliva* [online]. Křenova 438/3, 162 00 Praha 6: Topinfo, 2013 [cit. 2017-01-29]. Dostupné z: http://vytapeni.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/9798-jak-vybirat-novy-kotel-na-pevna-paliva-1

[25] *Atmos* [online]. Bělá pod Bezdězem, 2017 [cit. 2017-01-29]. Dostupné z: http://www.atmos.eu/

[26] *TZB-info*: Jaké parametry musí splnit kotle na tuhá paliva? Legislativa v ČR a Evropě. [online]. Křenova 438/3, 162 00 Praha 6: Topinfo, 2013 [cit. 2017-02-02]. Dostupné z: http://vytapeni.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/9665-jake-parametry-musi-splnit-kotle-na-tuha-paliva-legislativa-v-cr-a-evrope

[27] *TZB-info*: J Směrnice o Ekodesignu pro kotle a kamna na tuhá paliva Zdroj: http://vytapeni.tzb-info.cz/kotlikove-dotace/11937-smernice-o-ekodesignu-pro-kotle-a-kamna-na-tuha-paliva [online]. Křenova 438/3, 162 00 Praha 6: Topinfo, 2013 [cit. 2017-02-02]. Dostupné z: http://vytapeni.tzb-info.cz/kotlikove-dotace/11937-smernice-o-ekodesignu-pro-kotle-a-kamna-na-tuha-paliva

[28] *TZB-info*: J Novela zákona 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší Zdroj: http://vytapeni.tzb-info.cz/14797-novela-zakona-201-2012-sb-o-ochrane-ovzdusi [online]. Křenova 438/3, 162 00 Praha 6: Topinfo, 2013 [cit. 2017-02-02]. Dostupné z: http://vytapeni.tzb-info.cz/14797-novela-zakona-201-2012-sb-o-ochrane-ovzdusi

[29] RAŽNJEVIĆ, Kuzman. Termodynamické tabuľky. Přeložil Ernest KABÁT. Bratislava: Alfa, 1984.

[30] *TZB-info: Přehled světového trhu s peletami 2015 - 2016* [online]. Křenova 438/3, 162 00 Praha 6: Topinfo, 2015 [cit. 2017-01-24]. Dostupné z: http://oze.tzb-info.cz/peletky/15608-prehled-svetoveho-trhu-s-peletami-2015-2016

[31] O energetice: Většina českých pelet loni opět mířila do zahraničí Více na: http://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/vetsina-ceskych-pelet-loni-opet-mirila-do-zahranici/ [online]. Praha, 2016 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: http://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/vetsina-ceskych-pelet-loni-opet-mirila-do-zahranici/

[32] Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1. BImSchV), 1/2010

[33] Vereinbarung gemäß Art. 15a B-VG über das Inverkehrbringen von Kleinfeuerungen und die Überprüfung von Feuerungsanlagenund Blockheizkraftwerken. 2011.

[34] SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2009/125/ES ze dne 21. října 2009 o stanovení rámce pro určení požadavků na ekodesign výrobků spojených se spotřebou energie

[35] ČSN EN 303-5 Kotle pro ústřední vytápění - Část 5: Kotle pro ústřední vytápění na pevná EN 303-5 paliva s ruční a samočinnou dodávkou o jmenovitém tepelném výkonu nejvýše 500 kW - Terminologie, požadavky, zkoušení a značení. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.

[36] Ing. Michal Branc. Studium procesu hoření dřeva. Ostrava, 2010. Disertační práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Doc. Dr. Ing. Tadeáš Ochodek.

[37] Cellulose strands surrounded by hemicellulose and lignin. Reserch Gate [online]. San Francisco: ResearchGate Corporation, 2017 [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/256369739_fig1_Fig-1-e-Cellulose-strands-surrounded-by-hemicellulose-and-lignin-1

[38] ČSN EN 17225-2 Tuhá biopaliva – Specifikace a třídy paliv – Část 2: Tříděné dřevní pelety. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.

[39] ČSN EN 17225-1 Tuhá biopaliva – Specifikace a třídy paliv – Část 1: obecné požadavky. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.

[40] Wood pellet market in the EU- recent findings. *Forest Monitor* [online]. 2016 [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: http://www.forest-monitor.com/en/wood-pellet-market-eu-recent-findings/

[41] Ako vybrať kotol na biomasu. *SIEA: Žiť Energiou* [online]. Bratislava: SIEA, 2017 [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: https://www.siea.sk/letaky/c-260/ako-vybrat-kotol-na-biomasu/

[42] Sdělení Komise v rámci provádění nařízení Komise (EU) č. 813/2013. *EUR-LEX* [online]. Brusel, 2013 [cit. 2017-04-27]. Dostupné z: http://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX%3A52014XC0703(01)

[43] Slévárenský koks. *PCC MORAVA - CHEM s.r.o.* [online]. Český Těšín, 2017 [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: http://www.pccmorava-chem.cz/ttw/mch.nsf/id/CZ_foundry_Koks

[44] Speciální mapa Moravskoslezského kraje odhaluje zdroje znečištění. *Česká televize* [online]. Ostrava: Česká Televize, 2016 [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: http://www.ceskatelevize.cz/ct24/domaci/1652995-specialni-mapa-moravskoslezskeho-kraje-odhaluje-zdroje-znecisteni

[45] 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. *Atelier Dek* [online]. Praha, 2009 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: https://atelier-dek.cz/docs/atelier_dek_cz/sluzby/dotace/kotlikova-dotace-narizeni-komise-EU.pdf

8. Seznam obrázků

Obr. č. 2.1 Pelety [8] ... 9
Obr. č. 2.2 Struktura dřeva [37] ... 10
Obr. č. 2.3 Základní schéma peletovací linky [8] ... 13
Obr. č. 2.4 Světová výroba a spotřeba pelet [40] ... 23
Obr. č. 2.5 Schématické znázornění produkce dřevních pelet v jednotlivých státech Evropy [40] ... 24
Obr. č. 2.6 Schématické znázornění spotřeby dřevních pelet v jednotlivých státech Evropy [40] ... 24
Obr. č. 3.1 Konstrukce prohořívacího a odhořívacího kotle [24] ... 27
Obr. č. 3.2 Konstrukce zplyňovacího a automatického kotle [24] ... 28
Obr. č. 3.3 Kombinovaný kotel ATMOS DC18SP(L) [25] ... 29
Obr. č. 3.4 Schéma sestavy kotle na pelety s okolním zařízením [41] ... 30
Obr. č. 3.5 Hořák používaný v kotli typu Vitolig 300; A – rozváděcí kužel; B – vyjímatelná otočná součást; C – rozvod primárního vzduchu; D – roštová deska; E – vnější plášť hrnce; F – vnitřní plášť hrnce [16] ... 32
Obr. č. 3.6 Hořáková část kotle VERNER 251 [18] ... 33
Obr. č. 3.7 Přesuvný rošt [19] ... 33
Obr. č. 3.8 Hořák univerzální (lopata) 25kW [20] ... 34
Obr. č. 3.9 Rotační bubnový hořák; 1 – ventilátor; 2 – šnekový dopravník; 3 – rotační buben pro spalování; 4 – šroubové lamely; 5 – tryskový kroužek; 6 – přídavná spalovací komora ... 35
Obr. č. 3.10 Podavač pelet značky OPOP o délce 3 m pro výkony hořáku 10 – 20 kW [13] ... 37
Obr. č. 3.11 Tlačný radiální ventilátor WPA 07 firmy MplusM fan [15] ... 37
Obr. č. 3.12 Obří vak pro skladování pelet [11] ... 38
Obr. č. 3.13 Sklad pelet s přímým podáváním paliva do kotle (vlevo) a sklad s mezi zásobníkem paliva (vpravo) [12] ... 39
Obr. č. 3.14 Příklady mezi zásobníků pelet [14] ... 40
Obr. č. 4.1Koncentrace poletavého prachu PM10 v Moravskoslezském kraji mimo topnou sezónu [44] ... 42
Obr. č. 4.2 Koncentrace poletavého prachu PM10 v Moravskoslezském kraji v topné sezóně [44] ... 43
Obr. č. 5.1 Nový hořák ... 52
Obr. č. 5.2 Umístění žáruvzdorné těsnící šňůry a ustavovacího šroubu ... 53
Obr. č. 5.3 Pohled z boku na nový hořák s vyznačením oddělovací části ... 54
Obr. č. 5.4 Ústí trubičky s odporovým keramickým válečkem pro zapalování ... 55

Obr. č. 5.5 Zamýšlený proud ohřívaného vzduchu kolem keramického válečku a skrz něj, určeného pro zapálení pelet 55
Obr. č. 5.6 Kotel Ponast KP21 použitý pro testování nového hořáku 56
Obr. č. 5.7 Analyzátor spalin 57
Obr. č. 5.8 Schéma stroje Wöhler SM 500 na měření prachu 59
Obr. č. 5.9 Schéma zapojení měřících přístrojů při spalovacích zkouškách dle normy ČSN EN 303-5; I – úsek pro měření tahu; II – úsek pro měření teploty; III – úsek pro měření obsahu tuhých znečišťujících látek ve spalinách; IV – úsek pro měření koncentrace znečišťujících látek ve spalinách [35] 60
Obr. č. 5.10 Reálné rozmístění vybavení pro spalovací zkoušky 61
Obr. č. 5.11 vpravo 1. fáze zapalování – vyfoukávání popela z předešlého provozu 62
Obr. č. 5.12 vlevo 2. fáze zapalování – navážka hromádky paliva 62
Obr. č. 5.13 vlevo 3. fáze zapalování – ohřívání vzduchu průtokem kolem a skrz keramický váleček 62
Obr. č. 5.14 vpravo 4. fáze – první plameny, počátek hoření 62
Obr. č. 5.15 5. fáze – stabilní hoření 63
Obr. č. 5.16 6. fáze – vyhasínání 63
Obr. č. 5.17 Přibližné hodnoty součinitele přestupu tepla α vnějšího horizontálního a vertikálního povrchu kotle v závislosti na průměrné teplotě povrchu t_m při teplotě okolního prostředí t_L = 20 °C 79

9. Seznam tabulek

Tab. č. 2.1 Rozdělení certifikace ENplus [8] 15
Tab. č. 2.2 Normy pro dřevěné pelety [1,9] 16
Tab. č. 2.3 Složení přírodního dřeva [1] 17
Tab. č. 2.4 Porovnání výhod a nevýhod spalovacího zařízení na pelety [1] 18
Tab. č. 3.1 Porovnání parametru „potenciál kotle“ [24] 29
Tab. č. 4.1Mezní hodnoty emisí CO dle ČSN EN 303-5:2013[26] 44
Tab. č. 4.2 Mezní hodnoty emisí OCG dle ČSN EN 303-5:2013[26] 45
Tab. č. 4.3 Mezní hodnoty emisí prachu (TZL) dle ČSN EN 303-5:2013[26] 45
Tab. č. 4.4 Limitní hodnoty emisí, CO a TZL (prachu) dle 1. BImSchV [26]; 1) je vztaženo k suchým spalinám za normálních podmínek a obsahu referenčního kyslíku O_2 = 13% [26] 48
Tab. č. 4.5 Emisní limity dle 15a B-VG pro kotle s ručním přikládáním paliva; [26] 49
Tab. č. 4.6 Emisní limity dle 15a B-VG pro kotle s automatickým přikládáním paliva; a – limitní hodnota může být překročena o 50% v případě zkoušky při sníženém výkonu (30% jmenovitého výkonu [26] 49
Tab. č. 4.7 Minimální povolená účinnost dle 15a B-VG [26] 50
Tab. č. 4.8 Přehled schválených hodnot emisních limitů a účinností pro kotle na tuhá paliva při 10% podílu O_2 [27;45] 50
Tab. č. 5.1 Vyhodnocení spalovacích zkoušek pro měření jmenovitého výkonu; (1) – hodnoty pro Německo byly přepočteny na referenční obsah kyslíku O_{2ref} = 10%66
Tab. č. 5.2 Vyhodnocení spalovacích zkoušek pro měření sníženého výkonu ;(1) – hodnoty pro Německo byly přepočteny na referenční obsah kyslíku O_{2ref} = 10% .. 69
Tab. č. 5.3 Výsledky měření dávkování paliva při jmenovitém výkonu, tedy nastavení podavače na 65 % 71
Tab. č. 5.4 Výsledky měření dávkování paliva při sníženém výkonu, tedy nastavení podavače na 20 % 71
Tab. č. 5.5 Chemické složení testovaných pelet 72
Tab. č. 5.6 Hodnoty pro výpočet opravných součinitelů 86

10. Seznam grafů

Graf č. 2.1 Poměry složek v palivu [43] ... 12
Graf č. 2.2 Porovnání provozních nákladů při vytápění různými palivy [6] ... 19
Graf č. 2.3 Základní bilance dřevních pelet (tis. tun) v ČR [8;23,31] ... 21
Graf č. 2.4 Základní bilance rostlinných pelet (tis. tun) v ČR [23] ... 22
Graf č. 2.5 Vývoj celosvětové produkce pelet [30] ... 22
Graf č. 4.1 Minimální požadované účinnosti kotlů dle ČSN EN 303-5:2013 [26] ... 46
Graf č. 5.1 Průběh teplot topné vody, tepot spalin a výkonu při měření jmenovitého výkonu ... 65
Graf č. 5.2 Průběh emisí CO, NO_x, TOC, O_2 a TZL při měření jmenovitého výkonu ... 67
Graf č. 5.3 Průběh teplot topné vody, tepot spalin a výkonu při měření sníženého výkonu ... 68
Graf č. 5.4 Průběh emisí CO, NO_x, TOC, O_2 a TZL při měření sníženého výkonu 70
Graf č. 5.5 Chemické složení testovaných pelet ... 72

11. Seznam značek

Označení	**Jednotka**	**Popis**
A	-	hmotnostní podíl popeloviny v palivu
B	$kg \cdot s^{-1}$; $kg \cdot hod^{-1}$	hmotnostní průtok paliva
C_3H_{8ppm}	ppm	koncentrace C_3H_8 v ppm při naměřeném obsahu kyslíku
CO	%	koncentrace oxidu uhelnatého ve spalinách
$CO_{2;\%}$	%	koncentrace CO_2 při naměřeném obsahu kyslíku
$CO_{2;g/m3N}$	$g/m^3{}_N$	koncentrace CO_2 při naměřeném obsahu kyslíku
$CO_{2;g/m3N;O2=00\%}$	$g/m^3{}_N$	koncentrace CO_2 při nulovém obsahu kyslíku
$CO_{2;g/m3N;O2ref=10\%}$	$g/m^3{}_N$	koncentrace CO_2 při referenčním obsahu kyslíku
$CO_{mg/m3N}$	$mg/m^3{}_N$	koncentrace CO při naměřeném obsahu kyslíku
$CO_{mg/m3N;O2=0\%}$	$mg/m^3{}_N$	koncentrace CO při nulovém obsahu kyslíku
$CO_{mg/m3N;O2ref=10\%}$	$mg/m^3{}_N$	koncentrace CO při referenčním obsahu kyslíku
CO_{ppm}	ppm	koncentrace CO při naměřeném obsahu kyslíku
$C_{pm;Atr}$	$J \cdot (m^3 \cdot K)^{-1}$	stření měrná tepelná kapacita spalin v rozmezí t_L až t_A
C^r	%	hmotnostní obsah uhlíku v palivu
c_{vody}	$kJ \cdot (kg \cdot K)^{-1}$	měrná tepelná kapacita vody při střední teplotě
h	-	hmotnostní podíl hořlaviny v palivu
H^r	%	hmotnostní obsah vodíku v palivu
Hu	$J \cdot kg^{-1}$	výhřevnost paliva
M_C	$kg \cdot mol^{-1}$	molární hmotnost uhlíku
M_{CO}	$kg \cdot mol^{-1}$	molární hmotnost oxidu uhelnatého
M_N	$kg \cdot mol^{-1}$	molární hmotnost dusíku
M_O	$kg \cdot mol^{-1}$	molární hmotnost kyslíku
M_S	$kg \cdot mol^{-1}$	molární hmotnost síry
m_{vody}	$kg \cdot h^{-1}$	hmotnostní průtok otopné vody
n	-	skutečný přebytek vzduchu
$NO_{x;mg/m3N}$	$mg/m^3{}_N$	koncentrace NO_x při naměřeném obsahu kyslíku
$NO_{x;mg/m3N;O2=0\%}$	$mg/m^3{}_N$	Koncentrace NO_x při nulovém obsahu kyslíku
$NO_{x;mg/m3N;O2ref=10\%}$	$mg/m^3{}_N$	Koncentrace NO_x při referenčním obsahu kyslíku

$NO_{x;ppm}$	ppm	koncentrace Nox při naměřeném obsahu kyslíku
Nr	%	hmotnostní obsah dusíku v palivu
$O_{2;naměřené}$	%	koncentrace kyslíku ve spalinách zjištěná měřením
$O_{2;spalin}$	%	podíl kyslíku skutečně naměřeného ve spalinách
O^r	%	hmotnostní obsah kyslíku v palivu
P_{jm}	kW	jmenovitý výkon
PS	m^3	prostor skladu
PT	kW	potřeba tepla
Q	kW	výkon
q_A	-	poměrná ztráta citelným teplem spalin
Q_B	kW	příkon
Q_{kotle}	kW	tepelný výkon kotle
q_S	-	poměrná ztráta sdílením tepla do okolí
q_U	-	poměrná ztráta plynným nedopalem
Q_x	W	sdílený tepelný rok z jednotlivých dílčích částí povrchu
$SO_{2mg/m3N}$	mg/m^3_N	koncentrace SO_2 při naměřeném obsahu kyslíku
$SO_{2mg/m3N;O2=0\%}$	mg/m^3_N	koncentrace SO_2 při nulovém obsahu kyslíku
$SO_{2mg/m3N;O2ref=10\%}$	mg/m^3_N	koncentrace SO_2 při referenčním obsahu kyslíku
SO_{2ppm}	ppm	koncentrace SO_2 při naměřeném obsahu kyslíku
S^r	%	hmotnostní obsah síry v palivu
t_A	°C	teplota spalin
t_L	°C	teplota okolního prostředí
t_L	°C	teplota okolního prostředí
t_m	°C	průměrná povrchová teplota dílčí části povrchu
$TOC_{mg/m3N}$	mg/m^3_N	koncentrace TOC při naměřeném obsahu kyslíku
$TOC_{mg/m3N;O2=0\%}$	mg/m^3_N	koncentrace TOC při nulovém obsahu kyslíku
$TOC_{mg/m3N;O2ref=10\%}$	mg/m^3_N	koncentrace TOC při referenčním obsahu kyslíku
$t_{stř}$	° C	střední teplota topné vody
V_{atr}	$m^3_{N;sp}\cdot kgpal^{-1}$	skutečný objem spalin při spálení 1 kg paliva
V_{CO}	$m^3_{N;CO}\cdot kgpal^{-1}$	objemové zastoupení CO ve spalinách

V_{CO2}	$m^3{}_{N;CO2}\cdot kgpal^{-1}$	objemové zastoupení CO2 ve spalinách
V_{H2O}	$m^3{}_{N;H2O}\cdot kgpal^{-1}$	množství vody ve spalinách po spálení 1 kg paliva
$V_{molarni}$	$m^3.mol^{-1}$	molární objem
$V_{O2;t}$	$m^3{}_{N;O2}\cdot kgpal^{-1}$	teoretický objem kyslíku potřebného pro spálení 1 kg paliva
$V^s{}_{sp}$	$m^3{}_{N;sp}\cdot kgpal^{-1}$	skutečný objem suchých spalin po spálení 1 kg paliva
$V^s{}_{sp;t}$	$m^3{}_{N;sp}\cdot kgpal^{-1}$	teoretický objem suchých spalin po spálení kg paliva
$V^s{}_{vzd;t}$	$m^3{}_{N;vzd}\cdot kgpal^{-1}$	objem teoretického suchého vzduchu potřebného pro stechiometrické spálení 1 kg paliva
$V^v{}_{sp}$	$m^3{}_{N;sp}\cdot kgpal^{-1}$	skutečný objem vlhkých spalin po spálení 1 kg paliva
$V^v{}_{sp;\ H20}$	%	teoretické hmotnostní procentuální zastoupení vodní páry ve spalinách
$V^v{}_{sp;t}$	$m^3{}_{N;sp}\cdot kgpal^{-1}$	teoretický objem vlhkých spalin po spálení 1 kg paliva
$V^v{}_{vzd;t}$	$m^3{}_{N;vzd}\cdot kgpal^{-1}$	objem teoretického vlhkého vzduchu potřebného pro stechiometrické spálení 1 kg paliva
W	-	hmotnostní podíl vody v palivu
α	$W\cdot(m^2\cdot K)^{-1}$	součinitel přestupu tepla
η_k	-	účinnost stanovená přímou metodou
$\eta_{k;n}$	-	účinnost stanovená nepřímou metodou
$\eta_{k;Pjm}$	-	účinnost stanovená přímou metodou dle spalného tepla pro jmenovitý výkon
$\eta_{k;Psn}$	-	účinnost stanovená přímou metodou dle spalného tepla pro snížený výkon
η_s	-	sezonní účinnost
$\rho_{vstupní}$	kg/m^3	hustota vstupní otopné vody
υ	-	poměrné zvětšení objemu vlhkého vzduchu oproti suchému vzduchu

12. Seznam příloh

1. VEC_NH_000 – sestavný výkres hořáku
2. VEC_NH_005 – sestavný výkres roštu
3. VEC_NH_101 – výrobní výkres základny roštu
4. VEC_NH_102 – výrobní výkres pravé šikminy roštu
5. VEC_NH_103 – výrobní výkres levé šikminy roštu
6. VEC_NH_104 – výrobní výkres bočnice roštu
7. VEC_NH_105 – výrobní výkres zarážky roštu