



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

ZPLYŇOVACÍ KOTLE

GASIFICATION BOILERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Adam Votoupal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

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

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

Zplyňovací kotle

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zpřísnující se požadavky naší legislativy na emise energetických zdrojů nutí výrobce kotlů hledat stále nová vylepšení jejich produktů. Zplyňovací kotle jsou zařízení pro spalování biomasy, které mají největší budoucí potenciál pro spalování tuhých paliv.

Hlavní náplní práce je zmapování dostupných zplyňovacích kotlů. Hlavní důraz bude kladen na technický popis jednotlivých kotlů a porovnání jednotlivých konstrukčních rozdílů. Součástí práce bude měření na zplyňovacím kotli.

Cíle bakalářské práce:

Popis principu zplyňovacích kotlů.

Inovace zplyňovacích kotlů, nízkoemisní spalování.

Měření a vyhodnocení účinnosti a emisí zplyňovacího kotle na dřevo.

Seznam literatury:

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

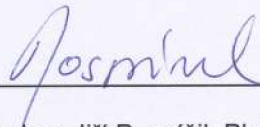
VEJVODA, Josef, Pavel MACHAČ a Petr BURYAN. Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2003. ISBN 80-708-0517-X.

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

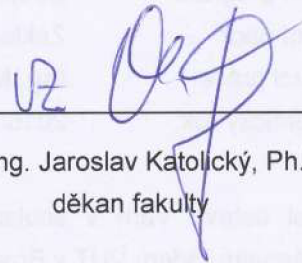
Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 16. 10. 2016





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



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

Abstrakt

Tato práce se zabývá principem provozu zplyňovacích kotlů malých výkonů (do 500 kW) s ruční dodávkou paliva. První část práce je rešeršního charakteru a obsahuje základní rozdělení kotlů podle použitého paliva a základního principu činnosti. Podrobněji jsou v ní popsány zplyňovací kotle. Druhá část práce zahrnuje popis provedeného měření emisní náročnosti na zvoleném zkušebním kotli (Damat Pyro 20 G) s následným vyhodnocením výsledků. Měření proběhlo dle normy ČSN EN 303-5, podle které byl kotel zařazen do emisní třídy.

Klíčová slova

kotel, palivo, emise, účinnost, výkon, zplyňování

Abstract

This bachelor thesis deals with the principle of the operation of gasification boilers which have small capacity (up to 500 kW) and which have manual fuel supply. The first part of the thesis consists of the literature review and describes the basic distribution of the boilers according to the type of fuel used and according to the basic principle of their operation. The gasification boilers are described in more detail in this part of the bachelor thesis. The second part of the thesis includes a description of the emission measurements which were performed on a selected test boiler (Damat Pyro 20 G) and the evaluation of the results of these measurements. The measurements were conducted in accordance with the ČSN EN 303-5 according to which the boiler was included into the particular emission class.

Keywords

boiler, fuel, emission, efficiency, power, gasification

Bibliografická citace

VOTOUPAL, A. *Zplyňovací kotle*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 49 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Marek Baláš, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Zplyňovací kotle“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení §11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

FSI VUT Brno

.....
(podpis autora)

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Marku Balášovi, Ph.D za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

FSI VUT Brno

.....

.....

(podpis autora)

Obsah

ÚVOD	15
1 ZÁKLADNÍ DRUHY TERMOCHEMICKÉHO ROZKLADU PALIVA	16
1.1 PŘÍMÉ SPALOVÁNÍ.....	16
1.2 PYROLÝZA.....	16
1.3 ZPLYŇOVÁNÍ.....	17
2 ROZDĚLENÍ KOTLŮ NA TUHÁ PALIVA PODLE POUŽITÉ TECHNOLOGIE A ZPŮSOBU PŘÍVODU PALIVA	18
2.1 PROHOŘÍVACÍ KOTLE.....	19
2.2 ODHOŘÍVACÍ KOTLE.....	20
2.3 ZPLYŇOVACÍ KOTLE.....	21
2.3.1 <i>Princip zplyňovacího kotle</i>	21
2.3.2 <i>Výhody zplyňovacího kotle</i>	22
2.4 POROVNÁNÍ TECHNOLOGIÍ.....	23
2.4.1 <i>Konstrukce kotlů</i>	23
2.4.2 <i>Emise kotlů</i>	23
2.4.3 <i>Účinnosti kotlů</i>	24
2.4.4 <i>Pořizovací ceny kotlů</i>	24
3 DRUHY ZPLYŇOVACÍCH KOTLŮ	25
3.1 ZPLYŇOVACÍ KOTEL NA DŘEVO.....	25
3.1.1 <i>Konstrukce zplyňovacího kotle na dřevo</i>	25
3.1.2 <i>Popis zplyňovacího kotle na dřevo</i>	25
3.2 ZPLYŇOVACÍ KOTEL NA UHLÍ.....	26
3.2.1 <i>Konstrukce zplyňovacího kotle na uhlí</i>	26
3.2.2 <i>Popis zplyňovacího kotle na uhlí</i>	27
3.4 ZPLYŇOVACÍ KOTEL NA VÍCE DRUHŮ PALIVA.....	28
3.4.1 <i>Konstrukce zplyňovacích kotlů na více druhů paliva</i>	28
3.4.2 <i>Popis zplyňovacího kotle na více druhů paliva</i>	28
4 OBSLUHA A ČIŠTĚNÍ ZPLYŇOVACÍCH KOTLŮ	29
5 INOVACE ZPLYŇOVACÍCH KOTLŮ A NÍZKO EMISNÍ SPALOVÁNÍ	30
6 STANOVENÍ EMISÍ TŘÍDY ZPLYŇOVACÍHO KOTLE NA DŘEVO	31
6.1 ZKOUŠKY PRO URČENÍ EMISNÍ TŘÍDY PODLE NORMY ČSN EN 303-5.....	31
6.1.1 <i>Zkušební palivo</i>	32
6.1.2 <i>Stanovení hodnot emisí</i>	32
6.1.3 <i>Výpočet emisí při jmenovitém tepelném výkonu a při minimálním trvalém tepelném výkonu</i>	32
6.2 VLASTNÍ ZKOUŠKA PRO URČENÍ EMISNÍ TŘÍDY KOTLE DAMAT PYRO 20 G.....	33
6.2.1 <i>Palivo použité při zkoušce</i>	33
6.2.2 <i>Měřicí vybavení</i>	33
6.2.3 <i>Měření plynných emisí</i>	35
6.2.4 <i>Měření tuhých emisí</i>	35
6.3 VÝSLEDKY ZKOUŠKY PLYNNÝCH EMISÍ.....	36
6.3.1 <i>Výsledky plynných emisí při jmenovitém tepelném výkonu kotle</i>	37
6.3.2 <i>Výsledky plynných emisí při minimálním tepelném výkonu kotle</i>	38
6.4 VÝSLEDKY ZKOUŠKY TUHÝCH EMISÍ.....	39
6.5 VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY PODLE NORMY ČSN EN 303-5.....	40

7 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ ZKOUŠKY S NAŘÍZENÍM KOMISE (EU) 2015/1189 - SMĚRNICÍ O EKODESIGNU KOTLŮ NA TUHÁ PALIVA	41
7.1 VÝPOČET ÚČINNOSTI KOTLE A OXIDU DUSÍKU PŘI ZKOUŠCE.....	42
7.1.1 Výpočet účinnosti kotle.....	42
7.1.2 Výpočet hodnot oxidu dusíku.....	42
7.2 VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY PODLE SMĚRNICE O EKODESIGN	44
ZÁVĚR.....	45
POUŽITÁ LITERATURA.....	46
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	49
SEZNAM OBRÁZKŮ	49
SEZNAM TABULEK	49
SEZNAM GRAFŮ	49

Úvod

Se zvyšujícím se tlakem na minimalizaci emisí znečišťujících látek se v běžném životě začínáme častěji setkávat s problémy, které souvisejí s výměnou kotlů v rodinných domech, jež jsou použity k vytápění. Jde především o kotle malých výkonů (do 500 kW) na tuhá paliva s ruční dodávkou paliva.

Problém byl zapříčiněn zpřísnujícími se požadavky na ekologický provoz těchto spalovacích zařízení, který roku 2022 přinutí mnohé majitele k výměně jejich dosavadně používaných kotlů. Požadavky, které kotle budou muset splňovat, jsou sepsány v normě ČSN EN 303-5 a ve směrnici o Ekodesignu 2009/125/ES.

Podle těchto norem se dají spalovací zařízení řadit do tak zvaných „emisních tříd kotle“. Emisní třídy kotle jsou rozděleny podle mezních hodnot emisí, které jsou naměřeny při zkoušce kotle v akreditované zkušebně. Každý výrobce musí nechat několik kotlů daného typu před uvedením na trh podrobit takové zkoušce za účelem získání certifikátu, který stanoví emisní třídu kotle. Bez tohoto certifikátu nesmí žádný výrobce spalovacích zařízení kotel prodávat.

Tato nařízení vedla výrobce ke zdokonalování jejich spalovacích zařízení jak z hlediska množství škodlivých emisí, tak i zvyšování účinnosti kotlů. Dobrých výsledků se podařilo výrobcům docílit právě u zplyňovacích kotlů, kterými se bude tato práce zabývat.

Cílem práce bude popsat principy zplyňovacích kotlů, uvést možnosti jejich inovací a provést měření na zplyňovacím kotli na dřevo za účelem stanovení jeho účinnosti a vyhodnocení jeho emisní náročnosti. Na základně naměřených emisí bude kotel zařazen do odpovídající emisní třídy dle normy ČSN EN 303-5.

1 Základní druhy termochemického rozkladu paliva

V dnešní době je mnoho způsobů, jak lze vytápět malé objekty budov například rodinné domy. Liší se v použitém druhu kotle, paliva a především způsobu termochemického rozpadu tohoto paliva v kotlích.

V této kapitole budou vysvětleny tři základní principy termochemického rozkladu paliva a to:

- Přímé spalování
- Pyrolýza
- Zplyňování

1.1 Přímé spalování

Při přímém spalování tuhých paliv dodáváme palivu neomezený přísun kyslíčivadla. Jde o fyzikálně chemický děj, při kterém se uvolňuje teplo. Ke spalování dochází při chemické reakci (nazývané hoření), mezi palivem a kyslíčovadlem. Produktem spalování jsou plynné spaliny, které obsahují jemné tuhé částice (popílek) a tuhý zbytek po spalování (popel). Jako palivo je brána taková látka, která je hořlavá a má dostatečnou výhřevnost. Kyslíčovadlo je látka, jež obsahuje kyslík a nejčastěji se jedná o okolní vzduch v místě zátoku.

Při přímém spalování dochází k oxidaci uhlíku na oxid uhličitý; obdobně se tak děje i u vodíku, resp. síry, který se oxiduje na vodní páru, resp. oxid siřičitý. [1]

1.2 Pyrolýza

Pyrolýza je založena na termickém rozkladu organických materiálů při zvýšené teplotě bez přístupu vzduchu, neboli oxidačních médií (O_2 , CO_2 , vodní pára). Podle teploty při které pyrolýza probíhá, ji lze rozdělit do kategorií:

- Nízkoteplotní (do 500 °C),
- Středně teplotní (od 500 °C do 800 °C)
- Vysokoteplotní (od 800 °C a výše)

Při pyrolýze vznikají čtyři základní produkty. Jedná se o pyrolýzní tuhý zbytek-uhlí, pyrolýzní plyn, organický kapalný produkt a pyrolýzní vodu. Organický kapalný produkt bývá označován jako pyrolýzní olej nebo bio olej. Běžně se využívá jako palivo pro výrobu tepelné a elektrické energie nebo také jako surovina pro chemický průmysl. Tento olej lze snadno skladovat i přepravovat, jeho energetická hustota je 4–5 x vyšší než u vstupní suroviny. Pyrolýzní voda je z velké části tvořena z vlhkosti, která vzniká z rozkládaného organického materiálu při pyrolýze. [2,3,4]

1.3 Zplyňování

Zplyňování je termochemická přeměna, kterou lze označit za proces konverze tuhých paliv na uhlíkovém základě; příkladem je přeměna dřevní štěpky do hořlavého výhřevného energetického plynu známého pod názvem „syngas“. Zplyňování probíhá v uzavřeném prostoru kotle za omezeného přístupu vzduchu v teplotním rozsahu 700 až 1200 °C. [5,6]

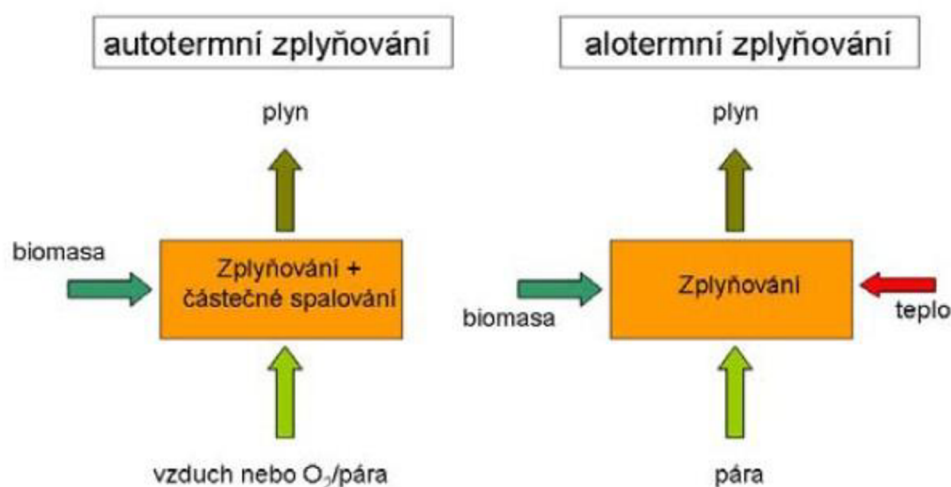
Produktem zplyňování je výhřevný energetický plyn, který lze dále energeticky zpracovat. Výhřevný energetický plyn obsahuje:

- výhřevné složky (H_2 , CO , CH_4)
- doprovodné složky (CO_2 , H_2O , N_2)
- znečišťující složky (dehet, prach, sloučeniny síry, chloru, alkálie a další)

Proces zplyňování je rozsáhlý, je složen z celé řady reakcí a je řízen čtyřmi základními pochody:

1. Sušení
2. Pyrolýza
3. Redukce
4. Hoření

Pro uskutečnění prvních tří procesů je nutné dodávat teplo – jedná se tedy o takzvané endotermní procesy (spotřebovávají teplo). Podle způsobu přivedení tepla do procesu, lze zplyňování rozdělit na autotermní a alotermní zplyňování. Autotermní zplyňování, též nazývané jako přímé zplyňování, pokryje tepelnou spotřebu pro první tři pochody částečným spálením paliva a není potřeba přivádět další teplo z jiného okolního zdroje. Alotermní zplyňování, též nazývané jako nepřímé zplyňování, přivádí do procesu teplo z okolního externího zdroje. Na následujícím obrázku 1 lze vidět schematicky znázorněné oba způsoby zplyňování. [5,6,7]



Obrázek 1 Autotermní a alotermní zplyňování [5]

2 Rozdělení kotlů na tuhá paliva podle použité technologie a způsobu přívodu paliva

V dnešní době je možné si pro vytápění rodinného domu zvolit z různých druhů kotlů. Lze si vybrat buď přímotopné spalovací zařízení, nebo centrální spalovací zařízení. Přímotopná spalovací zařízení neboli lokální topeniště slouží především k vytápění místnosti, ve které jsou umístěna. Zařízení pro tento druh vytápění se nazývají krby nebo kamna. Centrální zařízení jsou umístěna mimo vytápěné místnosti a teplo se předává pracovní látkou (nejčastěji vodě), jež je rozváděna po místnostech. Tyto kotle či krby vždy pracují na určitém druhu technologie, při které se získává teplo za určitého termochemického rozkladu paliva. Nejčastější technologie využívané ve spalovacích kotlích nebo krbech na tuhá paliva pro vytápění malých objektů či domácnosti jsou:

- Prohořivací
- Odhořivací
- Zplyňovací

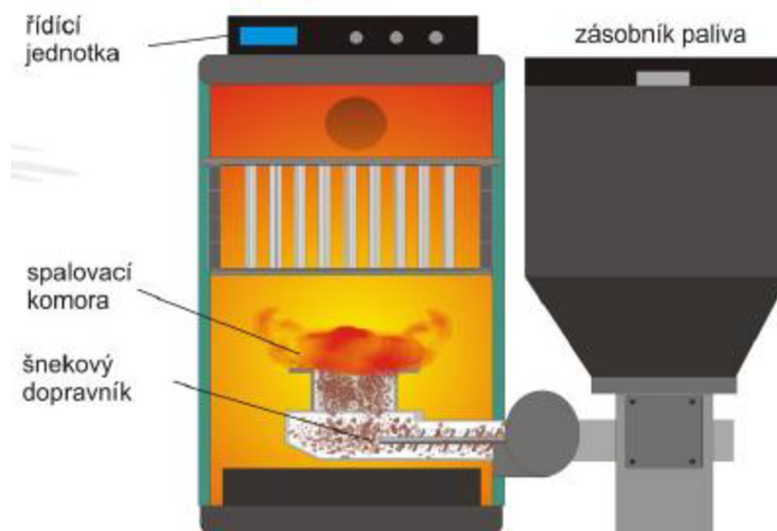
Kotle na tuhá paliva se dají rozdělit z hlediska způsobu přikládání paliva na dva typy:

- Kotle s ruční dodávkou paliva
- Kotle se samočinnou (automatickou) dodávkou paliva

Kotle s ruční dodávkou paliva jsou zatím nejrozšířenější z hlediska řešení dopravy paliva do kotle. Přívod paliva je zajištěn příkládacími dvířky, která jsou z pravidla ve vrchní části kotle (příkládání shora), nebo na čelní straně ve vrchní části kotle. Čelní příkládací dvířka jsou pohodlnější z důvodu méně náročného příkládání (nemusíme příkládané palivo zvedat příliš vysoko). Zásobníky paliva těchto kotlů se snaží být co nejobjemnější, aby se dalo přiložit co nejvíce paliva najednou a tím se prodloužila perioda příkládání, na co možná nejdelší dobu.

Kotle se samočinnou dodávkou paliva jsou velice dobré a to z hlediska jak obsluhy, tak řízení hoření paliva. Dodávka paliva (pelety, dřevní štěpka, uhlí) je řešena pomocí dopravníku (nejčastěji šnekového), který palivo kontinuálně, nebo periodicky dopravuje ze zásobníku (spojený s kotlem nebo externí) do kotle. Kontinuální přívod paliva nám zajišťuje stabilitu spalovacího procesu, stabilitu požadovaného výkonu, vysokou účinnost spalování, nízkou produkci škodlivin a komfort pro uživatele. Důležitou součástí kotle je řídicí jednotka, která koordinuje provoz kotle a zajišťuje komunikaci kotle s uživatelem. [9, 19, 21]

Zásobník je mnohem větší než příkladací komory kotlů s ruční dodávkou paliva. Velký zásobník značně prodlužuje periodu, kdy uživatel musí zásobník doplnit. Perioda doplnění paliva se pohybuje v rozmezí dnů až týdnu. Automatická doprava paliva se dá využít pro všechny technologie používané u kotlů. Na obrázku 2 je zobrazeno schéma kotle se samočinnou dodávkou paliva [9]



Obrázek 2 Schéma kotle se samočinnou dopravou paliva [21]

V následujících kapitolách budou popsány jednotlivé technologie využívané u kotlů s ruční dodávkou paliva.

2.1 Prohořivací kotle

Jsou zkonstruovány ze dvou komor. Jedna se nachází ve spodní části kotle a slouží jako popelník, druhá je ve vrchní části kotle a plní funkci zásobníku paliva (příkladací komora). Tyto komory jsou odděleny roštem. Ve vrchní stěně příkladací komory je otvor pro odvod spalin do komína. Přisun spalovacího vzduchu je přirozený a závisí pouze na tahu komína. U prohořivacího kotle je primární vzduch, který podporuje hoření, veden od spodu, kde je nasáván přes manuální klapku (umožňuje regulaci) umístěnou ve dvířkách popelníku. Primární vzduch prochází přes celou dávku paliva, a tak dochází k hoření veškerého paliva ve stejnou chvíli. Sekundární vzduch je někdy přiváděn vrchními dvířky nad dávku paliva, kde probíhá druhé spalování. Palivo se přikládá vrchními dvířky a popel je vybírán pomocí spodních dvířek. Nevýhodou prohořivacích kotlů jsou vysoké emise, které jsou důsledkem nízké rychlosti spalování a odvodu nespálených uhlovodíků a CO do komína. V těchto kotlích je možné jako palivo použít uhlí, dřevo nebo dřevěné brikety.

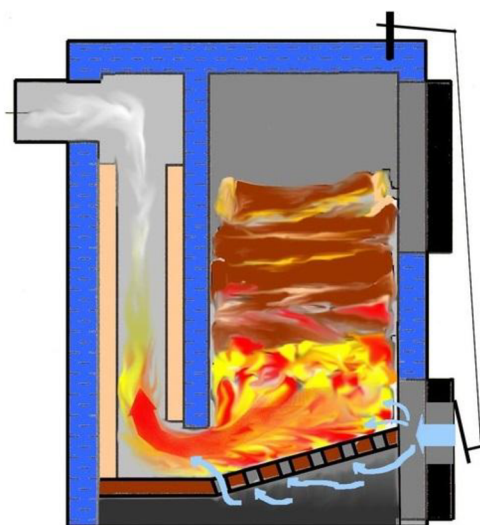
Výkon těchto kotlů je dán především množstvím, kvalitou použitého paliva a velikostí komínového tahu, který ovlivňuje množství přísávaného spalovacího vzduchu. [9,19]



Obrázek 3 Schéma kotle využívající prohořivací technologii [19]

2.2 Odhořivací kotle

Odhořivací kotle mají podobnou konstrukci jako prohořivací kotle až na to, že spaliny jsou vedeny z topeniště spodem nebo do stran a palivo odhořívá ze zásobníku postupně po vrstvách. Nedochozí tedy k hoření veškerého paliva zásobníku v jednu chvíli. Postupným odhoříváním vrstev se palivo v zásobníku sesouvá níže a popel padá dolů přes rošt do popelníku. Spalovací vzduch je veden přes dvířka popelníku za pomoci přirozeného tahu komínu nebo odtahového ventilátoru, kterým jsou některé kotle vybaveny. Paliva vhodná pro tuto technologii kotle jsou uhlí, dřevo a dřevěné brikety. Odhořivací kotle produkují méně emisí v porovnání s prohořivacími kotli díky stabilnějšímu procesu spalování. [9, 21]



Obrázek 4 Schéma kotle využívající odhořivací technologii [19]

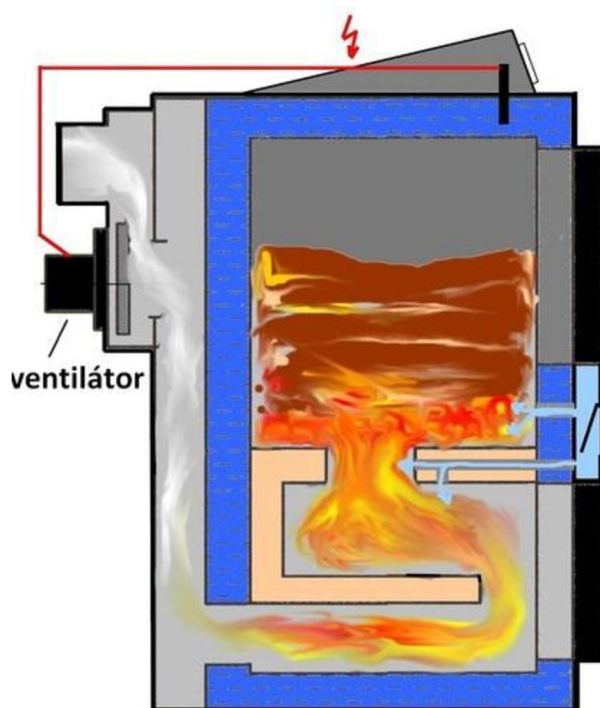
2.3 Zplyňovací kotle

Zpřísnující se požadavky naší legislativy na emise energetických zdrojů nutí výrobce kotlů hledat stále nová vylepšení jejich produktů. Zplyňovací kotle jsou zařízení pro spalování biomasy, které mají největší budoucí potenciál pro spalování tuhých paliv. Základní výhodou těchto kotlů je jejich vysoká účinnost a šetrnost k životnímu prostředí.

Někteří výrobci taktéž nabízejí zplyňovací kotle, které jsou schopny spalovat téměř všechna paliva na bázi biomasy, jako jsou například dřevěná polena, lisované pelety, dřevní štěpka, ale také i odpady vzniklé ze zemědělské produkce, jako jsou kukuřičné klasy, hnůj, lisovaná tráva a drůbeží trus. Variabilitnost možného použití paliv u některých druhů zplyňovacích kotlů je opravdu obrovská a je možná okamžitá záměna paliva i v provozu při nedostatku některého druhu, což je velkou výhodou těchto kotlů. Při pořízení kotle je potřeba počítat s tím, že je nutné mít volné místo poblíž kotle, které bude určeno pro uskladnění zásoby paliva. Tyto kotle tedy nejsou vhodné pro vytápění bytů v městské zástavbě, kde by nebylo možné zásobu paliva uskladnit. Zplyňovací kotle jsou vhodné pro ústřední vytápění rodinných domů, nebo menších budov, popřípadě k ohřevu užitkové vody. [8,9,11]

2.3.1 Princip zplyňovacího kotle

Zplyňovací kotle jsou konstruovány tak, aby v nich při hoření paliva vznikala pyrolytická reakce, při které se všechny spalitelné složky paliva zplyňují.



Obrázek 5 Schéma kotle využívající zplyňovací technologii [19]

Zplyňovací proces spočívá v tepelném rozkladu organických a anorganických látek, která probíhá v zásobníku kotle nad žárobetonovou nebo keramickou tryskou. Celý proces začíná ohřevem a vysoušením paliva, při kterém se uvolňuje plyn (primární hoření). Vzniklý plyn je veden k trysce (umístěná ve spodní části zásobníku), kde je smíchán s přehřátým sekundárním vzduchem a tím vytvoří hořící směs plynů ve spalovacím prostoru, který se nachází za tryskou (sekundární hoření). Ze spalovacího prostoru se vzniklé horké spaliny odvádějí zadní částí kotle přes trubkový výměník do komína. Tímto způsobem spalování můžeme dosáhnout účinnosti přesahující hranici 90 %, avšak účinnost kotle závisí na vlhkosti použitého paliva. Aby proces zplyňování probíhal co nejefektivněji, měla by se vlhkost paliva pohybovat mezi 15 až 20 %. [9,11]

Výkon kotle se dá plynule regulovat pomocí elektronického regulátoru (regulace množství přiváděného sekundárního vzduchu pomocí odtahového ventilátoru) podle jeho provozní teploty a potřebné teploty ve vytápěných místnostech. V příslušenství kotle nesmí chybět odtahový ventilátor, který nám umožňuje primární i sekundární hoření a zajišťuje lepší tah. Také zvyšuje komfort obsluhy kotle, např. při přikládání paliva, protože zamezí vniknutí kouře do místnosti, kde je kotel umístěn. [9,11]

2.3.2 Výhody zplyňovacího kotle

Zplyňovací kotel má několik výhod, a to především:

- Vysoká účinnost
- Ekologický provoz
- Velký zásobník paliva
- Chladicí smyčka proti přetopení
- Automatické vypnutí kotle po dohoření paliva

Díky dvoustupňovému spalování je dosaženo vysoké účinnosti kotle. V prvním stupni probíhá pyrolytický rozklad tuhého paliva na plyny, které se ve druhém stupni spalují. Plynné palivo se spaluje snadněji a efektivněji než tuhé, a tak vzniká méně znečišťujících látek a zvyšuje se účinnost kotle. Díky velkému zásobníku paliva a regulovanému spalování, které probíhá pomocí odtahového ventilátoru, kterým je řízen primární i sekundární spalovací vzduch se perioda přikládání prodlužuje. Také díky odtahovému ventilátoru, který vytváří v kotli podtlak, nedojde k zaprášení nebo zakouření kotelný při přikládání nebo vybírání popele. To zvyšuje komfort obsluhy. Kotel je vybaven řídicí jednotkou, kterou dokáže udržet výkon na nastavené hodnotě podle potřeby majitele. Pokud by však došlo k přehřátí vody v kotli, řídicí jednotka sama aktivuje chladicí smyčku, která do kotle přivede studenou vodu a voda v kotli se opět vrátí na provozní teplotu. Po dohoření paliva se kotel automaticky vypne (odtahový ventilátor). Jedinou nevýhodou zplyňovacího kotle je jeho vysoká pořizovací cena.

2.4 Porovnání technologií

Tato podkapitola bude rozdělena do čtyř částí, ve kterých budou porovnány výhody a nevýhody kotlů na tuhá paliva s ruční dodávkou paliva. Kotle jsou porovnány z hlediska:

- Konstrukce
- Emisí
- Účinnosti
- Pořizovací ceny

2.4.1 Konstrukce kotlů

Z hlediska konstrukce má nejjednodušší provedení prohořivací kotel. Ten se skládá ze dvou komor oddělených roštem. Spalovací vzduch pomocí přirozeného tahu komína proudí ze spodní části kotle vzhůru přes rošt, palivo až do komína.

Odhořivací kotel má konstrukci složitější než prohořivací. U něj je spalovací vzduch pomocí přirozeného tahu komína nebo odtahového ventilátoru veden z přední části kole z násypky přes palivo a rošt směrem dolů a následně je zadní částí kotle odváděn vzhůru přes výměník do komína.

Konstrukce zplyňovacího kotel je podobná jako u odhořivacího kotle. Nemá však rošt, který odděluje násypku se spalovacím prostorem (popelníkem). Rošt je u něj nahrazen keramickou tryskou, kterou je přiváděn sekundární vzduch zajišťující hoření plynné směsi. Proudění spalovacího vzduchu je stejné jako u odhořivacího kotle, ale není tvořeno přirozeným tahem komínu, ale odtahovým ventilátorem, kterým musí být kotel vybaven a dá se regulovat.

2.4.2 Emise kotlů

V minulosti byly po celé České republice nejvíce rozšířeny kotle využívající prohořivací technologie, a to díky jejich nízké pořizovací ceně a možnosti v nich spalovat téměř jakýkoliv druh paliva, a to bohužel i odpad. S postupem času se začaly sledovat emise vznikající při spalování tuhých paliv v malých kotlích při vytápění domácností, protože výrazně ovlivňují kvalitu ovzduší. Díky tomu se začaly rapidně zpříšňovat mezní hodnoty povolených emisí, které jsou dány normou ČSN EN 303-5. Norma nám rozděluje kotle do pěti emisních tříd, do kterých se řadí kotle podle jmenovitého výkonu a naměřených emisí při provozu. Kotle, které spadaly do 1. nebo 2. emisní třídy, byly vyřazeny z prodeje od roku 2014 a budou se moci provozovat pouze do roku 2022. Od roku 2022 budou muset všichni majitelé kotlů na tuhá paliva prokázat, že jejich kotel splňuje minimálně 3. emisní třídu. [22,23,26]

Zpřísnění mezních hodnot emisí vedlo výrobce k inovacím kotlů, kde se snažili o minimalizaci emisí znečišťujících látek a maximalizaci využití energie obsažené v palivu. [22,23,26]

V této době kotle využívající prohořivací technologii splňující minimálně 3. emisní třídu jsou pouze kotle s automatickým přikládáním paliva. Odhořivací kotle dosahují 3. a 4. emisní třídy. Nejlepších výsledků dosahují zplyňovací kotle, které splňují i 5. emisní třídu. [22,23,26]

2.4.3 Účinnosti kotlů

Účinnosti prohořivacích a odhořivacích kotlů se pohybují okolo 50-80 % z důvodu špatné regulace celého procesu spalování. U prohořivacích kotlů je velkou nevýhodou to, že pokud je přiložena velká dávka paliva, tak nelze prostorově oddělit zplyňování a hoření; z tohoto důvodu nám mnoho prchavých hořlavin odchází se spalinami do komína a kotel má nízkou účinnost a vysoké emise. U odhořivacích kotlů jsou spaliny a plamen vedeny spodem. To nám umožňuje rozdělit do oddělených komor zplyňování a následné spalování. Spalování je tak stabilnější a kotel dosahuje větší účinnosti a menších emisí, protože plyn se spaluje lépe než tuhé látky. Tohoto faktu využívá zplyňovací kotel, u kterého účinnost přesahuje 90 %. Je sestaven ze dvou komor, kde ve vrchní komoře dochází k termochemické přeměně tuhých paliv na uhlíkovém základě na hořlavý energetický plyn, který následně prochází přes trysku, kde je přiveden sekundárním vzduch a společně vytváří hořlavý plyn vstupující do spalovací komory. Výhodou těchto kotlů vzhledem k vysoké účinnosti je úspora paliva a provozních nákladů. Celý proces spalování je automaticky regulován (řídící jednotkou kotle regulující otáčky odtahového ventilátoru), tak jak si uživatel nastaví podle vlastních potřeb. Zplyňovací kotel tak dosahuje nejnižších emisí a největší účinnosti ze zmíněných tří technologií. [9,19,20]

2.4.4 Pořizovací ceny kotlů

Dříve se daly pořídit prohořivací kotle do 25 000 Kč, ale z důvodů vysokých emisí a podle normy ČSN EN 303-5 prohořivací kotle splňovaly pouze 2. emisní třídu, a tak od roku 2014 byl zakázán jejich prodej. Avšak vyšší emisní třídy lze dosáhnout u automatických kotlů používajících prohořivací technologii, které splňují emisní třídu 3. Avšak tyto kotle stojí okolo 65 000 Kč. Odhořivací kotle splňují vyšší emisní třídy a lze je pořídit za cenu pohybující se v rozmezí 25 000 až 30 000 Kč podle jmenovitého výkonu kotle. Zplyňovací kotle splňují 3. až 5. emisní třídu, a to se také odráží na jejich ceně, která se pohybuje od 50 000 do 100 000 Kč podle jmenovitého výkonu kotle. [24,25]

3 Druhy zplyňovacích kotlů

Každý zplyňovací kotel má základní konstrukci tělesa kotle stejnou, tedy v přední části kotle je složen ze dvou komor (plnicí a spalovací), které jsou pod sebou a k sobě spojeny tryskou nebo otočným roštem (to záleží na druhu paliva, pro který je kotel vyroben). Zadní část slouží k odvodu spalin do komína a výměně tepla mezi spalinami a vodou v topném okruhu nebo akumulací nádrži, kterou má kotel ohřívat.

Zplyňovací kotle se dělí zejména podle paliva, pro které jsou vyrobeny:

- Zplyňovací kotle na dřevo
- Zplyňovací kotle na uhlí
- Zplyňovací kotle na více druhů paliva

3.1 Zplyňovací kotel na dřevo

Kotle jsou založeny na principu autotermního zplyňování při vysoké teplotě, které bylo vysvětleno v kapitole 1.3. Tyto kotle mají mnohem větší násypku oproti kotlům na uhlí, a to z důvodu přikládání většího množství delších polen, a tak prodloužení periody přikládání.

3.1.1 Konstrukce zplyňovacího kotle na dřevo

Hlavní konstrukce kotle se nazývá „kotlové těleso“. Z hlediska konstrukce hlavní části zplyňovacích kotlů na dřevo jsou dva možné typy výroby.

První z nich je vyroben jako svarek z kvalitních ocelových plechů třídy 11 podle normy ČSN o tloušťce 3 až 8 mm a v některých částech kotle jako je plnicí (přikládací) komora, spalovací komora a čelo spalínového výměníku, je použita korozivzdorná ocel třídy 17 dle ČSN a to z důvodu nejsilněji namáhaných částí kotle vysokou teplotou, agresivními plyny, kyselinami a kondenzáty, které vznikají při spalování vlhčího dřeva. Použití nerezavějící oceli nám zvyšuje životnost kotle. [14,15]

Druhý je z článekové šedé litiny. To znamená, že jsou odlité jednotlivé části kotlového tělesa a následně jsou pomoci nalisovaných kotlových vsuvek a kotevních šroubů sestaveny do jednoho celku. [12,13]

Tělesa kotlů jsou obložena izolační vrstvou minerální vaty a překryta plechovým krytem. Dno kotle je izolováno vrstvou keramických cihel tloušťky 40 mm a vrstvou minerálních vláken. [15]

3.1.2 Popis zplyňovacího kotle na dřevo

Horní část kotle tvoří násypka, na kterou v její spodní části navazuje žáruvzdorná tvarovka (tryska) s podlouhlým otvorem, která umožňuje průchod plynů do spodní části kotle a zajišťuje ideální vyhoření všech spalitelných látek. Prostor za tryskou se nazývá spalovací prostor. Dno spalovacího prostoru je též popelníkem, který zachycuje nespalitelný odpad, který je do prostoru strháván přes otvor tvarovky s plynem vzniklým v násypce při primárním hoření. [13,15]

V zadní části je svislý trubkový výměník, přes který se spaliny ochlazují (předávají své teplo) a odchází do komína. Tento spalinový cyklus, který v kotli probíhá, je vyvolán odtahovým ventilátorem, který v kotli musí být, aby dostával spalovaný plyn z kotle (vytvářejel nucený tah) a přes tvarovku vtahoval do kotle sekundární vzduch, který podporuje hoření vzniklé směsi plynů (směs plynu vzniklého při primárním hoření + sekundární vzduch). Všechny kotle obsahují elektronickou regulaci výkonu, která řídí otáčky ventilátoru podle teploty výstupní vody z kotle nebo výstupní teploty spalin z kotle.[12,15]



Obrázek 6 Zplyňovací kotel na dřevo [14]

3.2 Zplyňovací kotel na uhlí

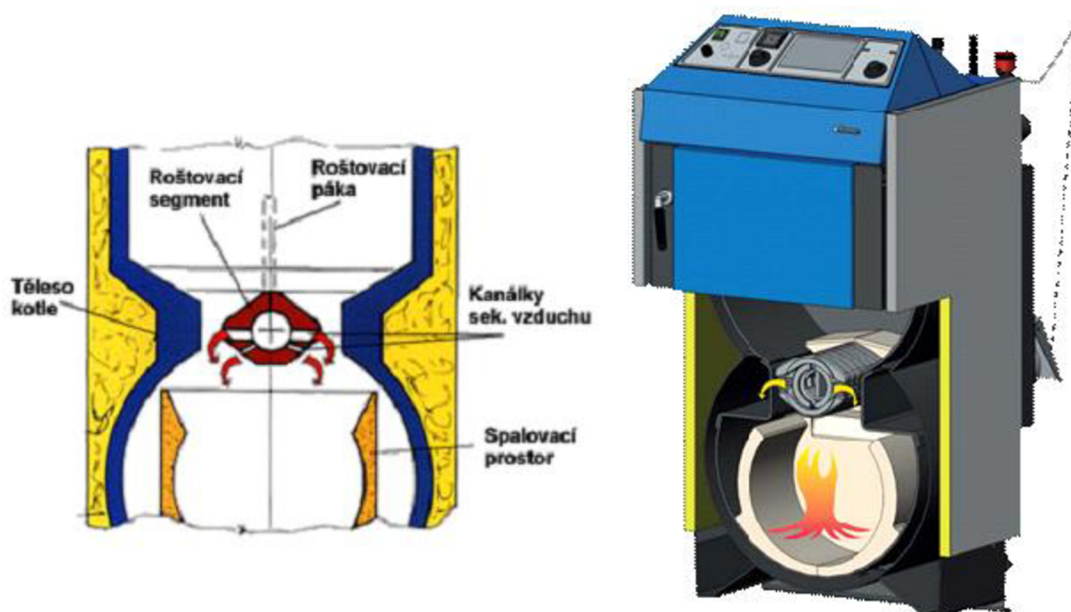
Zplyňování uhlí je jedním z nejlepších a nejčistších způsobů jak energii chemickou, vázanou v uhlí, převést na teplo. Při zplyňování uhlí se vytváří hořlavý plyn, který je složen z oxidu uhelnatého, vodíku, metanu, oxidu uhličitého a doprovodných plynů, jako jsou různé oxidy síry, dusíku a rtuti. Některé zplyňovací kotle na uhlí jsou konstruovány tak, že jako sekundární palivo v nich lze použít kusové dřevo. Většinou se ale doporučuje, aby se dřevo využívalo pouze při zátoku. [9]

3.2.1 Konstrukce zplyňovacího kotle na uhlí

Těleso kotle je stejně jako u kotlů na dřevo vyrobeno jako svarek z ocelových plechů o tloušťkách 3 až 6 mm, a nebo z článkové šedé litiny. Celé těleso kotle je obaleno zdravotně nezávadnou minerální izolací, která snižuje ztráty sáláním do okolí kotle. Kotel je navíc patřičně zakrytován ocelovým pláštěm.[16,17]

3.2.2 Popis zplyňovacího kotle na uhlí

Přední část kotle je tvořena ze dvou komor. Vrchní komora (násypka) je v jejím dně spojena se spodní částí (spalovací prostor) šikmým roštem nebo otočným roštem. Otočný rošt je lepší z důvodu snazšího odvodu nespalitelného odpadu do popelníku, který je součástí spalovacího prostoru. Také má v sobě vytvořené kanálky, kterými se přivádí do spalovacího prostoru sekundární vzduch. Spaliny pokračují ze spalovacího prostoru do zadní části kotle, kde je svislý výměník tepla. O ten se spaliny ochlazují, předávají teplo a odchází komínem ven z kotle. Kotel má opět svůj odtahový ventilátor, který plní funkci stejnou jako u zplyňovacího kotle na dřevo, a to funkci podpory primárního i sekundárního hoření, zvýšení komfortu obsluhy a také je řízen mikro počítačem, který tak automaticky reguluje výkon kotle podle potřeb. [16,17]



Obrázek 7 Zplyňovací kotel na uhlí [17]

3.4 Zplyňovací kotel na více druhů paliva

V mnoha případech výrobci nabízejí zplyňovací kotle, do kterých je možno přikládat více druhů paliva. Převážně to bývá kombinace dvou druhů paliv. To znamená, že palivo smícháme dohromady, nebo můžeme přikládat jednotlivé druhy paliva samostatně. Kombinace paliv mohou být různé. Nejčastěji se jedná o kombinaci dřevěných polen a dřevěných briket, dřevěných polen a dřevní štěpky, dřevěných polen a uhlí.

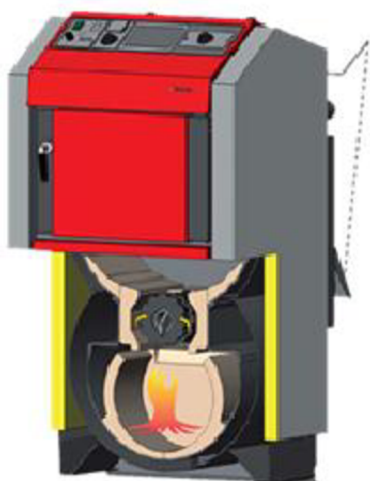
3.4.1 Konstrukce zplyňovacích kotlů na více druhů paliva

Konstrukce tělesa kotlů je totožná s předchozími vysvětlenými konstrukcemi.

3.4.2 Popis zplyňovacího kotle na více druhů paliva

Je složen ze dvou na sebe navazujících komor v jeho přední části. Velikost násypky se odvíjí od kombinace paliva, pro kterou je kotel určen. Pokud je v kombinaci obsaženo uhlí, bývá zpravidla příkladací prostor menší. Naopak pokud se jedná o polena, brikety či štěpku bývá násypka větší, aby se do ní vešlo více paliva. Toto je odvislé od faktu, že uhlí se nám zplyňuje pomaleji než jakékoli palivo na bázi dřeva. Aby byla perioda příkladání u všech typů zhruba stejná, kompenzuje se to právě velikostí příkladacího prostoru. Ve spodní části kotle je spalovací komora s popelníkem. Obě komory jsou spojeny přes otočný litinový rošt s přívodem sekundárního vzduchu, který nahrazuje keramickou trysku. [18]

Odvod spalin ze spalovacího prostoru je stejný jako u předchozích popsaných typů i s použitím odtahového ventilátoru.[18]



Pohled do horní příkladací komory

Obrázek 8 Zplyňovací kotel na dřevo a dřevěné brikety [18]

4 Obsluha a čištění zplyňovacích kotlů

Aby byl provoz kotle efektivní, kvalitní, bezproblémový a hlavně uživatelsky bezpečný je zapotřebí dbát pokynů daných výrobcem.

U kotle by se měl pravidelně každých 14 dnů v průběhu topné sezóny kontrolovat tlak vody v topném systému, aby nebyl nízký. Je-li tlak vody nízký, je potřeba vodu doplnit. Pokud je kotel v zimním období mimo provoz, doporučuje se z něj vodu vypustit, aby nedošlo k zamrznutí a poškození některých částí kotle nebo topného systému. [16, 18]

Před zátopem je potřeba vybrat popel z popelníku a dna plnicí komory. K zátopu v jakémkoli kotli se používá dřevěných třísek a pár polen k rozhoření a započetí autotermního zplyňování následně přiloženého paliva, pro který je kotel určen. Nesmí být použity žádné hořlavé látky. K rozdělání ohně nám při zátopu pomáhá odtahový ventilátor. [17,18]

Přikládání paliva není nikterak těžké, avšak je potřeba dodržet instrukce od výrobce. Před otevřením násypky je nutné vypnout regulátor a otevřít komínovou klapku, aby se nám zvýšil tah do komína a došlo k odsátí dřevoplynu z násypky, který ještě neprošel tryskou a nebyl spálen. Jinak by se nám při otevření příkládacích dvířek mohl plyn smístit s vniklým vzduchem z okolí a vznítit se. Po krátké časové prodlevě přibližně půl minuty otevřeme příkládací dvířka a naplníme násypku. Dvířka zavřeme, přivřeme klapku do komína a zapneme regulátor. [17,18]

Pokud dojde ke zplynění veškerého paliva v zásobníku, regulátor samostatně kotel odstaví. Perioda přikládání se liší s druhem paliva, pro který je kotel určen, avšak tato perioda se pohybuje okolo šesti až deseti hodin a je potřeba ji vyzorovat. [16,17]

Při čištění kotle se jedná zejména o vybírání popele ze spalovacího prostoru a místa pod trubkovým výměníkem. Při dohoření paliva a znovu zatopením je potřeba shrnout i popel z tělesa trysky v příkládacím prostoru, který nepropadl do spalovací komory. Při trvalém provozu v topné sezóně se popel vybírá po třech až sedmi dnech, kdy střední vrstva popele dosáhne výšky pět až sedm centimetrů. Perioda vybírání popele je závislá na způsobu provozu kotle a na druhu zplyňovaného paliva. Vybírá se spodními čistícími dvířky. Po skončení každé topné sezóny je dobré vyčistit i prostoty teplo směnných ploch v zadní části kotle. Toto čištění se provádí vymetacím talířem nebo kominickou štětkou. [16]

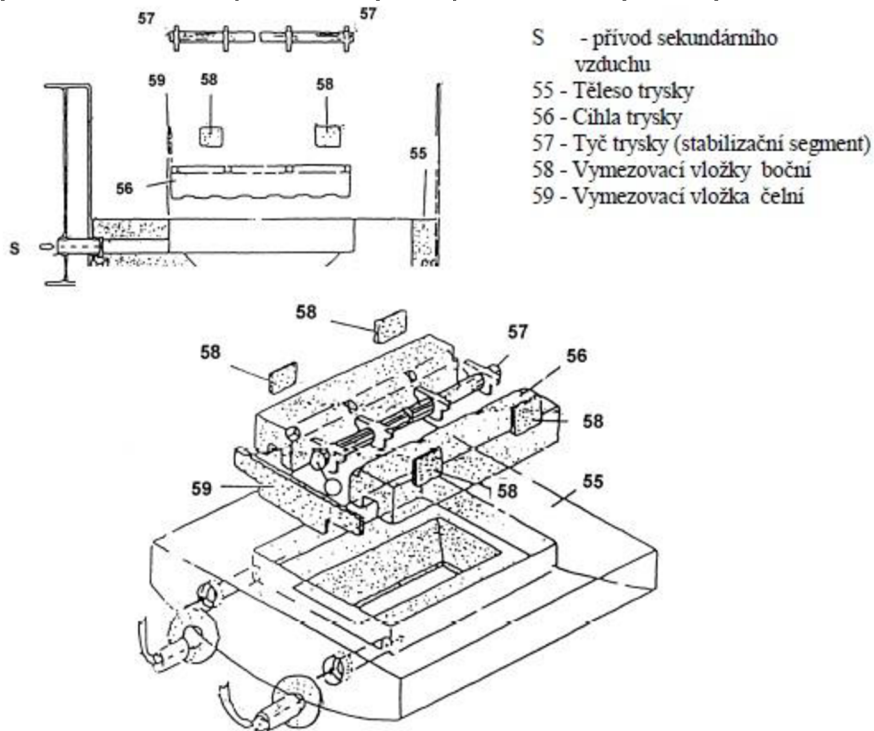
Za tímto účelem je však nutno sejmout vrchní kapotáže a po odstranění cca 2 matic sundat víko výměníku. [17]

Vymetacím talířem stržené nečistoty padají pod tepelný výměník. Tyto nečistoty se následně vyberou zadními dvířky. [18]

5 Inovace zplyňovacích kotlů a nízko emisní spalování

Jak už bylo zmíněno v kapitole 2.4.2, která se týkala povolených hodnot emisí kotlů využívající odlišné technologie spalování, došlo ke zpřísnění mezních hodnot emisí podle normy ČSN EN 303-5. Tato norma rozděluje kotle podle jmenovitých výkonů a produkovaných škodlivých látek do pěti emisních tříd. Tato zpřísnění vedla výrobce k inovacím kotlů, aby dosahovaly nejvyšších účinností a minimálních emisí škodlivých látek znečišťující ovzduší a byly řazeny do co nejvyšších emisních tříd stanovených normou. Nejlepších výsledků u malých spalovacích zařízení na tuhá paliva s ručním přikládáním výrobcí dosáhli u zplyňovacích kotlů. Inovací zplyňovacích kotlů bylo především automatické řízení pomocí řídicí jednotky kotle, kterou se regulují otáčky odtahového ventilátoru, a tak řídí množství přiváděného primárního a sekundárního vzduchu do kotle.

Nízko emisního spalování bylo u zplyňovacích kotlů dosaženo díky základnímu principu funkce kotle, který pracuje na dvoustupňovém spalování, kde v prvním stupni dochází k rozkladu tuhého paliva na hořlavý energetický plyn v zásobníku paliva (zplynění paliva) a ten je následně ve druhém stupni spálen ve spalovací komoře. Plyn se dostává do spalovací komory přes spalovací trysku, jejíž funkcí je přívod predehřátého sekundárního vzduchu, který s energetickým plynem vytvoří hořící směs plynů. Nízké emisní hodnoty jsou dosaženy proto, že se nespaluje přímo tuhé palivo, jak je tomu u ostatních technologií, ale až následně vytvořené plynné palivo. Plynné palivo se spaluje lépe a dokonaleji, pokud je vhodně promíseno se vzduchem (sekundárním predehřátým vzduchem přiváděným spalovací tryskou).



Obrázek 9 Popis spalovací trysky zplyňovacího kotle [27]

6 Stanovení emisí třídy zplyňovacího kotle na dřevo

Tato kapitola pojednává o postupu měření, které se zabývá ověřením emisní třídy zplyňovacího kotle Damat Pyro 20 G. Postup měření je dán pokyny vyplývajícími z normy ČSN EN 303-5.

Zařazení kotle do správné emisní třídy závisí na:

- jmenovitým tepelným výkonu kotle
- množství plyných emisí
- množství tuhých znečišťujících látek

Úkolem je tyto hodnoty naměřit a podle tabulky mezních hodnot emisí určit jakou emisní třídu kotel splňuje. Dle výrobce je kotel zařazen do třetí emisní třídy. Aby toto tvrzení bylo ověřeno, měly by být naměřené hodnoty emisí menší, než mezní hodnoty zvýrazněné v tabulce 2.

Tabulka 1 Tabulky mezních hodnot emisí z normy ČSN EN 303-5 [26]

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

6.1 Zkoušky pro určení emisní třídy podle normy ČSN EN 303-5

Emisní třídu kotle určíme na základě výsledků zkoušky. Ta musí být provedena v akreditované zkušebně tak, aby byl splněn její postup a podmínky uvedené v normě. Tuto zkoušku musí podstoupit několik kotlů daného typu před uvedením do prodeje a to za účelem získání certifikátu. Bez platného certifikátu výrobce nesmí kotle prodávat. Postupy i podmínky jsou pevně dané a musí být vždy dodrženy při zkoušení všech druhů kotlů na tuhá paliva. Jen tak se dá dosáhnout objektivního posouzení, z hlediska jejich emisní náročnosti.

Následující podkapitoly 7.1.1 až 7.1.3 jsou doslovným přepisem důležitých informací, které jsou převzaty z normy ČSN EN 303-5, podle které je zkouška provedena.

6.1.1 Zkušební palivo

Pro zkoušení kotlů pro ústřední vytápění se používá palivo obchodní jakosti, s vlastnostmi pro daný druh paliva stanovenými výrobcem. Pro účely zkoušky s dřevním palivem se může podle požadavků výrobce použít buď buk, bříza, dub, smrk, nebo habr.

6.1.2 Stanovení hodnot emisí

Aritmetický průměr koncentrací CO₂, nebo O₂, CO, OGC se stanovuje po celou dobu zkoušení. Při ruční dodávce paliva měření při jmenovitém tepelném výkonu zahrnuje dvě následné doby hoření. Úkon při doplňování paliva se zahrne do výsledků zkoušky a do průměrných hodnot.

Při minimálním tepelném výkonu se měření provádí po dobu jedné doby hoření. Každá doba hoření se rozdělí nejméně na dva stejné časové úseky. Měření pro stanovení koncentrace prachu začíná pokaždé na začátku časového úseku, přičemž první měření začíná bezprostředně po dodávce paliva a uzavření dvířek. Doba odsávání přes filtr musí být větší nebo rovna třiceti minutám. Průměrná koncentrace prachu se stanovuje nejméně ze čtyř naměřených hodnot.

6.1.3 Výpočet emisí při jmenovitém tepelném výkonu a při minimálním trvalém tepelném výkonu

Výpočet průměrných hodnot se provádí po celou dobu zkoušení pouze s ohledem na čas, nezávisle na průtoku spalin.

Zaznamenané emisní hodnoty objemových složek v suchých spalinách se použijí pro výpočet průměrné hodnoty po celou dobu zkoušení.

Tyto průměrné hodnoty objemových složek (ppm) se použijí pro výpočet hmotnostních hodnot (mg/m³). Pro převod z ppm na mg/m³ se mají použít dále uvedené hodnoty:

- $f_{CO} = 1,2$;
- $f_{OGC} = 1,64$ (je-li kalibračním plynem propan);
- $f_{OGC} = 0,54$ (je-li kalibračním plynem metan);
- $f_{NO_2} = 2,05$;

Koncentrace plynného, organicky vázaného uhlíku (OGC) se uvádějí jako uhlík. Zjištěné koncentrace oxidů dusíku (NO_x) se uvádí jako NO₂.

Všechny zjištěné emisní koncentrace se uvádějí jako hmotnostní koncentrace (mg/m³) přepočtené na suché spaliny při 10 % kyslíku a normálním stavu (mg/m³) při 0 °C a 1013 mbar.

6.2 Vlastní zkouška pro určení emisní třídy kotle Damat Pyro 20 G

Zkouška pro ověření emisní třídy kotle proběhla v laboratoři fakulty strojního inženýrství dne 10.2.2017 v budově D5, kde zkouška byla provedena pod odborným dohledem Ing. Otakara Štelcla. Zkouška emisí byla provedena dle pokynů normy ČSN EN 303-5 a byla složena ze dvou měření. První měření proběhlo při jmenovitém tepelném výkonu kotle (20 kW) a druhé při jeho minimálním tepelném výkonu, který je stanovený od výrobce (15 kW). V průběhu zkoušky bylo měřeno:

- Teplota vody v chladicí smyčce před a za kotlem
- Teplota spalin
- Hodnoty plyných emisí
- Hodnoty tuhých emisí (prachových částic)

Postup podle normy ČSN EN 303-5 nebyl zcela dodržen ve třech bodech:

1. Z důvodu obtížného nastavení regulačních klapek pro přívod primárního a sekundárního vzduchu do kotle se nepodařilo kotel udržet na jmenovitém tepelném výkonu. Jmenovitý tepelný výkon (20 kW) byl překročen o 6 až 8 kW. Naopak nastavení kotle na minimální tepelný výkon (15 kW) v druhé části měření již bylo úspěšné.
2. Norma udává minimální počet provedených měření pro zjištění hodnot tuhých emisí pomocí gravimetrické filtrační metody. A to na čtyři měření. Při naší zkoušce byly tuhé emise měřeny pouze dvakrát a to z důvodu obrovské časové náročnosti vzhledem k sušení filtru zachycujícího prachové částice ze spalin.
3. Měřicí přístroj, kterým se měří hodnoty uhlovodíků (OCG), byl mimo provoz, a tak se tento druh emisí neměřil.

6.2.1 Palivo použité při zkoušce

Při zkoušce bylo použito bukové dřevo o vlhkosti 7,6 %, které bylo naštipáno na přibližně stejná polena o rozměrech cca 15x15x25 cm. Vlhkost paliva byla určena jako průměr z naměřených hodnot na několika vzorcích dřeva pomocí měřicího přístroje od firmy Elbez. Vlhkost paliva odpovídala doporučené vlhkosti od výrobce.

6.2.2 Měřicí vybavení

Pro měření bylo zapotřebí sestavit chladicí smyčku tak, aby byl zajištěn odvod tepla z kotle. Chladicí smyčka byla realizována pomocí výměníku tepla, který lze vidět na obr. 10 v pravém horním rohu. Na kotel bylo připojeno několik měřicích přístrojů, které byly potřebné k zaznamenání požadovaných hodnot nutných k následnému vyhodnocení výsledků.

Při zkoušce byly použity tyto měřicí přístroje:

- Přístroj měřící plynné emise
- Přístroj měřící tuhé emise (gravimetrická filtrační metoda)
- Termočlánek v prostoru kouřovodu pro určení teploty spalin

Na obrázku 10. můžete vidět zapojení kotle a měřících přístrojů ve školní laboratoři.



Obrázek 10 Zapojení kotle a příslušenství

6.2.3 Měření plyných emisí

Na měření plyných emisí byly použity měřicí přístroje značky SIEMENS ULTRAMAT 21/O₂ a ULTRAMAT 22. Plyný vzorek přiváděný z kouřovodu musí být před vstupem do ULTRAMATU upraven, aby nedošlo ke kontaminaci tohoto měřicího přístroje. Z toho důvodu bylo ULTRAMATům předřazeno zařízení pro úpravu vzorku, které obsahovalo filtr, chlazení plyných vzorků, analyzační filtr a externí sací čerpadlo. ULTRAMATy a zařízení pro úpravu vzorku jsou na obr. 11.



Obrázek 11 ULTRAMAT (vlevo); Zařízení pro úpravu vzorku spaliny (vpravo);

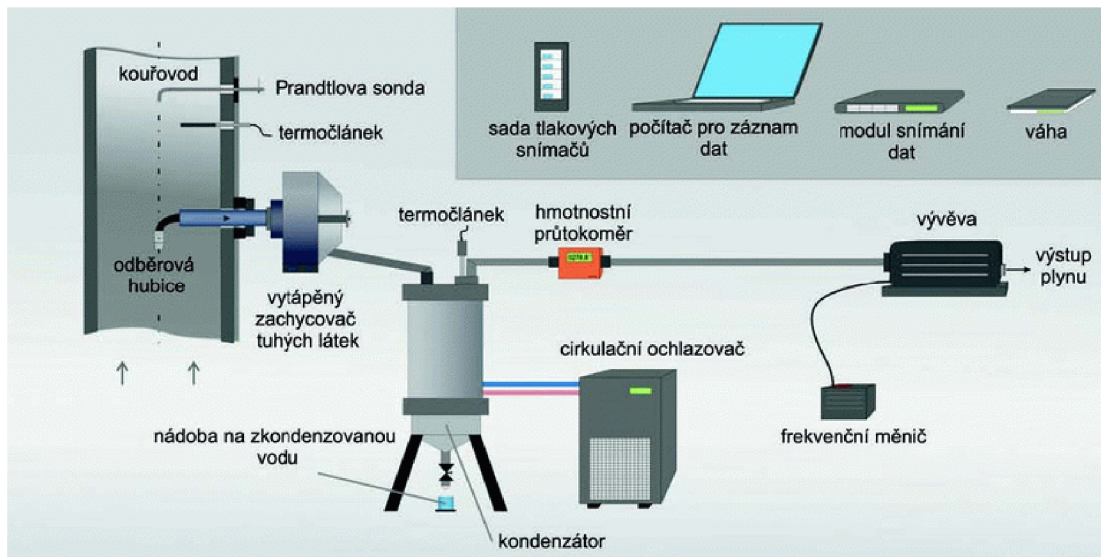
ULTRAMAT zaznamenával hodnoty oxidu uhelnatého (CO), oxidu dusnatého (NO) a oxidu siřičitého (SO₂). Emise jsou měřeny v jednotkách hmotnostního průtoku [mg/m³]. Hmotnostní průtoky jednotlivých emisí jsou v aktuálním čase zobrazovány na displeji ULTRAMATu. Dále jsou také tyto hodnoty emisí automaticky ukládány do mezi-paměti přístroje (každých 20 vteřin). Přístroj si každou minutu vypočítá průměrnou hodnotu ze tří hodnot uložených v mezi-paměti a tu zapíše do paměti počítače. Data lze potom vyexportovat v textovém formátu a následně využít pro další výpočty a analýzu.

6.2.4 Měření tuhých emisí

Měření tuhých (prachových) emisí bylo provedeno gravimetrickou filtrační metodou. Tato metoda se skládá z několika částí, které jsou podle schématu níže zapojeny takto za sebou:

- Odběrová hubice
- Filtr
- Kondenzátor
- Chladič
- Hmotnostní průtokoměr
- Vývěva

Sestavení přístrojů je zobrazeno pro lepší představu na obrázku 12.



Obrázek 12 Měřicí soustava pro gravimetrii [28]

Při této metodě měření se musí dodržet izokinetické podmínky, což znamená, že rychlost proudění spalin v kouřovodu musí být stejná jako rychlost vzorku spalin procházejících měřicí soustavou. Rychlost vzorku spalin se reguluje pomocí vývěvy.

Samotná podstata zkoušky spočívá v určení rozdílu hmotnosti odběrové hubice a filtru (před a po provedení zkoušky).

Před sestavením měřicího okruhu se zváží vysušený filtr a spojovací potrubí s odběrovou hubicí umístěnou v kouřovodu. Po zvážení se sestaví měřicí okruh a začne zkouška. Zkouška by měla trvat nejméně 30 minut, jak je uvedeno v normě. Po skončení se dají tyto části znovu vysušit a opět se zváží. Suší se nejméně hodinu při teplotě 160 °C. Z těchto dvou hmotností (před a po zkoušce) uděláme rozdíl. Rozdíl hmotností bereme jako hmotnost zachycených tuhých částic ze spalin. Mimo jiné se při této zkoušce zaznamenávaly i další hodnoty:

- Objemový průtok vzorku spalin procházející měřicí soustavou
- Koncentrace kyslíku ve spalinách
- Teplota spalin v komínu

6.3 Výsledky zkoušky plyných emisí

Hodnoty naměřené ULTRAMATEM byly zaznamenány do textového souboru seřazené chronologicky v reálném čase bez ohledu na to, zda zkouška zrovna probíhala nebo ne. Bylo tedy potřeba data upravit a odstranit z nich hodnoty naměřené přístrojem v době, kdy bylo manipulováno s měřicí soustavou, a zkouška neprobíhala.

Následně byla takto upravená data převedena do tabulkového editoru, ve kterém se dále rozdělila na záznam hodnot z části zkoušky při jmenovitém tepelném výkonu (20 kW) a záznam při minimálním tepelném výkonu kotle (15 kW).

Jelikož hodnoty koncentrace emisí vystupují z přístroje ve stejných jednotkách, v jakých je sestavena tabulka mezních hodnot v normě, nemusí se nijak přepočítávat a vyhodnocení výsledků je pouhý aritmetický průměr.

6.3.1 Výsledky plynných emisí při jmenovitém tepelném výkonu kotle

Zkouška byla provedena podle normy, ve které je uvedeno, že musí trvat minimálně dvě hodiny a skládat se ze dvou po sobě jdoucích dob hoření. Přehled zkoušky je zaznamenán v tabulce 3.

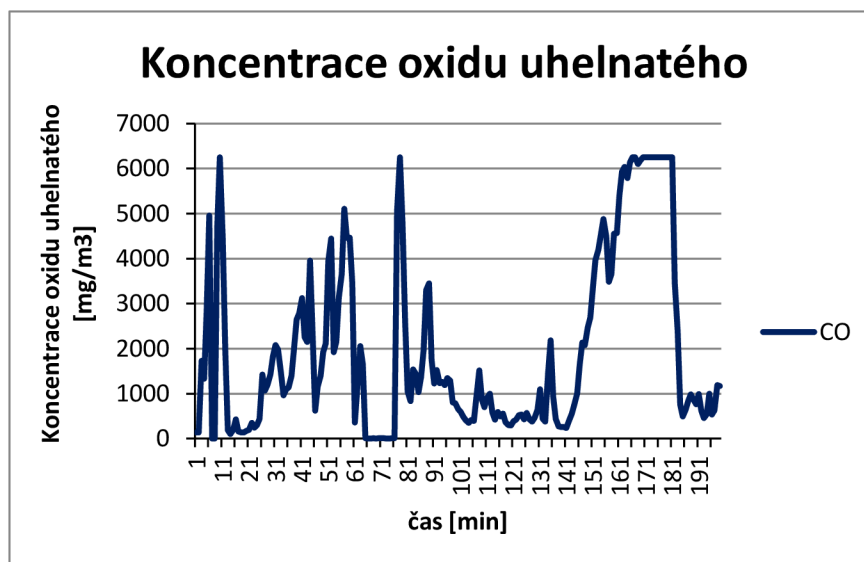
Tabulka 2 Přehled zkoušky při jmenovitém tepelném výkonu kotle

Název	Označení	Záznam	Jednotky
Začátek zkoušky	t ₁	9:30	hh:mm
Konec zkoušky	t ₂	12:47	hh:mm
Délka zkoušky	t	3:17	hh:mm
Počet naměřených hodnot	X	198	-

Výpočet průměrné hodnoty oxidu uhelnatého:

$$\overline{CO} = \frac{\sum_1^{199} CO}{X} = 1987 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$$

Grafický záznam naměřených hodnot koncentrací CO po čas měření:



Graf 1 Koncentrace oxidu uhelnatého při jmenovitém tepelném výkonu

Z grafu 1 jde vidět, že v průběhu zplyňování každé dávky paliva (graf zaznamenává 2 po sobě jdoucí doby hoření), se koncentrace oxidu uhelnatého vypouštěného do ovzduší postupně zvyšuje.

6.3.2 Výsledky plynných emisí při minimálním tepelném výkonu kotle

Zkouška byla provedena podle normy, v které je uvedeno, že probíhá po čas jedné doby hoření.

Přehled zkoušky je zaznamenán v tabulce 4.

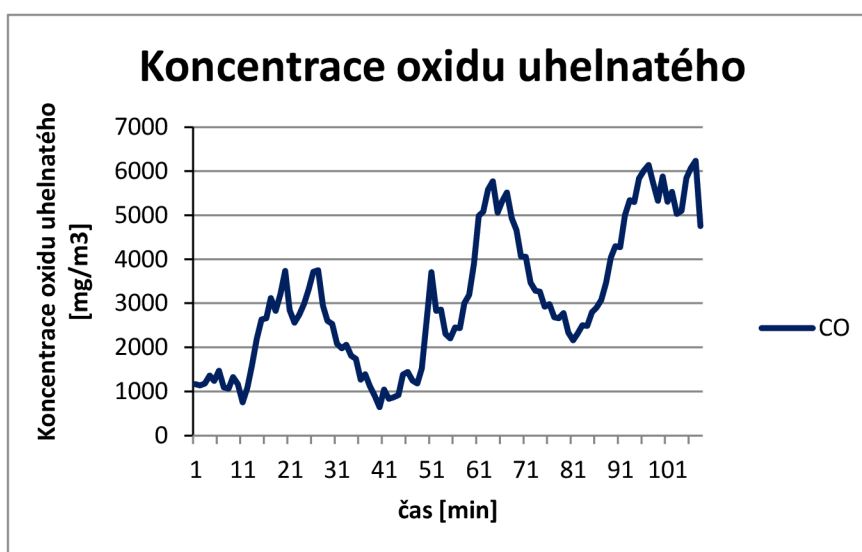
Tabulka 3 Přehled zkoušky při minimálním tepelném výkonu kotle

Název	Označení	Záznam	Jednotky
Začátek zkoušky	t_1	12:48	hh:mm
Konec zkoušky	t_2	14:35	hh:mm
Délka zkoušky	t	1:47	hh:mm
Počet naměřených hodnot	X	107	-

Výpočet průměrné hodnoty oxidu uhelnatého:

$$\overline{CO} = \frac{\sum_1^{199} CO}{X} = 3068 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$$

Grafický záznam naměřených hodnot koncentrací CO po čas měření:



Graf 2 Koncentrace oxidu uhelnatého při minimálním tepelném výkonu

V grafu 2 jde vidět lépe oproti grafu 1, že v průběhu zplyňování (v tomto případě jedné dávky paliva) se koncentrace oxidu uhelnatého postupně zvyšuje.

6.4 Výsledky zkoušky tuhých emisí

Gravimetrická filtrační metoda proběhla v souladu s pokyny uvedenými v normě. Ta udává, že každé měření musí trvat minimálně 30 minut. Přehled a záznam dat naměřených v průběhu zkoušky jsou uvedeny v tabulce 5.

Tabulka 4 Přehled a záznam zkoušky pevných emisí

Název	značka	1	2	jednotka
Začátek zkoušky	t_1	9:30	11:05	hh:mm
Konec zkoušky	t_2	10:00	11:35	hh:mm
Délka zkoušky	t	30	30	min
Hmotnost usazených částic	Δm	37,3	37,9	mg
Rychlost proudění v potrubí	v	1,5	1,5	m/s
Medián koncentrace O_2	O_2	11,9	11,9	%
Referenční koncentrace O_2	O_{2ref}	10	10	%
Objem měřených spalin	V_{ms}	0,506	0,500	m^3
Atmosférický tlak	p_a	102180	102180	Pa
Tlak v průtokoměru	p_c	0	0	Pa
Statický tlak v potrubí	p_s	101930	101930	Pa
Teplota spalin	T_s	513,15	513,15	K
Teplota okolí	T_o	20	20	$^{\circ}C$

Výpočet hmotnostní koncentrace:

$$c_1 = \frac{\Delta m_1}{V_{ms1}} = \frac{37,3}{0,506} = 73,71 \frac{mg}{m^3}$$

$$c_2 = \frac{\Delta m_2}{V_{ms2}} = \frac{37,9}{0,500} = 75,8 \frac{mg}{m^3}$$

Emisní koncentrace se uvádí jako hmotnostní koncentrace (mg/m^3) přepočítaná na suché spaliny při 10% kyslíku a normálních fyzikálních podmínkách (mg/m^3) při $0^{\circ}C$ a 101325 Pa. Tento přepočet je zajištěn tímto přepočtovým vztahem: [29]

$$V_{pr1} = V_{ms1} \cdot \frac{(p_a + p_c)}{101325} \cdot \frac{273,15}{(273,15 + t_o)} \cdot \frac{21 - O_2}{21 - O_{2ref}} = 0,3934 m^3$$

$$V_{pr2} = V_{ms2} \cdot \frac{(p_a + p_c)}{101325} \cdot \frac{273,15}{(273,15 + t_o)} \cdot \frac{21 - O_2}{21 - O_{2ref}} = 0,3887 m^3$$

Výsledná koncentrace v suchém plynu za normálních fyzikálních podmínek, přepočítaná na referenční obsah kyslíku je: [22]

$$c_{v1} = \frac{\Delta m_1}{V_{pr1}} = \frac{37,3}{0,3934} = 94,82 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$$

$$c_{v2} = \frac{\Delta m_2}{V_{pr2}} = \frac{37,9}{0,3887} = 97,50 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$$

6.5 Vyhodnocení zkoušky podle normy ČSN EN 303-5

Naměřená data byla v předchozích kapitolách zpracována a náležitě vyhodnocena tak jak udává norma ČSN EN 303-5. V úvodu 7. kapitoly je zobrazena tabulka (tab. 2) převzatá z této normy. V tabulce jsou uvedeny hodnoty mezních emisí, podle kterých se kotle na tuhá paliva řadí do příslušných emisních tříd. V následující tabulce jsou porovnány mezní hodnoty třetí a čtvrté emisní třídy kotlů s naměřenými hodnotami emisí při zkoušce.

Tabulka 5 Vyhodnocení emisní třídy kotle na tuhá paliva Damat Pyro G s

Druh emisí	Limit dle ČSN EN 303-5 [mg/m ³]		Tepelný výkon kotle	Naměřené hodnoty [mg/m ³]	Splňují
	3. Třída	4. Třída			
CO	5000	1200	Jmenovitý	1987	3. Třída
			Minimální	3068	3. Třída
Tuhé emise	150	50	Jmenovitý	94,82	3. Třída
			Jmenovitý	97,5	3. Třída

Naměřené hodnoty při zkoušce na kotli Damat Pyro G, jsou menší než mezní hodnoty třetí emisní třídy, ale větší jak mezní hodnoty čtvrté emisní třídy. Z toho vyplývá, že kotel odpovídá třetí emisní třídě a tento výsledek je totožný s údajem, který udává výrobce pro daný typ kotle.

7 Porovnání výsledků zkoušky s nařízením komise (EU) 2015/1189 - Směrnicí o Ekodesignu kotlů na tuhá paliva

Směrnice o Ekodesignu určuje, jaké parametry musí kotel na tuhá paliva splňovat, aby mohl být prodáván na území Evropské unie. Tato směrnice byla projednána a schválena na území europarlamentu a následně publikována ve věstníku EU dne 28. dubna 2015. Požadavky uvedené v této směrnici, které budou muset splňovat všechny kotle na tuhá paliva vejdou v platnost od 1.1.2020. Emisní nároky kotlů na tuhá paliva jsou totožná s emisními nároky pro pátou emisní třídu kotlů, které jsou dány normou ČSN EN 303-5. Směrnice o Ekodesignu navíc stanovuje i minimální účinnost kotlů a mezní hodnotu oxidu dusíku oproti normě ČSN EN 303-5. Kotle budou muset splňovat následující hodnoty uvedené v tabulce 7: [30,31]

Tabulka 6 Hodnoty emisních limitů a účinností pro kotle na tuhá paliva podle Směrnice o Ekodesignu [30]

Parametry pro Ekodesign	Kotel o výkonu	Limitní hodnoty platné od 1.1.2020
Účinnost kotle [%]	≤ 20 kW	75
	> 20 kW	77
Provoz kotle		
Tuhé emise [mg/m ³]	Automatický	40
	Ruční	60
Uhlovodíky (OCG) [mg/m ³]	Automatický	20
	Ruční	30
Oxid uhelnatý (CO) [mg/m ³]	Automatický	500
	Ruční	700
Typ paliva		
Oxidy dusíku (NO _x) [mg/m ³]	Biomasa	200
	Fosilní	350

Směrnice o Ekodesignu dále stanovuje povinnosti související s prodejem a provozem kotlů na tuhá paliva. Tyto povinnosti jsou uvedeny v tabulce 8.

Tabulka 7 Prodej a provoz kotlů na tuhá paliva podle Směrnice o Ekodesignu [30]

Zahájení platnosti	Popis nařízení
1.1.2014	Zákaz prodeje kotlů 1. a 2. emisní třídy
1.1.2017	Povinnost předložit revizi kotle (včetně označení emisní třídy)
1.1.2018	Zákaz prodeje kotlů 3. emisní třídy
1.1.2020	Zákaz prodeje kotlů 4. emisní třídy
1.1.2022	Zákaz používání 1. a 2. emisní třídy

7.1 Výpočet účinnosti kotle a oxidu dusíku při zkoušce

Aby se daly výsledky zkoušky na kotli Damat Pyro G porovnat se směrnici o Ekodesignu, je potřeba dopočítat účinnost kotle a hodnoty emisí (oxidu dusíku). Ostatní potřebné hodnoty emisí pro porovnání, jsou vyhodnoceny v předchozí kapitole (kap. 7.), kde sloužily pro srovnání s normou ČSN EN 303-5.

7.1.1 Výpočet účinnosti kotle

Účinnost kotle vypočítáme přímou metodou pomocí vzorce:

$$\eta = \frac{Q_{vyrobené}}{Q_{dodané}} \cdot 100 = \frac{\dot{m}_v \cdot c \cdot \Delta t}{\dot{m}_p \cdot Q_i^r} \cdot 100 \quad [\%]$$

Průběh zkoušky a záznam naměřených hodnot je uveden v tabulce 9:

Tabulka 8 Přehled zkoušky a záznam hodnot

Název	Značka	Hodnota	Jednotky
Začátek zkoušky	t ₁	9:30	hh:mm
Konec zkoušky	t ₂	13:48	hh:mm
Délka zkoušky	t	3:18	hh:mm
Hmotnostní průtok vody	\dot{m}_v	0,16	kg/s
Hmotnostní průtok paliva	\dot{m}_p	0,002	kg/s
Měrná tepelná kapacita vody	c	4180	J/(kg*K)
Rozdíl teplot vody	Δt	45	K
Výhřevnost paliva	Q_i^r	17,6	MJ/kg

Výpočet účinnosti kotle:

$$\eta = \frac{0,16 \cdot 4180 \cdot 45}{0,002 \cdot 17,6 \cdot 10^6} \cdot 100 = 84,4\%$$

Účinnost se shoduje s hodnotou uvedenou výrobcem v servisním manuálu tohoto kotle a také vyhovuje směrnici o Ekodesignu.

7.1.2 Výpočet hodnot oxidu dusíku

Oxidy dusíku byly měřeny současně s oxidem uhelnatým pomocí měřících přístrojů ULTRAMAT. Výsledky budou vyhodnoceny stejně jako oxid uhelnatý při zkoušce při jmenovitém tepelném výkonu a při minimálním tepelném výkonu kotle (viz 7. kapitola).

Přehled zkoušky je zaznamenán v tabulce 10.

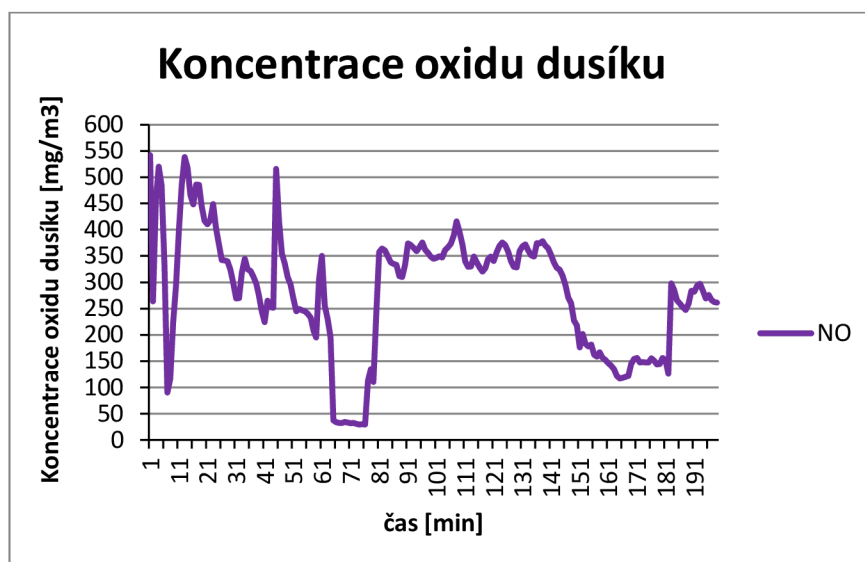
Tabulka 9 Přehled zkoušky při jmenovitém tepelném výkonu kotle

Název	Označení	Záznam	Jednotky
Začátek zkoušky	t ₁	9:30	hh:mm
Konec zkoušky	t ₂	12:47	hh:mm
Délka zkoušky	t	3:17	hh:mm
Počet naměřených hodnot	X	198	-

Výpočet průměrné hodnoty oxidu dusíku:

$$\overline{NO_x} = \frac{\sum_1^{199} NO_x}{X} \cong 282 \frac{mg}{m^3}$$

Grafický záznam naměřených hodnot koncentrací NO_x po čas měření:



Graf 3 Koncentrace oxidů dusíku při jmenovitém tepelném výkonu

Z grafu 3 je zřejmé, že hodnoty koncentrací oxidu dusíku se postupně snižují s ubývajícím množstvím paliva v násypce při zplyňování.

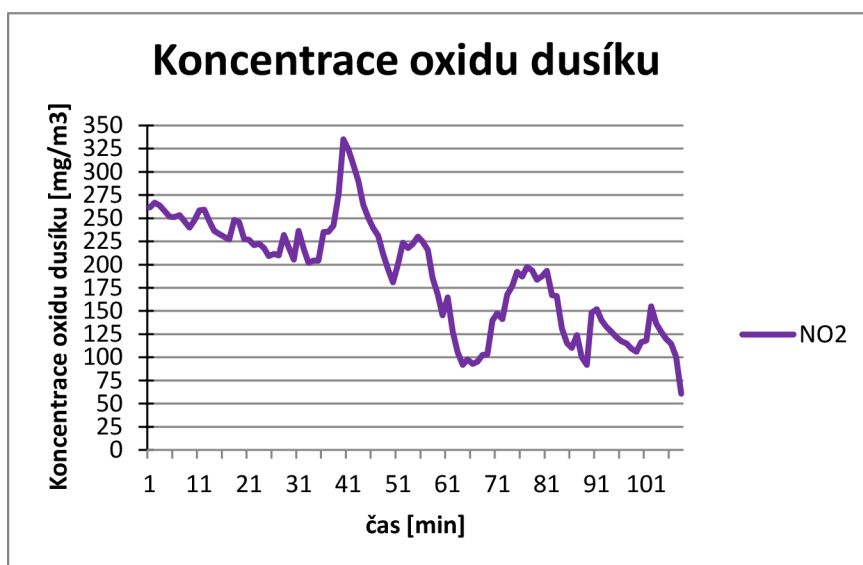
Tabulka 10 Přehled zkoušky při minimálním tepelném výkonu kotle

Název	Označení	Záznam	Jednotky
Začátek zkoušky	t_1	12:48	hh:mm
Konec zkoušky	t_2	14:35	hh:mm
Délka zkoušky	t	1:47	hh:mm
Počet naměřených hodnot	X	107	-

Výpočet průměrné hodnoty oxidu dusíku:

$$\overline{NO_2} = \frac{\sum_1^{199} NO_2}{X} \cong 191 \frac{mg}{m^3}$$

Grafický záznam naměřených hodnot koncentrací NO_x po čas měření:



Graf 4 Koncentrace oxidů dusíku při minimálním tepelném výkonu

Z grafu 4 jde vidět lépe oproti grafu 3, že se hodnoty koncentrací oxidu dusíku postupně snižují s ubývajícím množstvím paliva v kotli při zplyňování.

7.2 Vyhodnocení zkoušky podle Směrnice o Ekodesign

V následující tabulce budou porovnány mezní limity, které udává směrnice o Ekodesignu s naměřenými hodnotami při zkoušce na kotli Damat Pyro G.

Tabulka 11 Vyhodnocení zkoušky zda vyhovuje Směrnici o Ekodesignu

Druh sledovaného parametru	Limit dle Směrnice o Ekodesignu	Výkon kotle	Naměřená hodnoty	Požadavek Ekodesignu
Účinnost kotle [%]	75	Jmenovitý	84,4	splněn
Tuhé emise [mg/m ³]	60	Jmenovitý	94,82	nesplněn
		Jmenovitý	97,5	nesplněn
Oxid uhelnatý [mg/m ³]	700	Jmenovitý	1987	nesplněn
		Minimální	3068	nesplněn
Oxidy dusíku [mg/m ³]	200	Jmenovitý	282	nesplněn
		Minimální	191	splněn

Jak je vidět v tabulce 12 kotel Damat Pyro G vyhovuje směrnici o Ekodesignu pouze ve dvou parametrech. To se dalo předpokládat, jelikož tato směrnice je pouze dva roky stará. V době, kdy se kotel začal vyrábět, neměl nikdo ani ponětí, že by takováto zpřísnění na emisní nároky kotlů na tuhá paliva mohla přijít.

Závěr

Obsahem mé bakalářské práce je rešeršní studie týkající se zplyňovacích kotlů malých výkonů a praktická část, která spočívá v měření emisí a účinnosti vybraného zkušebního zplyňovacího kotle. Výstupem tohoto měření je zařazení kotle do dané emisní třídy na základě vyhodnocení naměřených parametrů. Vše proběhlo v souladu s normou ČSN EN 303-5.

V úvodu rešeršní části byly popsány jednotlivé druhy termochemických rozkladů paliva a základní členění kotlů podle využívané technologie. Následně byla podrobně rozebrána problematika zplyňovacích kotlů z hlediska použitého paliva a jejich konstrukce.

Cílem praktické části bylo stanovit emisní třídu a účinnost kotle Damat Pyro 20 G, na kterém bylo měření provedeno. Vše probíhalo v souladu s podmínkami uvedenými v již zmíněné normě ČSN EN 303-5. Zkouška byla provedena ve dvou pracovních režimech kotle, a to při jmenovitém tepelném výkonu (20kW) a při minimálním tepelném výkonu (15kW). Naměřené hodnoty byly vhodně zpracovány tak, aby je bylo možné porovnat s mezními hodnotami uvedenými v normě.

Na základě hodnot vyplývajících ze samotného měření a vypočítaných výsledků lze podle normy ČSN EN 303-5 tento typ kotle zařadit do třetí emisní třídy. Takto měřením stanovená emisní třída se přímo shoduje s emisní třídou udanou výrobcem tohoto kotle.

Výsledky zkoušky byly také porovnány se směrnicí o Ekodesignu, kterou zkušební kotel nesplnil. Směrnice požaduje dodržení takových emisních nároků, které odpovídají páté (nejvyšší) emisní třídě podle normy ČSN EN 303-5. Směrnice o Ekodesignu vejde v platnost až v roce 2020 a toto porovnání mělo pouze informativní charakter.

Použitá literatura

- [1] BALÁŠ, Marek. *Kotle a výměníky tepla*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4770-7.
- [2] HRONCOVÁ, Emília; LADOMERSKÝ, Juraj. Spracovanie dreva a odpadovej biomasy pyrolýzou.
- [3] Pyrolýza odpadní biomasy. In: OCHRANA, Ladislav. *Energie z biomasy: Sborník příspěvků ze semináře* [online]. 1. vyd. Brno: VUT FSI, 2003 [cit. 2016-12-21]. ISBN 8021425431. Dostupné z: www.eu.fme.vutbr.cz/file/256_1_1
- [4] Pyrolýza. Biomass technology [online]. 2009 [cit. 2016-12-21]. Dostupné z: http://biomasstechnology.cz/wp/?page_id=195
- [5] POHOŘELÝ, Michael a Michal JEREMIÁŠ. Zplyňování biomasy - možnosti uplatnění. *Biom.cz* [online]. 2010-11-24, 2012-12-7 [cit. 2016-12-21]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/zplynovani-biomasy-moznosti-uplatneni>. ISSN: 1801-2655.
- [6] Zplyňování biomasy. BPS projekt [online]. 2015 [cit. 2016-12-21]. Dostupné z: <http://www.bpsprojekt.cz/cs/obsah/zplynovani-biomasy>
- [7] Biomasa - princip. BALÁŠ, Marek. *Prima energie* [online]. 2015 [cit. 2016-12-21]. Dostupné z: <http://www.primaenergie.cz/alternativni-zdroje-energie/energie-z-biomasy/biomasa-princip.html>
- [8] STUPAVSKÝ, Vladimír: Zplynovací kotel na kusové dřevo, polena a dřevěné brikety. *Biom.cz* [online]. 2010-01-01 [cit. 2016-12-26]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/zplynovaci-kotel-na-kusove-drevo-polena-a-drevene-brikety>>. ISSN: 1801-2655.
- [9] KOLONIČNÝ, Jan, Jiří HORÁK a Silvie PETRÁNKOVÁ ŠEVČÍKOVÁ. *Kotle malých výkonů na pevná paliva*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2542-7.
- [10] TOMÁŠEK, Jan. Jak vybrat kotel na tuhá paliva? In: *IReceptář.cz* [online]. Tomášek, 2015 [cit. 2016-12-26]. Dostupné z: <http://www.ireceptar.cz/domov-a-bydleni/energie-a-vytapeni/jak-vybrat-kotel-na-tuha-paliva-dle-ucinnosti-emisni-tridy-i-dotace/>
- [11] STUPAVSKÝ, Vladimír: Zplynovací kotel na kusové dřevo, polena a dřevěné brikety. *Biom.cz* [online]. 2010-01-01 [cit. 2016-12-27]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/zplynovaci-kotel-na-kusove-drevo-polena-a-drevene-brikety>>. ISSN: 1801-2655.
- [12] ZPLYŇOVACÍ KOTEL MAKAK 20-40 KW. *KOVARSON* [online]. Vsetín, 2012 [cit. 2016-12-27]. Dostupné z: <http://www.kovarson.cz/cs/makak-20-40-kw-c16/zplynovaci-kotel-makak-20-40-kw-p13>

- [13] Kotel VERNER VN25D - NEREZ. *VERNER* [online]. Bratislava, 2016 [cit. 2016-12-27]. Dostupné z: <http://www.kotle-verner.cz/produkty/kotle-na-kusove-drevo/verner-vn25d--nerez>
- [14] Ekologické zplynovací kotle na dřevo. *ATMOS* [online]. Bělá pod Bezdězem, 2015 [cit. 2016-12-27]. Dostupné z: <http://www.atmos.eu/zplynovaci-kotle-na-drevo/>
- [15] Kotle s ručním přikládáním. *VIADRUS* [online]. Bohumín, 2015 [cit. 2016-12-27]. Dostupné z: <http://www.viadrus.cz/kotle-na-tuha-paliva/zplynovaci-litinovy-kotel-hercules-u32-25-cz30.html>
- [16] Zplyňovací litinový kotel Hercules U32. *VIADRUS* [online]. Bohumín, 2013 [cit. 2016-12-28]. Dostupné z: <http://www.viadrus.cz/kotle-s-rucnim-prikladanim/zplynovaci-litinovy-kotel-hercules-u32-28-cz30.html>
- [17] Zplynovací kotle na hnědé uhlí. *ATMOS* [online]. Bělá pod Bezdězem: <http://www.atmos.eu/zplynovaci-kotle-na-uhli/>, 2015 [cit. 2016-12-28]. Dostupné z: <http://www.atmos.eu/zplynovaci-kotle-na-uhli/>
- [18] Zplynovací kotle na dřevěné brikety a dřevo. *ATMOS* [online]. Bělá pod Bezdězem, 2015 [cit. 2016-12-28]. Dostupné z: <http://www.atmos.eu/zplynovaci-kotle-na-drevene-brikety-a-drevo/>
- [19] Jak vybírat nový kotel na pevná paliva. *Tzbinfo* [online]. Praha: Topinfo, 2013 [cit. 2017-01-23]. Dostupné z: <http://vytapeni.tzbinfo.cz/kotle-kamna-krby/9798-jak-vybirat-novy-kotel-na-pevna-paliva-1>
- [20] KOLONIČNÝ, Jan a Silvie PETRÁNKOVÁ ŠEVČÍKOVÁ. *Spalovací zařízení pro domácnosti do 50 kW na biomasu*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2011. ISBN 978-80-248-2509-0.
- [21] HOPAN, František a Jiří HORÁK. Metodika stanovení „váhy“ typu paliva a typu spalovacího zařízení pro výpočet emisních faktorů znečišťujících látek měrných emisí znečišťujících látek. Ostrava, 2013. Vedoucí práce Jiří Horák.
- [22] JAK DLOUHO MOHU POUŽÍVAT KOTEL 3. EMISNÍ TŘÍDY? *TOPME UHLÍM* [online]. Praha: Ridera Bohemia, 2016 [cit. 2017-01-25]. Dostupné z: <http://www.topmeuhlim.cz/1980-2/>
- [23] Co musí splnit nový kotel na tuhá paliva po roce 2020? Zdroj: <http://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/12909-co-musi-splnit-novy-kotel-na-tuha-paliva-po-roce-2020>. *Tzbinfo* [online]. Ostrava: Topinfo, 2015 [cit. 2017-01-25]. Dostupné z: <http://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/12909-co-musi-splnit-novy-kotel-na-tuha-paliva-po-roce-2020>

- [24] Dokumenty. *DAKON* [online]. Praha: Bosch Termotechnika, 2016 [cit. 2017-01-25]. Dostupné z: <http://www.dakon.cz/produkty/fb2-automat/>
- [25] Ceník. *ATMOS* [online]. Bělá pod Bezdězem, 2017 [cit. 2017-01-25]. Dostupné z: <http://www.atmos.eu/cenik/>
- [26] Kotle pro ústřední vytápění - Část 5: Kotle pro ústřední vytápění na pevná paliva, s ruční a samočinnou dodávkou, o jmenovitém tepelném výkonu nejvýše 500 kW - Terminologie, požadavky, zkoušení a značení. 1. vyd.: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [27] Dakon-interní zdroje firmy
- [28] Měření emisí znečišťujících látek z kotlů malých výkonů. *Tzbinfo* [online]. Ostrava: Topinfo, 2012 [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/8200-mereni-emisi-znecistujicich-latek-z-kotlu-malych-vykonu>
- [29] Emise z kotelen a ochrana ovzduší (III). *Tzbinfo* [online]. Praha: Topinfo, 2005 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/2309-emise-z-kotelen-a-ochrana-ovzdusi-iii>
- [30] Směrnice o Ekodesignu pro kotle a kamna na tuhá paliva. *Tzbinfo* [online]. Ostrava: Topinfo, 2014 [cit. 2017-04-06]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/kotlikove-dotace/11937-smernice-o-ekodesignu-pro-kotle-a-kamna-na-tuha-paliva>
- [31] EVROPSKÝ PARLAMENT A RADA EVROPSKÉ UNIE. 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. *Úřední věstník Evropské unie* [online]. 2009, vol. 285, s. 10-35 [cit. 2017-01-25]. Dostupné z: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0125&from=CS>

Seznam použitých zkratk a symbolů

ZNAČKA	JEDNOTKA	NÁZEV
m	[kg]	Hmotnost
v	[m/s]	Rychlost proudění spalin v potrubí
O_2	[%]	Medián koncentrace kyslíku
V_{ms}	[m ³]	Objem měřených spalin
p_a	[Pa]	Atmosférický tlak
p_s	[Pa]	Statický tlak
T_s	[K]	Teplota spalin
T_o	[K]	Teplota okolí
$C_{1,2}$	[mg/m ³]	Hmotnostní koncentrace
V_{pr}	[m ³]	Objem přepočítaný na suché spalin
C_v	[mg/m ³]	Hmotnostní koncentrace v suchém plynu
\dot{m}	[kg/s]	Hmotnostní průtok
c	[J/(kg · K)]	Měrná tepelná kapacita
Q_i^r	[MJ/kg]	Výhřevnost paliva
η	[%]	Účinnost

Seznam obrázků

Obrázek 1 Autotermní a alotermní zplyňování [5]	17
Obrázek 2 Schéma kotle se samočinnou dopravou paliva [21].....	19
Obrázek 3 Schéma kotle využívající prohořivací technologii [19].....	20
Obrázek 4 Schéma kotle využívající odhořivací technologii [19].....	20
Obrázek 5 Schéma kotle využívající zplyňovací technologii [19].....	21
Obrázek 6 Zplyňovací kotel na dřevo [14].....	26
Obrázek 7 Zplyňovací kotel na uhlí [17]	27
Obrázek 8 Zplyňovací kotel na dřevo a dřevěné brikety [18].....	28
Obrázek 9 Popis spalovací trysky zplyňovacího kotle [27]	30
Obrázek 10 Zapojení kotle a příslušenství.....	34
Obrázek 11 ULTRAMAT (vlevo); Zařízení pro úpravu vzorku spalin (vlevo);.....	35
Obrázek 12 Měřicí soustava pro gravimetrii [28].....	36

Seznam tabulek

Tabulka 1 Tabulky mezních hodnot emisí z normy ČSN EN 303-5 [26]	31
Tabulka 3 Přehled zkoušky při jmenovitém tepelném výkonu kotle	37
Tabulka 4 Přehled zkoušky při minimálním tepelném výkonu kotle.....	38
Tabulka 5 Přehled a záznam zkoušky pevných emisí	39
Tabulka 6 Vyhodnocení emisní třídy kotle na tuhá paliva Damat Pyro G s	40
Tabulka 7 Hodnoty emisních limitů a účinností podle Směrnice o Ekodesignu [30]	41
Tabulka 8 Prodej a provoz kotlů na tuhá paliva podle Směrnice o Ekodesignu [30]	41
Tabulka 9 Přehled zkoušky a záznam hodnot.....	42
Tabulka 10 Přehled zkoušky při jmenovitém tepelném výkonu kotle.....	42
Tabulka 11 Přehled zkoušky při minimálním tepelném výkonu kotle	43
Tabulka 12 Vyhodnocení zkoušky zda vyhovuje Směrnici o Ekodesignu	44

Seznam grafů

Graf 1 Koncentrace oxidu uhelnatého při jmenovitém tepelném výkonu	37
Graf 2 Koncentrace oxidu uhelnatého při minimálním tepelném výkonu.....	38
Graf 3 Koncentrace oxidů dusíku při jmenovitém tepelném výkonu	43
Graf 4 Koncentrace oxidů dusíku při minimálním tepelném výkonu	44