



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

INOVACE V KOTLÍCH NA TUHÁ PALIVA

SOLID FUELS BOILERS INOVATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Libor Kadlík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Libor Kadlík
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Energetika, procesy a životní prostředí
Vedoucí práce:	doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.
Akademický rok:	2018/19

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:

Inovace v kotlích na tuhá paliva

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Neustále se zvyšující tlak na snižování emisí vypouštěných z energetických zdrojů vede k využívání principů a technologií, o kterých se v minulosti nikdy v souvislosti se spalováním v malých zdrojích neuvažovalo, protože byly pro tyto aplikace nevhodné. Cílem bakalářské práce je řešit významných inovací, kterými se výrobci kotlů snaží nežádoucí emise potlačit.

Cíle bakalářské práce:

- přehled kotlů a lokálních zdrojů na tuhá paliva
- přehled legislativy omezující prodej a provozování těchto topidel
- přehled inovací, které u kotlů a lokálních topenišť vznikají pro dodržení legislativních podmínek

Seznam doporučené literatury:

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

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

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá spalováním v kotlích na tuhá paliva. Práce je rozdělena do třech částí. V první části je popsáno základní rozdělení a charakteristika tuhých paliv, druhy kotlů na tuhá paliva a technologie spalování. Ve druhé části jsou uvedeny legislativní požadavky na emise škodlivých látek a povinnosti výrobce i provozovatele těchto zařízení. Závěrečná část práce se zabývá jednotlivými inovacemi, pomocí nichž je dosaženo zkvalitnění spalování.

Klíčová slova

Tuhá paliva, kotel na tuhá paliva, lokální topidlo, účinnost, škodlivé látky, emise škodlivých látek

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with combustion in solid fuels boilers. The thesis is divided into three parts. In first part is described sorting and characteristic of solid fuels, types of solid fuels boilers and technology of combustion. In second part are introduced legislative requirements of harmful emissions and responsibility of solid fuels boilers dealers and operators. Final part is concerned with innovations, which are necessary to more effective and less harmful combustion.

Key words

Solid fuels, solid fuels boiler, local boiler, efficiency, harmful substances, emissions of harmful substances

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KADLÍK, Libor. *Inovace v kotlích na tuhá paliva* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116606>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Marek Baláš.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Inovace kotlů na tuhá paliva vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Marku Balášovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování této závěrečné práce.

OBSAH

1	Úvod	11
2	Tuhá paliva	12
2.1	Hrubý rozbor	12
2.1.1	Hořlavina	12
2.1.2	Popelovina	12
2.1.3	Voda	13
2.1.4	Spalné teplo	13
2.1.5	Výhřevnost	13
2.1.6	Síratost	14
2.2	Biomasa	14
2.2.1	Palivové dřevo	14
2.2.2	Dřevní štěrka	15
2.2.3	Pelety	15
2.2.4	Brikety	15
2.3	Uhlí	15
2.3.1	Lignit	16
2.3.2	Hnědé uhlí	16
2.3.3	Černé uhlí	16
3	Kotle na tuhá paliva	17
3.1	Dělení dle způsobu přikládání paliva	18
3.1.1	S manuální obsluhou	18
3.1.2	Automatické	18
3.2	Dělení dle technologie spalování	22
3.2.1	Prohořivací	22
3.2.2	Odhořivací	22
3.2.3	Zplyňovací	22
3.3	Lokální topidla	23
3.3.1	Krby a krbová kamna	23
3.3.2	Kamna a sporáky	24
3.3.3	Kachlová kamna	24
4	Účinnost	25
4.1	Nepřímá metoda stanovení účinnosti	25
4.1.1	Ztráta hořlaviny v tuhých zbytcích	25
4.1.2	Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků	25
4.1.3	Ztráta prchavé hořlaviny ve spalínách	25
4.1.4	Ztráta fyzickým teplem spalin	26
4.1.5	Ztráta sdílením tepla do okolí	26
5	Emise znečišťujících látek	27
5.1	Tuhé znečišťující látky	27

5.2	Oxid siřičitý	28
5.3	Oxidy dusíku	28
5.4	Oxid uhelnatý	29
5.5	Organické polutanty	29
6	Legislativní požadavky	31
6.1	Zákon o ochraně ovzduší	31
6.2	Třídy kotlů dle ČSN EN 303-5	32
6.2.1	Požadavky na účinnost	34
6.3	Ekodesign	35
6.4	Sálavé zdroje tepla	35
7	Zařízení pro zkvalitnění spalování	38
7.1	Lambda sonda	38
7.1.1	Jednoduchá lambda sonda	38
7.1.2	Vyhřívaná lambda sonda	39
7.2	Turbulátor	39
7.3	Regulátor komínového tahu	41
7.4	Tvarovky	42
7.5	Katalyzátor	43
	Závěr	45
	Seznam použitých zdrojů	46
	Seznam použitých symbolů a zkratk	49

1 Úvod

Spalování paliv za účelem dosažení komfortní teploty v obytném prostoru je pro člověka odjakživa velmi důležité. Zatímco v minulosti byly k vytápění užívány hlavně lokální zdroje tepla nebo vzácně topné systémy rozvádějící horký vzduch, tak počátkem 17. století se začala využívat jako teplonosné médium voda a pára, což vedlo ke vzniku prvních radiátorů a teplovodních otopných soustav. Na území dnešní České republiky byly teplovodní soustavy ústředního vytápění, kde je kotel umístěn v kotelně a vytápí celou budovu, prvně instalovány koncem 19. století.

Ve druhé polovině 20. století došlo, spolu s úměrně rostoucí životní úrovní obyvatel, k zásadnímu nárustu množství kotlů na tuhá paliva, což sebou neslo zvyšující se koncentrace škodlivých látek v ovzduší. Koncem 20. století se situace stala natolik kritickou, že byla přijata legislativa upravující prodej a provoz těchto zařízení. Vzhledem ke zpřísnujícím se požadavkům na emisní limity a minimální účinnost zařízení jsou výrobci kotlů nuceni modernizovat své výrobky, a to za pomoci inovací, které by byly dříve u kotlů na tuhá paliva nemyslitelné.

Cílem bakalářské práce je provést základní rozdělení spalovacích zařízení na tuhá paliva, popsat jednotlivé technologie spalování, popsat platnou legislativu v ČR a inovace, které jsou aplikovány do kotlů za účelem potlačení nežádoucích emisí škodlivých látek.

2 Tuhá paliva

Palivo je látka, v níž je vázána chemická energie, jenž je transformována v energii tepelnou, která je následně dále využívána. Tato chemická reakce se nazývá spalování a ke svému vzniku a udržení potřebuje vhodné podmínky, především dostatečný přísun kyslíku a nízký obsah vody v palivu.

Z hlediska doby nutné k obnově zdroje dělíme paliva na obnovitelná, která se plně obnoví v řádu několika let a neobnovitelná neboli fosilní, jejichž obnova trvá miliony let. Mezi hlavní zástupce patří především biomasa a různé druhy uhlí.

2.1 Hrubý rozbor

Tuhé palivo je složeno ze dvou složek, a to hořlaviny a balastu, který se skládá z popeloviny a vody. Z hořlaviny je jejím spálením získána tepelná energie, zatímco z popeloviny nikoliv. Ta je vyloučena ve formě tuhých zbytků – popele. Hrubý rozbor paliva tedy určuje poměr hořlaviny, popeloviny a vody, viz rovnice (2.1). [1]

$$h + A^r + W^r = 1 \quad (2.1)$$

Kde je

h	– hořlavina v palivu [-]
A^r	– popelovina v palivu [-]
W^r	– voda v palivu [-]

2.1.1 Hořlavina

Hořlavina je nejvýznamnější složkou paliva, neboť právě jejím spálením je uvolněna chemická energie vázaná v palivu.

Z hlediska role ve spalování se hořlavina dělí na dvě složky:

- **Aktivní** – zahrnuje uhlík, vodík a síru, tedy prvky, které jsou nositelem chemicky vázané energie.
- **Pasivní** – zahrnuje prvky kyslík a dusík. Tyto prvky nepřenášejí žádnou energetickou hodnotu.

Významnou charakteristikou paliv je prchavá hořlavina, která se uvolňuje zahříváním paliva při teplotách nad 300 °C, napomáhá jeho vznícení v ohništi a stabilizuje proces spalování. [1]

2.1.2 Popelovina

Jedná se o minerální látky (křemičitany, sírany, uhličitany aj.), které jsou buď obsaženy přímo v tuhém palivu nebo se do procesu spalování dostanou ve formě nečistot přimísených během transportu a skládkování. Spálením popeloviny vzniká popel, který odchází ze spalovací komory ve formě škváry, strusky nebo popílku. Pro energetické využívání tuhých paliv jsou významné charakteristické teploty popele, a to teplota měknutí (t_a), tavení (t_b) a tečení (t_c), na něž má přímý vliv jeho složení. [1]

- **Struska** – sklovitá hmota vzniklá spálením paliva při teplotách nad teplotou pečení a následném rychlém ochlazení paliva.
- **Škvára** – spečená část tuhých zbytků, která vzniká během spalování při teplotách spékání a tavení těchto minerálních látek.
- **Popílek** – jemné částice unášené proudem spalin.

2.1.3 Voda

Krom popeloviny se v palivu nachází i jiné nežádoucí látky, mezi něž lze jednoznačně zařadit i vodu. Voda snižuje výhřevnost paliva, snižuje spalovací teplotu a jelikož odchází komínem ve formě páry, ve kterou se odpařila díky odebrání části tepla uvolněného během spalování, tak zvětšuje komínovou ztrátu. Pokud teplota spalin podkročí teplotu rosného bodu, dojde ke kondenzaci páry v nich obsažené, což má za následek korozi stěn topného systému. Vedle toho také způsobuje problémy během transportu paliva. Platí, že u obnovitelných energetických zdrojů z biomasy je množství vody v palivu vyšší než u fosilních paliv, u kterých množství vody záleží na jeho stáří. Veličina, která popisuje množství vody v palivu, se nazývá vlhkost. Lze ji spočítat ze vztahu:

$$w = \frac{m_w}{m} \times 100 \quad (2.2)$$

Kde je

w	– hmotnostní vlhkost [%]
m_w	– hmotnost vody v palivu [kg]
m	– celková hmotnost paliva [kg]

2.1.4 Spalné teplo

„Je teplo, které se uvolní dokonalým spálením 1 kg paliva a následným ochlazením spalin na teplotu 20 °C, přičemž voda ve spalinách zkondenzuje, tzn. je v kapalném stavu.“ [1]

V našich podmínkách není spalné teplo až tak důležitou veličinou. Mnohem důležitější je výhřevnost, neboť je z důvodu zamezení koroze nutné držet teplotu spalin nad teplotou rosného bodu, díky čemuž voda zůstává v plynném skupenství.

Určuje se laboratorně spálením 1 kg paliva v kyslíkové atmosféře o tlaku 2,5 MPa uvnitř kalorimetru, který je ponořen ve vodní lázni. Spalné teplo se vypočte dle vzorce: [1]

$$Q_s = \frac{V \times \Delta T}{m} \quad (2.3)$$

Kde je

Q_s	– spalné teplo [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$]
V	– vodní hodnota kalorimetru [$\text{kJ} \cdot \text{K}^{-1}$]
ΔT	– rozdíl teplot vodní lázně [K]
m	– hmotnost paliva [kg]

2.1.5 Výhřevnost

„Je teplo, které se uvolní dokonalým spálením 1 kg paliva a následným ochlazením spalin na teplotu 20 °C, přičemž voda ve spalinách nezkondenzuje, zůstává v plynném stavu.“ [1]

Výhřevnost paliva závisí na chemickém rozboru hořlaviny a na obsahu vlhkosti. Lze ji spočítat ze spalného tepla pomocí vzorce: [1]

$$Q_i^r = Q_s - r \times (W^r + 8,94 \times H_2) \quad (2.4)$$

Kde je

Q_i^r	– výhřevnost [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$]
r	– výparné/kondenzační teplo vody [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$]
W^r	– podíl vody v palivu [-]
H_2	– podíl vodíku v surovém palivu [-]

2.1.6 Sirnatost

Je veličina, udávající zastoupení síry v palivu. Ačkoliv je většina síry, zastoupené v palivu, spalitelná, je v palivu nežádoucí, protože zhoršuje jeho vlastnosti. Způsobuje především

- snížení výhřevnosti
- snížení charakteristických teplot popele
- snížení teploty rosného bodu spalin
- zvýšení podílu SO₂ ve spalinách

Podíl síry v palivu udává měrná sirnatost, která se určuje dle vztahu [2]

$$\bar{S} = \frac{10 \times S}{Q_i^r} \quad (2.5)$$

Kde je \bar{S} – měrná sirnatost [g·kJ⁻¹]
 S – obsah síry v palivu [g·kg⁻¹]
 Q_i^r – výhřevnost [kJ·kg⁻¹]

2.2 Biomasa

Obecně pojem biomasa označuje veškerou hmotu biologického původu. Patří sem tedy těla a produkty všech živých organismů a rostlin na naší planetě. Z hlediska energetiky nás ale zajímá pouze energeticky využitelná biomasa, tzn. rostliny, které jsou schopné fotosyntézy, což je děj, během něhož absorbují část energie dopadajícího slunečního záření, spolu s oxidem uhličitým a vodou za vzniku kyslíku a organických sloučenin.

Mezi hlavní výhody energetického využití biomasy patří její dostupnost a obnovitelnost, téměř žádné vypouštění oxidu uhličitého (vypouštíme přibližně stejné množství oxidu uhličitého, které předtím bylo pohlceno) a nižší množství popelovin v porovnání s fosilními palivy.

Mezi nevýhody patří především mnohem nižší charakteristické teploty popele oproti uhlí, potřeba velkých skladovacích prostor, nutnost její úpravy a v případě zemědělsky pěstované biomasy také maření obrovských ploch, využitelných k pěstování plodin k výrobě potravin. [3]

Tabulka 1 - Srovnání průměrné výhřevnosti dřevních paliv [4]

Druh paliva		Obsah vody	Výhřevnost
		[%]	[MJ·kg ⁻¹]
Listnaté dřevo	Čerstvé	50	7,6
	Sušené	15	14,6
Jehličnaté dřevo	Čerstvé	50	8,2
	Sušené	15	15,6
Dřevní štěpka	Čerstvé	40	10,1
	Sušená	10	16,4

2.2.1 Palivové dřevo

Čerstvě vytěžené dřevo obsahuje cca 40–60 % vody, a proto je nezbytné jeho sušení. Vhodná vlhkost pro topení se pohybuje v rozmezí od 15 % do 25 % [5]. Snížení vlhkosti zvyšuje výhřevnost paliva a má pozitivní vliv na kvalitu jeho spalování. Pro vytápění je nejvhodnější

tvrdé dřevo z listnatých stromů (např. dub, buk, habr, jasan a javor), protože má větší hustotu a déle hoří. Ačkoliv má dřevo z jehličnanů (např. smrk, modřín, borovice) nepatrně vyšší výhřevnost, tak je ve srovnání s listnatými dřevinami méně žádané z důvodu nižší hustoty vláken a z důvodu zanášení kotle a komína pryskyřicí.

Hlavními výhodami dřeva jsou takřka žádná emise oxidu uhličitého a jeho obnovitelnost. Mezi další výhody patří nízké pořizovací náklady, ve většině oblastí snadná dostupnost a možnost jeho mnohaletého skladování. Hlavní nevýhodou je nutnost velkých skladovacích prostor, oproti např. uhlí a časová i fyzická náročnost jeho zpracování, a i následného spalování.

2.2.2 Dřevní štěpka

Je strojně nadrcené odpadní dřevo na částice od 3 do 250 mm, které je získáváno z lesní těžby a průmyslového zpracování dřeva nebo rychle rostoucích dřevin. Bezprostředně po těžbě obsahuje více než 55 % vody. Při přirozeném sušení může vlhkost klesnout až na 30 %. Z hlediska složení se štěpka dělí na tzv. zelenou (lesní), hnědou a bílou. [6]

2.2.3 Pelety

Jsou lisované granule válcovitého tvaru, které mají průměr 6 mm a délka se pohybuje od 5 do 40 mm. Mají velmi nízkou vlhkost (cca 8 %) a nízký obsah popelovin (zhruba 1 %) [7]. Převážně jsou vyráběny z dřevních zbytků (piliny, hobliny). Krom dřevních pelet se na trhu objevují pelety rostlinné, kůrové a rašelinové. Speciálním typem jsou pak pelety alternativní. V podstatě se jedná o jakýkoliv slisovaný odpadní rostlinný materiál, který produkují zemědělci. Jejich hlavní výhodou je oproti dřevěným peletám mnohem nižší cena. Mezi nevýhody se řadí velká spékavost popele, špatná soudržnost pelet a narušování stěn kotle spalínami. [8]

Mezi hlavní výhody vytápění peletami patří velký komfort topení (nutnost příkládání až po 3 dnech), ekologické spalování a nízké procento popele. Hlavní nevýhodou je vyšší cena kotle i paliva.

2.2.4 Brikety

Jsou vyráběny silným stlačením (briketováním) zbytků dřevní nebo rostlinné biomasy do tvaru válečků, hranolů nebo šestistěnnů o průměru 40 až 100 mm a délce do 300 mm [9]. Mezi nejčastěji používané materiály patří suchý dřevní prach, piliny, kůra, sláma nebo energetické plodiny. Mají obdobnou vlhkost a obsah popelovin jako pelety.

Lze je spalovat v kotlech na dřevo, krbech, i kotlích ústředního vytápění, přičemž nejvyšší účinnosti dosáhneme v kotlích na dřevoplyn.

Oproti palivovému dřevu brikety vykazují mnohem vyšší komfort vytápění, protože mají vyšší výhřevnost, nevyžadují tak velký prostor pro skladování a celkově je manipulace s nimi čistší. Na druhou stranu je pořizovací cena mnohem vyšší.

2.3 Uhlí

Je dodnes nejvýznamnějším tuhým palivem, tedy i jedním z hlavních zdrojů elektrické energie, z něhož se získává až 40 % její produkce [10]. Jedná se o nerostné palivo, které vzniklo karbonizací nahromaděných odumřelých rostlin a těl nižších živočichů, trvajících v řádu stovek milionů let. Jeho potenciál se plně ukázal až ke konci 18. století, v období tzv. průmyslové revoluce, po vynálezu parního stroje. Uhlí se dělí dle stáří na nejmladší lignit, hnědé a černé uhlí. Čím starší uhlí je, tím má větší obsah uhlíku, tedy i větší výhřevnost a

menší obsah vody. Uhlí se buď spaluje za účelem výroby tepla a elektrické energie nebo se dále zpracovává koksováním a zplyňováním. [11]

I přes masivní těžbu a spalování uhlí jsou na naší planetě stále obrovské zásoby, které by měly při stávajícím trendu vydržet nejméně 190 let. Do budoucna se ovšem počítá s výrazným poklesem spalování fosilních paliv. Největší zásoby uhlí jsou v Rusku, Číně, Indii a Austrálii, jejichž podíl skýtá 48,7 % všech světových zásob. Pro srovnání v ČR je odhadem, i přes značné spalování, stále 0,7 % všech světových rezerv uhlí [10]. Existují dva základní druhy jeho těžby, a to povrchová a hlubinná. Dle stáří jej lze rozdělit na lignit, hnědé uhlí a černé uhlí.

2.3.1 Lignit

Jedná se o nejmladší uhlí, které začalo vznikat cca před 60 miliony lety. Mimo uhlík obsahuje velké množství popelovin, síry a vody. Lignit je charakteristický zřetelně zachovanou strukturou dřeva. V dnešní době se na území ČR nacházejí pouze 2 ložiska, kde je aktivní těžba, a to v jižních Čechách u Českých Budějovic a na Hodonínsku. Výhřevnost lignitu je přibližně 8,8 MJ/kg. [12]

2.3.2 Hnědé uhlí

Je v naprosté většině z období třetihor ale starší než lignit a díky tomu i kvalitnější, tzn. obsahuje více uhlíku, a to 70-75 %. V dnešní době se v ČR těží převážně na Mostecku a Sokolovsku. Výhřevnost hnědého uhlí se pohybuje v rozmezí od 11 do 17 MJ/kg. [12], [13], [14]

2.3.3 Černé uhlí

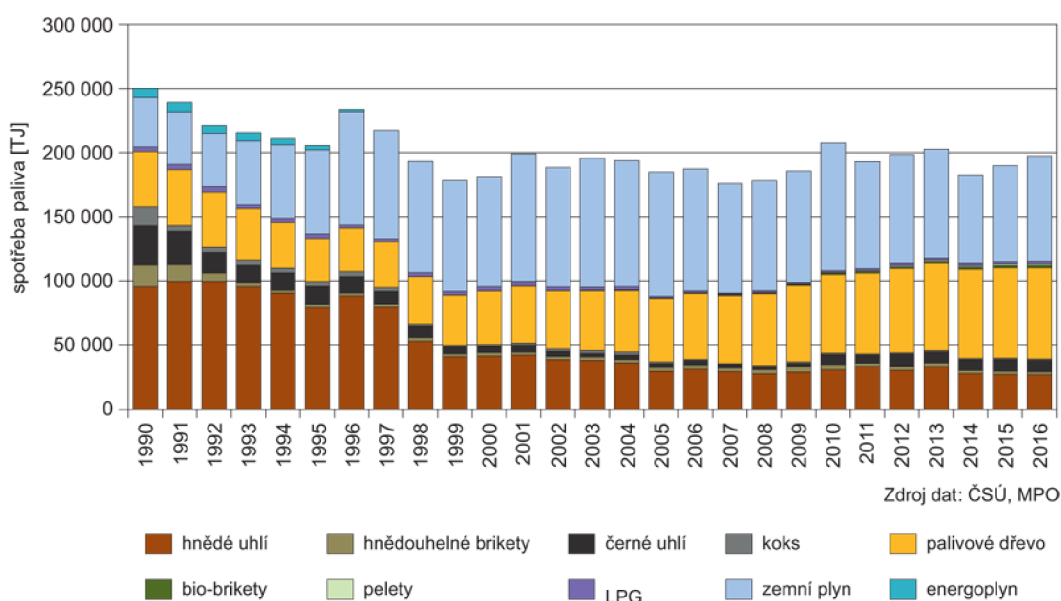
Se začalo tvořit především v období karbonu a křídly. Jedná se o nejkvalitnější druh s velmi vysokým obsahem uhlíku, který se pohybuje až k 90 %, a nízkým obsahem vody. Speciálním druhem černého uhlí je tzv. antracit, který je charakteristický nejvyšším obsahem uhlíku, přes 92 %. Doluje se především hlubinnou těžbou. V České republice je černé uhlí aktuálně těženo z osmi ložisek, především na Ostravsku, Mělnicku, ve středních Čechách, v královéhradeckém kraji a v podkrkonoší, s celkovou roční těžbou kolem 12 mil. tun. Výhřevnost černého uhlí závisí na jeho složení, přičemž se pohybuje mezi 16 a 30 MJ/kg. [12], [13]

3 Kotle na tuhá paliva

Kotel je zařízení určené ke spalování paliva za účelem uvolnění tepelné energie, která je následně předána buď přímo do okolí nebo teplotněmu médiu (voda, vzduch, pára, aj.), které ji dále rozvádí do celé zástavby. Pro maximální účinnost kotle a minimální emise znečišťujících látek je nutné vytvořit ideální podmínky pro spalování, tzn. dostatečný přívod vzduchu do ohniště, vhodná teplota spalování, dobrý odvod spalin, minimální ztráty, aj. Samozřejmostí je také využívání kvalitních paliv s nízkým obsahem vlhkosti. Většina moderních kotlů je již konstruována pouze pro spalování jednoho druhu paliva. [15]

Kotle lze rozdělit podle způsobu využití. Existují kotle horkovzdušné, určené pro lokální vytápění, mezi něž patří krby, krbové vložky, kamna, aj., kde je využíván především přenos tepla sáláním. Druhým typem jsou kotle centrální, které slouží k ústřednímu vytápění celého domu či více domů. U těchto kotlů dochází k předání uvolněné tepelné energie teplotněmu médiu (u kotlů malých výkonů se jedná především o vodu), které je rozvedeno do otopných těles, kde je následně teplo předáno do okolí. U starších kotlů se využívá především samotížný oběh vody, který spočívá v rozdílu hustot horké a studené vody a ve výškovém rozdílu mezi kotlem a otopnými tělesy. Mezi jeho výhody patří absence čerpadla, tzn. nezávislost na el. proudu, žádný zdroj hluku, aj. Mezi hlavní nevýhody patří nutnost použití trubek větších průměrů, špatná regulace, a pomalý zátop. Novější kotle již využívají tzv. nucený oběh vody, kde se k cirkulaci teplotněho média využívá čerpadlo. Mezi jeho výhody patří především dobrá regulovatelnost výkonu, rychlý zátop, menší objem vody v soustavě a s tím související menší rozměry trubek. Na druhou stranu je nucený oběh závislý na elektrické energii, čerpadlo může způsobovat hluk a je třeba počítat s vyššími investičními náklady. [16]

Díky přírodním nalezištím uhlí a dostatku dřeva v ČR patří tuhá paliva stále k jedněm z nejdůležitějších nejen pro kotle malých výkonů. Cca před 20 lety se krom tradičních paliv začala využívat upravená dřevní paliva, jako jsou štěpka, pelety a brikety. Pro představu, v roce 2011 bylo zjištěno, že cca 600 000 domácností je vytápěno tuhými palivy a v roce 2014 se v ČR prodalo přes 31 000 kotlů na tuhá paliva, přičemž jejich prodej meziročně lehce roste. [17] [18]



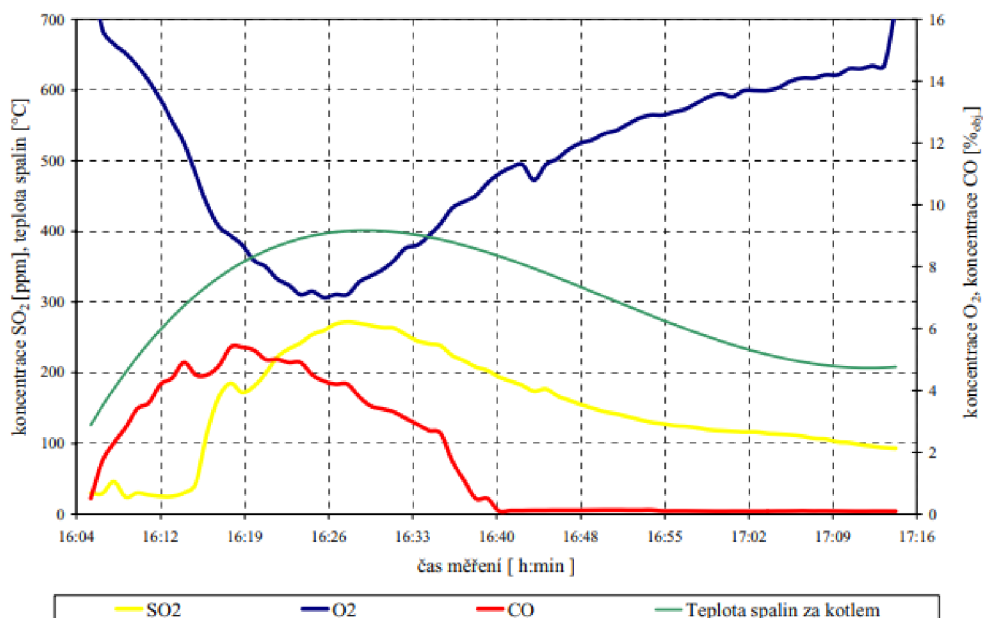
Obrázek 1 - Spotřeba paliv v kotlích malých výkonů k vytápění domácností, 2016 [19]

3.1 Dělení dle způsobu přikládání paliva

3.1.1 S manuální obsluhou

Řadí se mezi tradiční, levné a dosud hojně využívané. Většina všech vyrobených kotlů s manuální obsluhou využívá technologie prohořování. Z důvodu menší časové vytiženosti obsluhy se u těchto zařízení využívá velkoobjemové ohniště, kde je palivo dopravováno horními nebo čelními nakládacími dvířky. Ačkoliv je možno konstruovat kotle s ručním přikládáním paliva až do výkonu 50 kW, tak se běžně používají kotle jen do výkonu 15 kW, které slouží především k vytápění rodinných domů. Regulace výkonu kotle je možná pouze změnou množství přiváděného primárního a sekundárního vzduchu. [15]

Jednou z mála výhod především starších kotlů jsou, ve srovnání se zautomatizovanými, nižší pořizovací náklady. Nevýhod je ovšem celá řada. Mezi ně patří především větší časová náročnost na obsluhu, nižší účinnost kotle, vyšší emise znečišťujících látek, nestálost hoření, viz obrázek 2. Z tohoto důvodu jsou starší kotle nahrazovány moderními kotly zplyňovacími nebo s automatickým přívodem paliva.

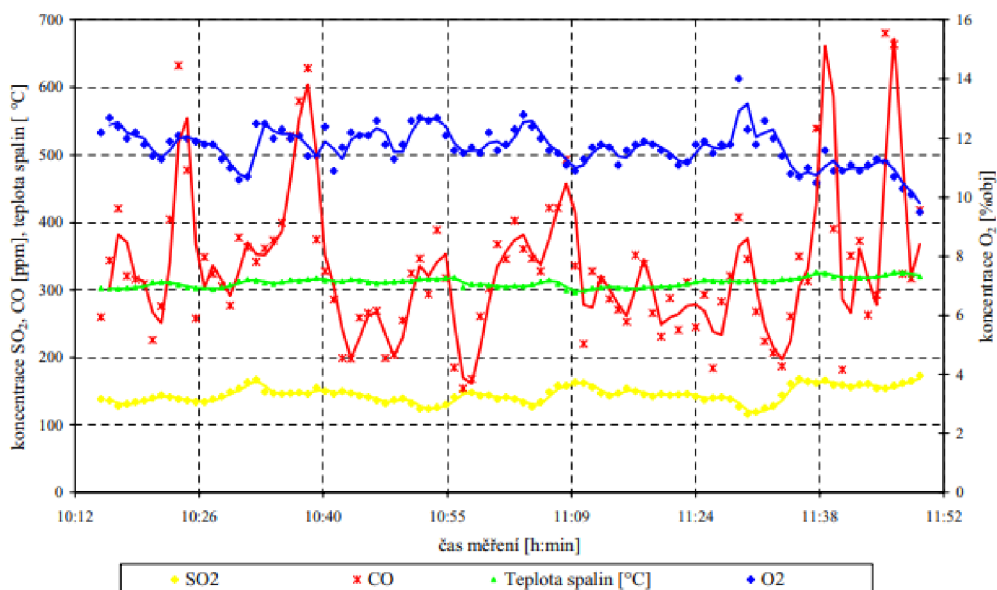


Obrázek 2 - Charakteristika spalin kotle s manuální obsluhou [20]

3.1.2 Automatické

Jedná se o moderní kotle, které využívají automatického kontinuálního přívodu paliva, k jehož dopravě je využíván především šnekový dopravník, a spalovacího vzduchu do ohniště. Jako palivo se používají hlavně pelety, tříděné uhlí, popř. štěpka. Namísto neustálého přikládání paliva je potřeba pouze naplnit zásobník, z něhož je kotel schopen čerpat palivo i několik dnů. O další ovládání kotle se již stará řídicí jednotka.

Díky nepřetržitému přívodu paliva lze docílit mnohem stabilnějšího hoření a vyššího výkonu než u kotlů s manuální obsluhou [15]. Automatické kotle jsou tedy pohodlnější, mají mnohem vyšší účinnost spalování a produkují nižší množství emisí znečišťujících látek, viz obrázek 3. Nevýhodami jsou vyšší pořizovací náklady, závislost na elektrické energii a možné problémy s dopravou paliva do ohniště.



Obrázek 3 - Charakteristika spalin kotle s automatickou obsluhou [20]

U automatických kotlů se využívá různých konstrukcí topenišť [15]:

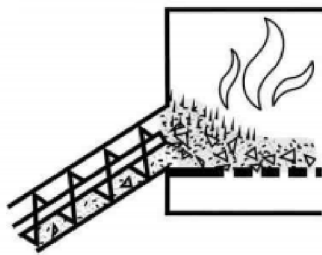
- Topeniště s horním přívodem paliva (se shazováním) se využívá pro spalování dřevních pelet. Jeho konstrukce není vhodná pro spalování štěrky. Pelety jsou dopravovány šnekovým dopravníkem nad ohniště, do něž poté padají. Ke spalování se využívá buď pánevní ohniště, překlápěcí rošt nebo spalovací tunel, viz obrázek 4. Spalovací vzduch je přiváděn zespoda nebo z boku. Topeniště se shazováním paliva se využívá u kotlů do 30 kW, primárně tedy k vytápění rodinných domů.



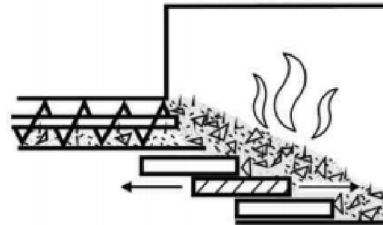
Obrázek 4 - Konstrukce topenišť s horním přívodem paliva [15]

- Topeniště s bočním (příčným) přívodem paliva – je navrženo především ke spalování dřevních pelet a štěrky. Palivo je do ohniště dopravováno taktéž převážně šnekovým dopravníkem. Tato topeniště jsou konstruována především s pevným roštem, a to u kotlů nižších výkonů, zatímco u výkonnějších lze využít i rošt posuvný. V závislosti na druhu spalovaného paliva je někdy nutné rošt chladit primárním vzduchem, což je vhodné i ke snížení tvorby škváry.

Topeniště se vzduchem chlazeným roštem jsou vhodná nejen ke spalování dřevních pelet nebo štěpky, ale i ke spalování paliv s vysokým obsahem popela nebo paliv náchylných k tvorbě škváry (rostlinná biomasa – olejniny, obilniny, aj.).



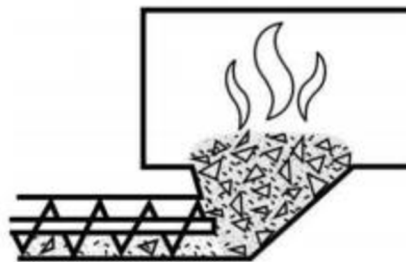
Topeniště s příčným přívodem paliva a pevným roštem



Topeniště s příčným přívodem paliva a posuvným roštem

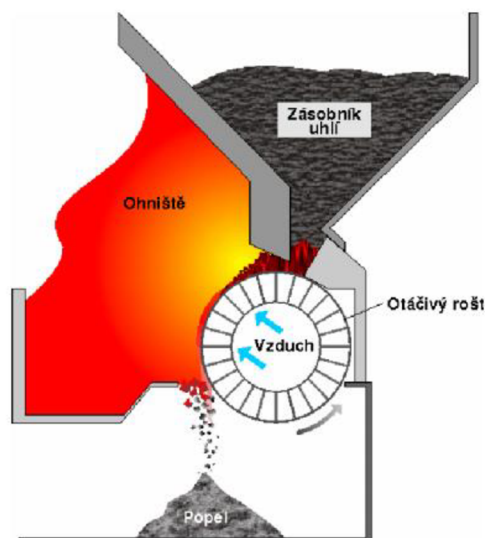
Obrázek 5 - Konstrukce topenišť s bočním přívodem paliva [15]

- Topeniště se spodním přívodem paliva – slouží ke zplyňování paliva, které je do něj taktéž dopravováno především šnekovým dopravníkem, a následnému spálení tuhého zbytku v ohništi, okysličeného primárním spalovacím vzduchem. Uvolněná prchavá hořlavina se následně smíchá se sekundárním vzduchem a je taktéž spálena.



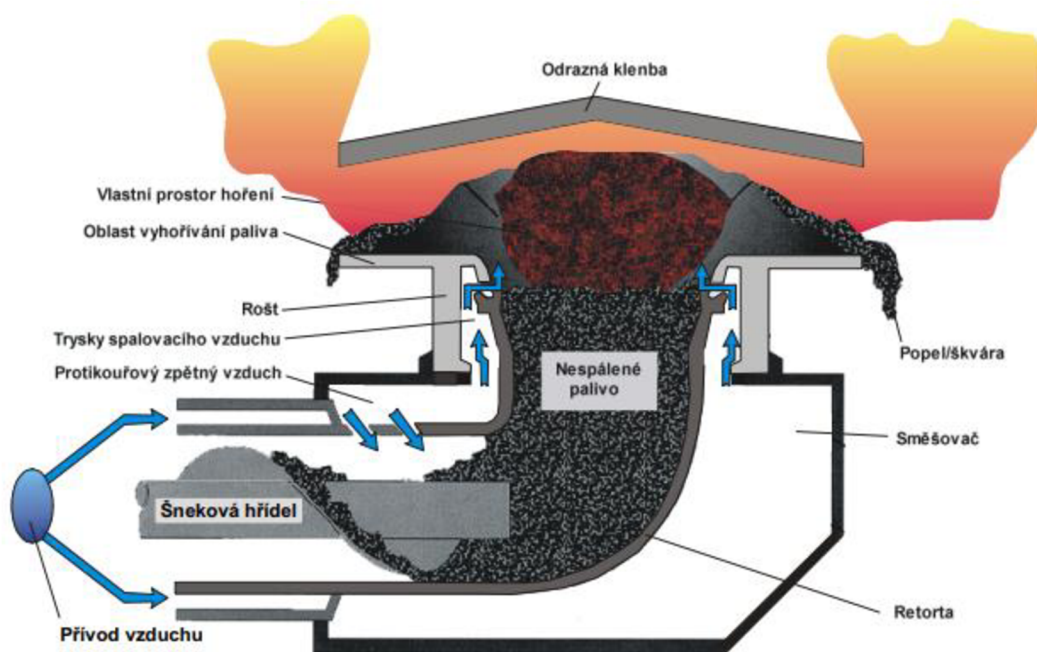
Obrázek 6 - Topeniště se spodním přívodem paliva [15]

- Topeniště s otočným bubnovým roštem – je specifickým typem kotle, kde se nachází bubnový rotující rošt, na nějž je přiváděno palivo, především tříděné uhlí, buď šnekovým dopravníkem nebo samovolným sesouváním. Palivo poté postupně během části otáčky bubnu shoří a následně je v dolní poloze vysypán popel. Pro ideální hoření je velmi důležité nastavit optimální rychlost otáčení bubnu, aby palivo stihlo vyhořet a neodcházelo ve formě tuhého zbytku nebo naopak nebylo v ohništi příliš dlouho. Kotle s bubnovým roštem mají velmi dobrou účinnost přesahující 80 %.



Obrázek 7 - Topeniště s otáčivým bubnovým roštem [20]

- Topeniště s retortou – bylo vyvinuto v Anglii a slouží ke spalování tříděného uhlí. Princip spočívá v kontinuální dopravě paliva šnekovým dopravníkem do retorty, kde je spalována jeho horní vrstva. Ta je posléze vytlačena na rošt, kde dohořívá a poté přepadává okraj do popelníku. Oblast hoření je shora kryta tzv. odraznou klenbou, která slouží udržení vysoké teploty spalování. Spalovací vzduch je do ohniště dopravován tryskami přes rošt. Uvedené řešení poskytuje vysoký komfort spalování, možnou regulaci kotle dle potřebného tepelného výkonu, vysokou účinnost a nízké emise znečišťujících látek.



Obrázek 8 - Topeniště s retortou [20]

3.2 Dělení dle technologie spalování

Ke spalování paliva v kotlech s ručním dávkováním paliva se využívá převážně technologie prohořívání, odhořívání a zplyňování.

3.2.1 Prohořívací

Jedná se o nejstarší technologii spalování, která se vyznačuje spalováním veškerého paliva v ohništi současně. Palivo je přiváděno horními dvířky na rošt, který slouží k odvodu popele a skrz nějž je přiváděn primární vzduch. V horní části ohniště je přiváděn sekundární vzduch, který podporuje spálení prchavé hořlaviny. Vhodnými palivy jsou ta, která mají nízký podíl prchavé hořlaviny, tzn. především koks a černé uhlí. Tato paliva mají ovšem vyšší pořizovací náklady, a tak jsou běžně spalována paliva s vysokým podílem prchavé hořlaviny, tzn. hnědé uhlí nebo dřevo. [15]

Hlavními výhodami těchto kotlů jsou jednoduchá konstrukce a nízké pořizovací náklady. Nevýhodami jsou nízká účinnost a vysoké emise škodlivých látek při spalování příliš vysoké dávky paliva nebo při spalování nevhodných paliv, kvůli čemuž se od jejich užívání ustupuje.

3.2.2 Odhořívací

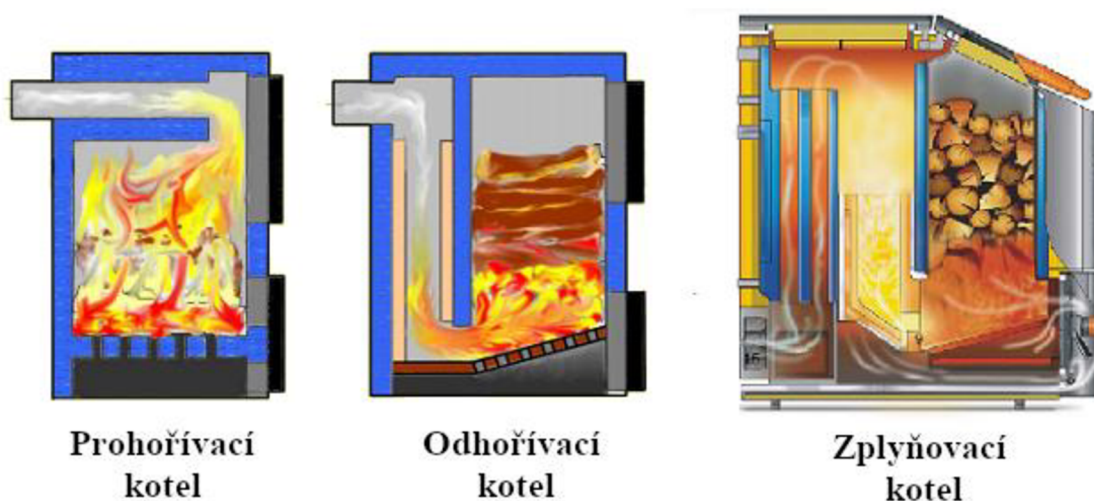
Princip spočívá v postupném odhořívání spodní vrstvy paliva, umístěného na roštu, a následném odvodu spalin spodním nebo bočním tahem, viz obrázek 9. Oproti prohořívacímu kotli neprochází spaliny přes nově přiložené palivo, díky čemuž si udržují vyšší teplotu a jsou lépe spáleny v oddělené komoře, a proto je spalování stabilnější. Popel propadá roštem do popelníku, kde je následně manuálně odebírán. Nejběžněji využívaným palivem je dřevo a uhlí, lze ovšem spalovat i dřevěné či rašelinové brikety. [15]

Oproti prohořívacím jsou kotle odhořívací šetrnější k životnímu prostředí, neboť produkují menší množství emisí.

3.2.3 Zplyňovací

Zplyňování je nejpokročilejší technologií spalování tuhých paliv. Princip spočívá ve dvoukomorovém spalování, tzn. v odděleném spálení pevného uhlíku při velmi nízkém přebytku vzduchu a vzniklé prchavé hořlaviny. Při nízkém množství spalovacího vzduchu dochází k nedokonalému spalování paliva, během nějž je uvolněno menší množství tepla, což má za následek vznik oxidu uhelnatého a uvolnění dalších hořlavých plynů. Prchavá hořlavina je následně spálena v oddělené části kotle. Při spalování plynu lze docílit vyšších spalovacích teplot, neboť je neomezuje charakteristické teploty popele, jako v případě spálení pevného paliva. Jako palivo slouží především dřevo, zcela výjimečně uhlí. Zplyňovací kotle se často provozují spolu s akumulací nádrží z důvodu akumulace nadbytečného tepla, které je využito k vytápění objektu i několik hodin po vyhoření paliva v kotli. [15]

Mezi výhody patří vysoká účinnost, dosahující běžně přes 90 %, automatická plynulá regulace až na 40 % jm. výkonu, malé množství emisí škodlivých látek, nižší náročnost obsluhy a menší tvorba strusky. Nevýhodou je především vysoká investice.



Obrázek 9 - Dělení kotlů dle technologie spalování [15], [21]

3.3 Lokální topidla

Mezi lokální topidla neboli sálavé zdroje tepla [22] patří krby, krbové vložky, krbová, kachlová a litinová kamna, aj. Naprostá většina lokálních topidel spaluje tuhá paliva, a to dřevo a uhlí. Jejich nespornou výhodou je především nízká pořizovací cena ve srovnání s centrálními zdroji. Mezi nevýhody patří především manipulace s palivem a popelem v obytné místnosti, což má za následek zvýšenou prašnost a znečištění.

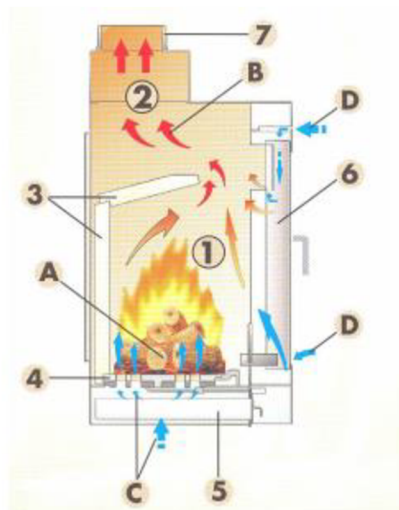
3.3.1 Krby a krbová kamna

Základním poznávacím znakem tradičního krbu je spalování dřeva, popř. briket v otevřeném ohništi. Takové řešení je extrémně neúčinné, neboť až 90 % tepla uniká ve spalinách komínem. Pořizuje se hlavně jako estetická dekorace než jako zdroj vytápění.

Mnohem hospodárnější je využití moderních krbových vložek, jež jsou základním prvkem obezděných krbů. Spalovací prostor je oddělen od okolí zasklením a zároveň je během hoření regulováno množství spalovacího vzduchu. Díky tomu dosahují účinnosti až 80 %. K dosažení vysoké účinnosti je ale nutné zařízení provozovat při jmenovitém výkonu. Z toho důvodu se k soustavě připojuje akumulární nádrž, stejně jako u zplyňovacích kotlů.

Využití krbu spočívá primárně ve vytápění jedné místnosti. Mnohdy je ovšem snaha vytápět dvě a více místností, čehož je docíleno buď konstrukčním řešením krbu nebo zavedením tepelného výměníku. [20]

Prodej krbových kamen a vložek. Zatímco v roce 2000 bylo prodáno přibližně 12 tisíc krbů, tak v roce 2014 to bylo již přes 20 tisíc. [23]



Hlavní části kamen		Spalování	
1	Spalovací komora (topeniště)	A	Hořící palivo
2	Kouřová komora	B	Spaliny
3	Vyměnitelná šamotová vyzdívka	C	Primární vzduch pro spalování
4	Vyměnitelný litinový rošt	D	Sekundární vzduch pro odhoření plyných spalitelných složek (CO apod.) ve spalinách. Zároveň zabraňuje zašpinění skla.
5	Popelník		
6	Prosklená příkládací dvířka		
7	Odvod spalin		

Obrázek 10 – Konstrukční schéma křbových kamen [20]

3.3.2 Kamna a sporáky

Kamna a sporáky představují jedny z nejjednodušších lokálních topidel na tuhá paliva. Palivo je spalováno na pevném roštu, přes který je přiváděn spalovací vzduch, jehož množství lze regulovat pootvěvením dvířek popelníku. Starší kamna využívají technologie prohořívání, zatímco novější jsou již konstruována jako odhořivací. Jako palivo slouží primárně suché dřevo nebo kvalitní tříděné uhlí. [20]

3.3.3 Kachlová kamna

Spolu s křby patří mezi nejstarší způsoby vytápění. Mezi přednosti kachlových kamen s těžkou vyzdívkou patří především vysoká efektivita, dána schopností akumulace tepla, a nízká produkce škodlivin při vhodném užívání. Jako palivo je využíváno primárně dřevo, lze ovšem spalovat i uhlí.

Princip spočívá v akumulaci uvolněného tepla ve stěnách kamen. Nevýhodou je především pomalý nástup ohřívání místnosti, neboť je nejprve nutné nahřát samotnou keramickou hmotu. Na druhou stranu je do místnosti teplo dodáváno i dlouho poté, co již samotný oheň vyhasl.

Díky výborné tepelné izolaci ohniště lze docílit vysokých spalovacích teplot, což má dobrý vliv na kvalitu spalování. V horní části kamen jsou umístěny přepážky, které prodlužují dráhu, jež musí spaliny urazit při cestě do komína.

V dnešní době jsou stále populárnější tzv. kamna lehké konstrukce, kde je absence přepážek v horní části kamen. Spaliny jsou z ohniště vedeny přímo do komína a horní část je pouze obestavěna keramikou. [20]

4 Účinnost

Účinnost kotle říká, s jakou úspěšností lze přeměnit chemicky vázanou energii paliva v užitkové teplo. Existují dvě metody ke stanovení účinnosti kotle, a to přímá, která je určena poměrem mezi výkonem (získanou energií, které je předána teplonosnému médiu) a příkonem (dodanou energií v palivu), a nepřímá, viz podkapitola 4.1. Přímá metoda se u kotlů na tuhá paliva příliš nevyužívá z důvodu náročnosti přesného stanovení množství spáleného paliva a jeho výhřevnosti. U teplovodních kotlů ji lze spočítat ze vztahu: [1]

$$\eta_k = \frac{\dot{m}_w \times (i_{v,out} - i_{v,in})}{Q_i^r \times \dot{m}_p} \times 100 \quad (4.1)$$

Kde je	η_k	– účinnost kotle [%]
	\dot{m}_w	– hmotnostní průtok vody kotlem [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]
	\dot{m}_p	– hmotnostní průtok spalovaného paliva [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]
	$i_{v,out}$	– entalpie vody na výstupu z kotle [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$]
	$i_{v,in}$	– entalpie vody na vstupu do kotle [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$]

4.1 Nepřímá metoda stanovení účinnosti

Princip nepřímé metody spočívá tom, že je kotel pokládán za zařízení se 100% účinností, od níž jsou následně odečítány jednotlivé ztráty, viz rovnice: [1]

$$\eta_k = 100 - \sum_{i=1}^5 \xi_i = 100 - \xi_{mn} - \xi_f - \xi_{cn} - \xi_k - \xi_{sv} \quad (4.2)$$

Kde je	ξ_i	– součet všech ztrát kotle [%]
	ξ_{mn}	– ztráta hořlaviny v tuhých zbytcích [%]
	ξ_f	– ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků [%]
	ξ_{cn}	– ztráta prchavé hořlaviny ve spalinách [%]
	ξ_k	– ztráta fyzickým teplem spalin [%]
	ξ_{sv}	– ztráta sdílením tepla do okolí [%]

4.1.1 Ztráta hořlaviny v tuhých zbytcích

Jedná se o ztrátu, k níž dochází nespálením veškeré tuhé hořlaviny – uhlíku (mechanický nedopal, která následně odchází ze spalovací komory spolu s tuhým zbytkem – škvárou, struskou, popílkem a popelem. U malých spalovacích zařízení se velikost ztráty pohybuje do 0,5 %. [24]

4.1.2 Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků

Ztrátu fyzickým teplem tuhých zbytků lze vyjádřit jako nevyužitou tepelnou energii, kterou nesou odcházející tuhé zbytky.

4.1.3 Ztráta prchavé hořlaviny ve spalinách

Ztráta prchavé hořlaviny ve spalinách (chemický nedopal) spočívá v úniku hořlavých plynů ze spalovací komory. Je způsobena především krátkou dobou setrvání hořlavých plynů (CO , H_2 , C_xH_y , aj.) v ohništi, během níž nedojde k jejich spálení. Ty následně odcházejí spolu se spalinami do ovzduší. Velikost této ztráty závisí na poměrném zastoupení jednotlivých

hořlavých plynů ve spalinách. Její velikost není u kotlů pro ústřední vytápění v praxi větší než 0,5 %, ovšem u lokálních topidel může dosáhnout až 6 %. [1], [24]

4.1.4 Ztráta fyzickým teplem spalin

Komínová ztráta je způsobena únikem tepla, které si nesou plynné spaliny odcházející z kotle. Jedná se o největší ztrátu kotle. Lze ji zmírnit snížením teploty spalin za kotlem a snížením součinitele přebytku vzduchu. Teplota spalin ovšem nesmí podkročit teplotu rosného bodu, neboť by docházelo ke kondenzaci vodní páry a následné nízkoteplotní korozi, která způsobuje provozní potíže a snižuje životnost topného tělesa. Při nadměrném snížení přebytku vzduchu bude docházet k nedokonalému spalování, což má za následek vyšší ztrátu chemickým nedopalem a vyšší emise škodlivých látek. Její velikost je závislá na teplotě spalin a na teplotě přiváděného spalovacího vzduchu. [24]

4.1.5 Ztráta sdílením tepla do okolí

Velikost ztráty sáláním je závislá na konstrukci kotle a na druhu užívaného paliva. Z konstrukčního hlediska má velký vliv především velikost kotle, použitý materiál, tloušťka stěn a kvalita použité izolace. Ztráta sáláním je nechtěná u kotlů pro centrální vytápění, které jsou většinou umístěny ve vyhrazených prostorách – kotelnách mimo obytnou část domu, kde tedy není žádný zájem na jejich vytápění. Naopak u lokálních zdrojů vytápění je kladen důraz na co nejvyšší přenos tepla sáláním do okolí. Velikost ztráty je závislá na materiálu kotle a kvalitě použité izolace. Čím větší tepelný výkon kotel produkuje, tím nižší je procentuální velikost této ztráty, která u kotlů malých výkonů dosahuje nejvýše 2 %. [1]

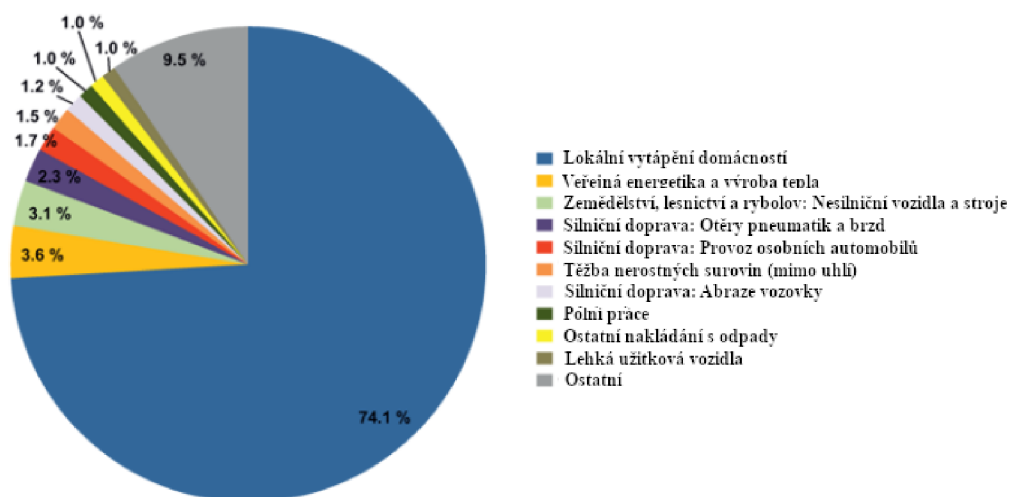
5 Emise znečišťujících látek

Během spalování paliva za přítomnosti vzduchu jako oksyličovadla dochází ke tvorbě znečišťujících a zdraví škodlivých látek, které společně se spalinami odcházejí do ovzduší. Mezi základní složky spalin patří vzdušný dusík, oxid uhličitý, nevyužitý kyslík a voda. Mimo uvedené látky se ve spalinách vyskytují v menším množství i další látky, které mají negativní dopad na životní prostředí. Nejvíce zastoupené jsou oxid uhelnatý, oxid siřičitý, oxidy dusíku a tuhé znečišťující látky. Z důvodu růstu počtu domácností, vytápěných zemním plynem nebo palivovým dřevem namísto hnědého uhlí, postupně dochází ke snižování produkce emisí výše uvedených škodlivých látek.

5.1 Tuhé znečišťující látky

Jsou to drobné částice pevného skupenství, jejichž velikost je definována tzv. aerodynamickým průměrem. Jedná se buď o nespálené palivo, popelovinu nebo produkty spalování.

Škodlivé jsou především částice s malým aerodynamickým průměrem (PM_{10}^1 a menší), které vzhledem ke své malé hmotnosti nesedimentují a zůstávají v ovzduší dlouhé týdny až měsíce. Oproti větším částicím, není lidské tělo schopno malé částice odfiltrovat, takže pronikají dýchacími cestami přímo do plicních sklípků. Způsobují řadu zdravotních potíží, mezi něž patří kašel, astma a kardiovaskulární problémy. Největším problémem TZL je fakt, že se na jemnou frakci váží polycyklické aromatické uhlovodíky, které mohou být karcinogenní a mutagenní, viz podkapitola 5.5, což má za následek vznik rakovinného onemocnění. Mezi hlavní zdroje emisí PM patří lokální vytápění domácností, které se v roce 2016 podílelo na znečišťování látkami o velikosti PM_{10} z cca 57 % a podíl znečištění drobnější frakcí $PM_{2,5}^2$ překračuje 70 %, viz obrázek 11. [19], [20]



Obrázek 11 - Podíl jednotlivých sektorů na celkových emisích $PM_{2,5}$ v roce 2016 [19]

¹ PM_{10} (Particulate matter) definuje částice s aerodynamickým průměrem menším než 10 mikrometrů.

² $PM_{2,5}$ (Particulate matter) definuje částice s aerodynamickým průměrem menším než 2,5 mikrometru.

5.2 Oxid siřičitý

Oxid siřičitý je hlavním produktem oxidace síry obsažené v palivu, převážně v uhlí. V malém množství může vznikat oxid sírový a při nedokonalém spalování i sirovodík. Část spalitelné síry je vždy při spalování vázána na popelovinu, přičemž množství takto zachycené síry závisí na podílu alkalických³ částic v popelovině a na sírnatosti paliva.

Oxid siřičitý při styku se vzdušnou vlhkostí okamžitě reaguje za vzniku kyseliny sírové, která následně reaguje s alkalickými prachovými částicemi a vzniká síran. V případě nedostatku prachových částic v ovzduší dochází ke zkrápění zemského povrchu tzv. kyselými dešti, které mj. poškozují hlavně jehličnaté lesy a kontaminují vodu i půdu. Oxidy síry jsou pro člověka jedovaté. V závislosti na výši koncentrace způsobují oxidy síry onemocnění krevního oběhu, dráždí sliznice, poškozují dýchací cesty a mozkovou kůru a při extrémních hodnotách překračujících $2500 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ jsou smrtící.

Podíl lokálních vytápění domácností na tvorbě oxidů síry byl v roce 2016 přibližně 18,3 %. Zatímco v roce 2008 dosahovali celkové roční emise oxidu siřičitého více než 160 kilotun, tak v roce 2016 to bylo téměř o čtvrtinu méně, tedy cca 120 kilotun. K dispozici jsou k dispozici tři možnosti redukce oxidů síry vypouštěných do ovzduší. První možnost spočívá ve spalování paliva neobsahujícího síru, druhá možnost představuje úpravu paliva před spalováním, kdy je buď zčásti odseparována spalitelná síra anebo je do paliva přidáváno aditivum, a třetí možností je redukce oxidů síry ze spalin. [19], [20]

5.3 Oxidy dusíku

Směs oxidů dusíku, označovanou zjednodušeně jako NO_x , tvoří primárně oxid dusnatý (NO), jenž představuje její většinu, a to cca 90 %. Směs je dále tvořena oxidem dusičitým (NO_2), jehož podíl ve spalinách představuje 5 až 10 %, a oxidem dusným (N_2O), pro nějž je charakteristické označení rajský plyn. Mezi hlavní emitenty oxidů dusíku patří uhelné kotle s vysokou teplotou spalování a provozovatelé starších automobilů, které nejsou vybaveny katalyzátorem⁴. Dle vzniku se oxidy dusíku dělí na:

- Termické – jejich tvorba je velmi závislá na výše teploty. S rostoucí teplotou rapidně vzrůstá jejich tvorba. Vznikají oxidací vzdušného dusíku ve spalovacím procesu za vysokých teplot (nad $1300 \text{ }^\circ\text{C}$).
- Palivové – vznikají oxidací dusíkatých složek paliva při teplotách nad $700 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Promptní – neboli rychlé, vznikají během spalování uhlovodíků ze vzdušného dusíku.

Oxidy dusíku mají nepříznivý vliv na člověka i na životní prostředí. Mají tendenci se vázat na hemoglobin namísto kyslíku, přispívají ke vzniku onemocnění dýchacích cest, nádorových onemocnění a jsou hlavním původcem tvorby tzv. fotochemického smogu.

³ Alkalické kovy jsou členy 1. a 2. skupiny periodické tabulky prvků. Patří sem sodík, draslík, hořčík, vápník, aj.

⁴ Orientační koncentrace oxidů dusíku ve spalinách:

- Plynové kotle: $c = 240 - 1400 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$
- Kotle na topný olej: $c = 500 - 1500 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$
- Uhlenné kotle: $c = 800 - 2500 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$
- Automobily bez katalyzátoru: $c > 1000 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$

Množství emisí lze u malých kotlů redukovat vhodnou konstrukcí spalovacího zařízení, spalováním v bezdusíkaté atmosféře nebo vhodným vedením spalovacího procesu. [19], [20]

5.4 Oxid uhelnatý

Oxid uhelnatý (CO) vzniká nedokonalým spálením paliva, což je způsobeno nedostatkem spalovacího vzduchu nebo rychlým ochlazením plamene.

Je toxický a při vyšších koncentracích životu nebezpečný, neboť má schopnost vázat se na hemoglobin mnohem rychleji než kyslík, což má za následek otravu a udušení.

Velké množství emisí oxidu uhelnatého vzniká v ohništích s cyklickým doplňováním paliva, a to převážně při jeho nadměrném dávkování. Doba nutná k oxidaci oxidu uhelnatého na CO₂ je v řádech měsíců až let. [20]

Ačkoliv lze produkci oxidu uhelnatého během spalování omezit vhodným řízením spalovacího procesu, tak jí nelze plně zabránit.

5.5 Organické polutanty

Do kategorie organických polutantů řadíme uhlovodíky, které se na základě těkavosti dělí na VOC⁵, SVOC⁶ a netěkavé organické látky. Z hlediska ochrany životního prostředí je důležitá skupina organických látek označená jako POPs⁷, neboli perzistentní organické látky. Jedná se o látky toxické, karcinogenní, kumulativní v živých organismech, schopné zůstat v životním prostředí dlouhou dobu beze změny, neboť jsou rezistentní vůči jakémukoliv typu rozkladu. Mezi perzistentní organické látky patří pesticidy (DDT, Chlordan), průmyslové chemikálie (HCB⁸, PCB⁹) a nežádoucí produkty (PCDD¹⁰, PCDF¹¹, PAH¹²).

Nedokonalým spalováním fosilních paliv a nedostatečně vysušeného dřeva vznikají především PAH. Jedná se o tuhé látky, které jsou typickým zástupcem POPs. Jak si lze všimnout z grafu níže, vytápění domácností představovalo v roce 2016 hlavního emitenta rezistentních organických polutantů. [25]

⁵ VOC ... volatile organic Compounds

⁶ SVOC ... semivolatile organic Compounds

⁷ POP ... persistent organic pollutants

⁸ HCB ... hexachlorbenzen

⁹ PCB ... polychlorované bifenyly

¹⁰ PCDD ... polychlorované dibenzodioxiny

¹¹ PCDF ... polychlorované dibenzofurany

¹² PAH ... polycyklické aromatické uhlovodíky – benzen, naftalen, antracen aj.



Obrázek 12 - Podíl jednotlivých sektorů na celkových emisích POPs v roce 2016 [19]

6 Legislativní požadavky

Vzhledem k nekontrolovanému růstu emisí škodlivých látek z důvodu zvyšování množství spalovacích zařízení byl v České republice přijat zákon č. 86/2002 Sb. o ochraně ovzduší, který byl později nahrazen zákonem č. 201/2012 Sb. Prodej kotlů dále upravuje norma ČSN EN 303-5:2013, která nahradila starší normu ČSN EN 303-5:1999. Rozdíl v emisních požadavcích stanovených zákonem o ochraně ovzduší a normou spočívá v tom, že v zákoně jsou emise vztaženy na příkon kotle a v normě na výkon kotle.

ČSN EN 303-5:2013 je českou verzí technické normy, přijaté počátkem roku 2013, platnou pro kotle na tuhá paliva o výkonu do 500 kW. Norma definuje požadavky na konstrukci, provoz kotle a jeho bezpečnost, emisní limity škodlivých látek a minimální účinnost při jmenovitém výkonu.

Před uvedením kotle na trh je každý výrobce povinen jej nechat otestovat, provést tzv. zkoušku typu, při níž se určuje, zda splňuje požadavky uvedené v této normě. Dále je výrobce povinen zajistit, aby všechny další kotle z dané výrobní řady splňovali taktéž požadavky normy.

Splnění emisních limitů kotle během zkoušky typu ovšem neznamená plnění daných limitů třídy kotle v běžném provozu, neboť v laboratorních podmínkách je zaručen optimální provoz, zatímco u provozovatele tato záruka není. [18], [22], [26]

Stejně jako u centrálních zdrojů jsou pro lokální topidla definovány legislativní požadavky. Technické normy definující emisní limity a povinnosti provozovatele pro lokální topidla:

- ČSN EN 13229 – Krbové vložky, kachlová kamna o výkonu do 15 kW.
- ČSN EN 13240 – Krbová kamna.
- ČSN EN 14785 – Krbová kamna na pelety
- ČSN EN 15250 – Kamna s akumulací

6.1 Zákon o ochraně ovzduší

Zákon mj. upravuje emisní limity škodlivých látek pro stacionární kotle na tuhá paliva, určené k ústřednímu vytápění, o tepelném příkonu do 300 kW, viz tabulka 3. Dle zákona o ochraně ovzduší jsou znečišťující látky rozděleny do pěti hlavních skupin, z nichž nultou skupinu představují základní znečišťující látky, viz tabulka 2, z nichž jsou u domovních kotlů na tuhá paliva sledovány koncentrace oxidu uhelnatého, TZL a TOC¹³, a to pouze během zkoušky kotle před uvedením na trh. [22]

¹³ Celkové organické uhlovodíky vyjma metanu, lze značit též OGC

Tabulka 2 - Nultá skupina znečišťujících látek dle zákona o ochraně ovzduší [20]

Základní znečišťující látky
Tuhé znečišťující látky (TZL)
Oxid siřičitý (SO ₂)
Oxidy dusíku (NO _x)
Těkavé organické látky (VOC)
Těžké kovy
Oxid uhelnatý (CO)
Amoniak a soli amonné
Polycyklické aromatické uhlovodíky (PAH)

Zákon dále stanovuje pro stacionární kotle na tuhá paliva o příkonu do 300 kW následující předpisy: [22]

- Osoba, jež uvádí v České republice na trh kotel splňující výše uvedená kritéria, je povinna prokázat certifikátem, že splňuje dané emisní požadavky.
- Provozovatel kotle je povinen si nechat provést nejméně jednou za tři roky kontrolu technického stavu a provozu kotle způsobitou osobou a zprávu o kontrole na požádání předložit na místním obecním úřadě.
- V daných kotlích je zakázáno spalovat hnědé energetické uhlí, lignit a uhelné kaly.

Tabulka 3 – Emisní limity pro kotle¹⁴ ústředního vytápění o jm. výkonu do 300 kW [22]

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný příkon [kW]	Emisní limity ¹⁵		
			CO	TZL	TOC ¹⁶
			[mg·m ⁻³]		
Ruční	Biologické/Fosilní	≤ 300	1200	75	50
Automatická	Biologické/Fosilní	≤ 300	1000	60	30

6.2 Třídy kotlů dle ČSN EN 303-5

Dle výsledku zkoušky typu je danému kotli přiřazena tzv. třída. Ve starší, již neplatné, normě z roku 1999 byly zavedeny první tři emisní třídy kotle. Zavedením nové normy v roce 2013 byla 1. a 2. třída zrušena a ke 3. třídě byla definována třída 4. a 5. K roku 2018 je zakázán prodej kotlů 3. třídy a nižší¹⁷. Ačkoliv se kotle 3. třídy již nesmí prodávat, lze je stále provozovat a to k 1. 1. 2022. [18], [26]

¹⁴ Platí pro kotle, které se použijí se do 31.12.2019

¹⁵ Vztaženo k suchým spalinám o teplotě 273,15 K a tlaku 101,325 kPa při referenčním obsahu O₂ 10 %.

¹⁶ Úhrnná koncentrace všech organických látek vyjma metanu. Nevztahuje se na sálavé zdroje, určené pro připojení na teplovodní soustavu ústředního vytápění a k instalaci v obytné místnosti a na zdroje, u nichž ztráty do okolí činí více než 6 %.

¹⁷ Zákaz prodeje kotlů 1. a 2. třídy je platný od ledna 2014 a 3. třídy od ledna 2018.

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 1 ¹⁾	Třída 2 ¹⁾	Třída 3 ²⁾	Třída 4 ²⁾	Třída 5 ²⁾
Ruční	Biologické	≤ 50	25 000 (18 182)	8 000 (5 818)	5 000 (3 636)	1 200 (873)	700 (509)
		> 50 až 150	12 500 (9 091)	5 000 (3 636)	2 500 (1 818)		
		> 150 až 300 ¹⁾ , 500 ²⁾	12 500 (9 091)	2 000 (1 455)	1 200 (873)		
	Fosílní	≤ 50	25 000 (18 182)	8 000 (5 818)	5 000 (3 636)		
		> 50 až 150	12 500 (9 091)	5 000 (3 636)	2 500 (1 818)		
		> 150 až 300 ¹⁾ , 500 ²⁾	12 500 (9 091)	2 000 (1 455)	1 200 (873)		
Samočinná	Biologické	≤ 50	15 000 (10 909)	5 000 (3 636)	3 000 (2 182)	1 000 (727)	500 (364)
		> 50 až 150	12 500 (9 091)	4 500 (3 273)	2 500 (1 818)		
		> 150 až 300 ¹⁾ , 500 ²⁾	12 500 (9 091)	2 000 (1 455)	1 200 (873)		
	Fosílní	≤ 50	15 000 (10 909)	5 000 (3 636)	3 000 (2 182)		
		> 50 až 150	12 500 (9 091)	4 500 (3 273)	2 500 (1 818)		
		> 150 až 300 ¹⁾ , 500 ²⁾	12 500 (9 091)	2 000 (1 455)	1 200 (873)		

¹⁾ dle již zrušené EN 303-5:1999

²⁾ dle nové EN 303-5:2012

Obrázek 13 – Emisní limity CO dle ČSN EN 303-5:1999 a ČSN EN 303-5:2013 [27]

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 1 ¹⁾	Třída 2 ¹⁾	Třída 3 ^{2),3)}	Třída 4 ²⁾	Třída 5 ²⁾
Ruční	Biologické	≤ 50	200 (145)	180 (131)	150 (109)	75 (55)	60 (44)
		> 50 až 150	200 (145)	180 (131)	150 (109)		
		> 150 až 300 ¹⁾ , 500 ²⁾	200 (145)	180 (131)	150 (109)		
	Fosílní	≤ 50	180 (131)	150 (109)	125 (91)		
		> 50 až 150	180 (131)	150 (109)	125 (91)		
		> 150 až 300 ¹⁾ , 500 ²⁾	180 (131)	150 (109)	125 (91)		
Samočinná	Biologické	≤ 50	200 (145)	180 (131)	150 (109)	60 (44)	40 (29)
		> 50 až 150	200 (145)	180 (131)	150 (109)		
		> 150 až 300 ¹⁾ , 500 ²⁾	200 (145)	180 (131)	150 (109)		
	Fosílní	≤ 50	180 (131)	150 (109)	125 (91)		
		> 50 až 150	180 (131)	150 (109)	125 (91)		
		> 150 až 300 ¹⁾ , 500 ²⁾	180 (131)	150 (109)	125 (91)		

¹⁾ dle již zrušené EN 303-5:1999

²⁾ dle nové EN 303-5:2012

³⁾ U kotlů emisní třídy 3 pro alternativní biopaliva není třeba splnit požadavek na emise prachu. Skutečná hodnota musí být uvedena v technické dokumentaci a nesmí překročit 200 mg/m³_N při 10% O₂ (145 mg/m³_N při 13% O₂).

Obrázek 14 - Emisní limity TZL dle ČSN EN 303-5:1999 a ČSN EN 303-5:2013 [27]

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný výkon [kW]	Mezní hodnoty emisí (koncentrace)				
			OGC				
			mg/m ³ N při 10% O ₂ (mg/m ³ N při 13% O ₂)				
			Třída 1 ¹⁾	Třída 2 ¹⁾	Třída 3 ²⁾	Třída 4 ²⁾	Třída 5 ²⁾
Ruční	Biologické	≤ 50	2 000 (1 455)	300 (218)	150 (109)	50 (36)	30 (22)
		> 50 až 150	1 500 (1 091)	200 (145)	100 (73)		
		> 150 až 300 ¹⁾ , 500 ²⁾	1 500 (1 091)	200 (145)	100 (73)		
	Fosilní	≤ 50	2 000 (1 455)	300 (218)	150 (109)		
		> 50 až 150	1 500 (1 091)	200 (145)	100 (73)		
		> 150 až 300 ¹⁾ , 500 ²⁾	1 500 (1 091)	200 (145)	100 (73)		
Samočinná	Biologické	≤ 50	1 750 (1 273)	200 (145)	100 (73)	30 (22)	20 (15)
		> 50 až 150	1 250 (909)	150 (109)	80 (58)		
		> 150 až 300 ¹⁾ , 500 ²⁾	1 250 (909)	150 (109)	80 (58)		
	Fosilní	≤ 50	1 750 (1 273)	200 (145)	100 (73)		
		> 50 až 150	1 250 (909)	150 (109)	80 (58)		
		> 150 až 300 ¹⁾ , 500 ²⁾	1 250 (909)	150 (109)	80 (58)		

¹⁾ dle již zrušené EN 303-5:1999

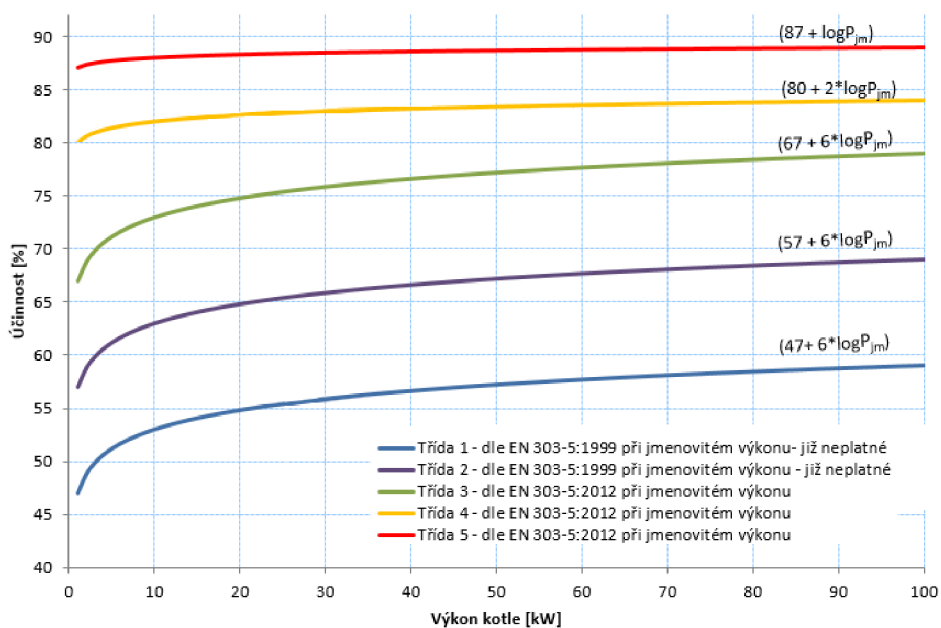
²⁾ dle nové EN 303-5:2012

Obrázek 15 - Emisní limity OGC dle ČSN EN 303-5:1999 a ČSN EN 303-5:2012 [27]

6.2.1 Požadavky na účinnost

K zařazení kotle do třídy nestačí splnit pouze emisní limity, nýbrž je nutné dosáhnout i požadované minimální účinnosti dané třídy. Splnění minimální účinnosti, stejně jako emisních limitů, během zkoušky typu nezaručuje její následné plnění v běžném provozu.

Jak si lze všimnout z grafu na následující straně, tak pro běžný moderní zplyňovací kotel (výkon cca 25 kW), který spadá do 5. emisní třídy, je potřeba dosáhnout minimální účinnosti přes cca 82 %. To není žádný problém, neboť tato spalovací zařízení dosahují běžně účinnosti přesahující 90 %, viz kapitola 3. Ke splnění účinnosti i v běžném provozu by byl ovšem nutný neustálý provoz kotle při jmenovitém výkonu, což by nebylo hospodárné. Z toho důvodu se k topným kotlům připojuje i tzv. akumulční nádrž, která dokáže akumulovat tepelnou energii a poté ji postupně předávat do soustavy i několik dnů.



Obrázek 16 - Minimální účinnost kotlů dle ČSN EN 303-5:1999 a ČSN EN 303-5:2012 [18]

6.3 Ekodesign

Mimo technických norem a zákon o ochraně ovzduší stanovuje nařízení EU 2015/1189, požadavky na ekodesign pro kotle do výkonu 500 kW, uvedené na trh nebo do provozu od 1. ledna 2020.

- Sezónní energetická účinnost vytápění vnitřních prostor kotlů o jmenovitém výkonu do 20 kW nesmí být menší než 75 %.
- Sezónní energetická účinnost vytápění vnitřních prostor kotlů o jmenovitém výkonu nad 20 kW nesmí být menší než 77 %.
- Sezónní emise¹⁸ částic (TZL) z vytápění vnitřních prostor nesmí překročit koncentraci 40 mg·m⁻³ u automatických kotlů a 60 mg·m⁻³ u kotlů s ručním přikládáním.
- Sezónní emise organických plynných sloučenin (OGC) z vytápění vnitřních prostor nesmí překročit koncentraci 20 mg·m⁻³ u automatických kotlů a 30 mg·m⁻³ u kotlů s ručním přikládáním.
- Sezónní emise oxidu uhelnatého (CO) z vytápění vnitřních prostor nesmí překročit koncentraci 500 mg·m⁻³ u automatických kotlů a 700 mg·m⁻³ u kotlů s ručním přikládáním.
- Sezónní emise oxidů dusíku (NO_x) z vytápění vnitřních prostor nesmí překročit koncentraci 200 mg·m⁻³ u kotlů na biomasu a 350 mg·m⁻³ u kotlů spalujících fosilní paliva.

Požadavky na ekodesign musí být splněny pro preferenční palivo i pro jakékoliv jiné vhodné palivo, stanovené výrobcem. Hodnoty sezónní energetické účinnosti jsou nižší o 10-12 %, než účinnosti stanovené zkouškou typu, neboť jsou vztaženy ke spalnému teplu zkušební paliva, zatímco u zkoušky typu je účinnost vztažena k výhřevnosti paliva. [18], [28]

6.4 Sálavé zdroje tepla

Sálavé zdroje tepla musí splňovat obecné emisní limity, platné v celé Evropské unii, pro CO a minimální účinnost pouze při jmenovitém výkonu (vyjma zařízení spalující dřevěné pelety), viz tabulka níže. Při srovnání emisních limitů kotlů a krbových kamen či vložek nutno podotknout, že pro krbová kamna a vložky, popř. sporáky, jsou emisní limity mírné. Jmenovaná zařízení by nedosáhla ani druhé třídy skrz emise CO a minimální účinnost.

¹⁸ Sezónními emisemi se rozumí:

- u automatických kotlů vážený průměr emisí při jmenovitém výkonu a při výkonu 30 % jm. výkonu.
- u kotlů s ručním přikládáním, které lze provozovat při výkonu 50 % jmenovitého výkonu v režimu nepřetržitého provozu, vážený průměr emisí při jmenovitém výkonu a při výkonu 50 % jm. výkonu.
- u kotlů s ručním přikládáním, které nelze provozovat při výkonu 50 % jmenovitého výkonu v režimu nepřetržitého provozu, emise při jmenovitém výkonu.

Tabulka 4 - Obecné emisní limity v EU [29]

Norma	Předmět normy ¹⁹	Limit pro CO ²⁰	Limit pro CO ²¹	Min. účinnost
		[%]	mg·m _N ⁻³	[%]
EN 13240	Krbová kamna	1,0	12 500	50
EN 13229	Krbové vložky	1,0	12 500	30
	Kachlová kamna do 15 kW	0,2	2 500	75
	Vestavěné dekorativní zařízení do 15 kW	0,2	2 500	75
EN 14785	Spotřebiče na dřevěné pelety	0,04/0,06 ²²	500/750 ²³	75/70 ²⁴
EN 15250	Akumulační kamna	0,3	3 750	70
EN 12815	Sporáky	1,0	12 500	60
EN 15821	Saunová kamna na dřevo	1,0	12 500	50

1. března 2019 vešla v platnost norma ČSN EN 16510-1, jenž definuje obecné požadavky a zkušební metody spotřebičů pro domácnost na pevná paliva. Následovat by měli normy ČSN EN 16510-2-1 až ČSN EN 16510-2-6, které se věnují jednotlivým typům lokálních topidel. [29]

Pro lokální topidla určená k pro připojení k ústřednímu vytápění platí emisní limity pro CO a TZL dle zákona o ochraně ovzduší, viz tabulka 4. Od 1. ledna 2022 budou pro osoby uvádějící lokální topidlo na trh v ČR platit požadavky²⁵ na ekodesign, stejně jako u kotlů k ústřednímu vytápění, viz níže. [29]

- Mezní hodnoty emisí TZL:
 - u topidel s otevřeným ohništěm nesmí překročit 50 mg·m_N⁻³ při měření metodou A, nebo 6 g·kg⁻¹ (sušiny) při měření metodou B;
 - u topidel s uzavřeným ohništěm na tuhá paliva vyjma pelet a u sporáků nesmí překročit 40 mg·m_N⁻³ při měření metodou A, nebo 5 g·kg⁻¹ při měření metodou B, nebo 2,4 g·kg⁻¹ v případě měření metodou C;
 - u topidel s uzavřeným ohništěm na pelety nesmí překročit 20 mg·m_N⁻³ při měření metodou A, nebo 2,5 g·kg⁻¹ při měření metodou B3, nebo 1,2 g·kg⁻¹ při měření metodou C;
- Mezní hodnoty emisí TOC:
 - u topidel na tuhá paliva vyjma pelet s otevřeným i uzavřeným ohništěm a ze sporáků nesmí překročit 120 mg·m_N⁻³;
 - u topidel na pelety s uzavřeným ohništěm nesmí překročit 60 mg·m_N⁻³;
- Mezní hodnoty emisí CO:
 - u topidel s otevřeným ohništěm nesmí překročit 2 000 mg·m_N⁻³;
 - u topidel na tuhá paliva s uzavřeným ohništěm vyjma pelet a ze sporáků nesmí překročit 1500 mg·m_N⁻³;
 - u topidel na pelety s uzavřeným ohništěm nesmí překročit 300 mg·m_N⁻³;

¹⁹ Nejběžnější spotřebiče, které norma definuje.

²⁰ Při referenčním obsahu O₂ = 13 %

²¹ Při referenčním obsahu O₂ = 13 %

²² Při sníženém výkonu

²³ Při sníženém výkonu

²⁴ Při sníženém výkonu

²⁵ Požadavky se vztahují k suchým spalinám při referenčním obsahu kyslíku 13 %.

- Mezní hodnoty emisí NO_x:
 - u topidel na tuhá paliva s otevřeným i uzavřeným ohništěm a sporáků na biomasu nesmí překročit 200 mg·m_N⁻³, vyjádřeno jako NO₂;
 - u topidel na tuhá paliva s otevřeným i uzavřeným ohništěm a sporáků na fosilní tuhá paliva nesmí překročit limit 300 mg·m_N⁻³, vyjádřeno jako NO₂;

Dále vstoupí v platnost od 1. ledna 2022 také následující požadavky na sezónní energetickou účinnost vytápění: [29]

- Sezónní energetická účinnost vytápění lokálních zdrojů na tuhá paliva s otevřenou spalovací komorou nesmí být nižší než 30 %.
- Sezónní energetická účinnost vytápění lokálních zdrojů na tuhá paliva, vyjma pelet, s uzavřenou spalovací komorou nesmí být nižší než 65 %.
- Sezónní energetická účinnost vytápění lokálních zdrojů na pelety s uzavřenou spalovací komorou nesmí být nižší než 79 %.
- Sezónní energetická účinnost vytápění sporáků nesmí být nižší než 65 %.

7 Zařízení pro zkvalitnění spalování

Kvůli stále se zpřísňujícím legislativním požadavkům jsou výrobci kotlů a lokálních topidel nuceni zdokonalovat proces spalování, tzn. snížit množství emitovaných škodlivých látek a dosahovat požadované minimální účinnosti.

7.1 Lambda sonda

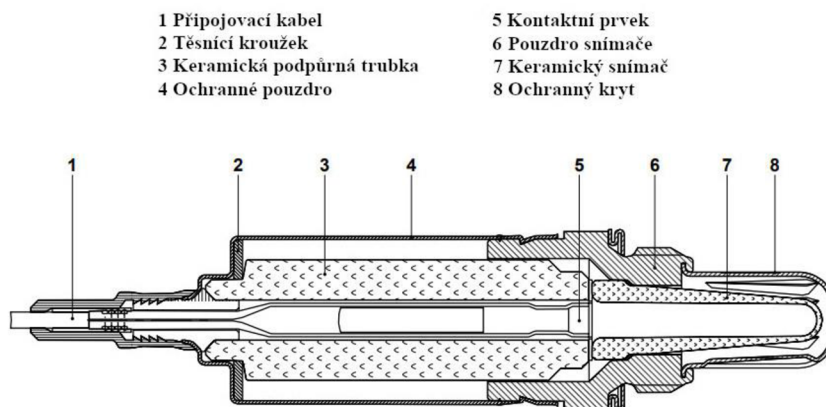
K dokonalému spalování je zapotřebí přivádět do ohniště optimální množství spalovacího vzduchu. Velkým problémem je spalování s nízkým přebytkem vzduchu, tzn. $\alpha < 1$. Při takto nízkém přebytku vzduchu dochází k nedokonalému spalování, což má za následek nízkou účinnost a vysoké množství emisí. Ovšem ani vysoký přebytek spalovacího vzduchu není ku prospěchu. Ačkoliv je díky vysokému obsahu kyslíku v ohništi docíleno dokonalého spalování, tak nezanedbatelné množství horkého vzduchu neshoří a odchází se spalinami. To má za následek vysokou komínovou ztrátu, tedy citelné snížení účinnosti. Daný problém lze vyřešit zavedením tzv. lambda sondy.

V podstatě se jedná o keramický senzor, který kontinuálně monitoruje množství kyslíku ve spalinách. Lambda senzor funguje na principu galvanického článku. V závislosti na rozdílných koncentracích kyslíku vně a uvnitř spalinovodu vzniká na platinových elektrodách, mezi nimiž je pevný elektrolyt, rozdíl elektrického napětí. Signál je následně odeslán řídicí jednotce kotle, která v závislosti na jeho hodnotě automaticky změní množství přiváděného spalovacího vzduchu. K optimálnímu funkci je nutné zajistit minimální přísávání falešného vzduchu v oblasti měření a senzor neustále udržovat přibližně na teplotě 300 °C. [30]

lambda sondy byly prvotně otestovány firmou Bosch v roce 1976. Dříve se využívaly hlavně k monitorování množství kyslíku ve výfukových plynech spalovacích motorů automobilů, později se začaly využívat i v energetice. Dle konstrukce je lze rozdělit na jednoduché, vyhřívané a planární. Jejich rozdíl spočívá především v množství času nutného k zahřátí sondy na provozní teplotu. Dále je lze rozdělit podle počtu vodičů. Jedno a dvou vodičové sondy se řadí k jednoduchým sondám bez vlastního vyhřívání, zatímco sondy se 3 a 4 vodiči již jsou opatřeny elektrickým vyhříváním. [31], [32]

7.1.1 Jednoduchá lambda sonda

Jedná se o nejstarší a nejzákladnější používaný typ, který byl vyvinut v roce 1976. Jednoduché sondy se konstruují ve dvou provedeních, a to s jedním vodičem nebo se dvěma vodiči. Elektrolyt je tvořen buď oxidem zirkoničitým (napětřová sonda) nebo oxidem titaničitým (odporová sonda). Obě sondy jsou schopné zpracovávat pouze dvě limitní hodnoty signálu. Vzhledem k absenci vyhřívání je nutné jednoduchou lambda sondu v spalinovodu umístit co nejbližší ohništi, z důvodu dosažení požadované teploty, což má negativní vliv na její životnost. Další nevýhodou je především čas nutný k zahřátí sondy na požadovanou provozní teplotu, což může trvat i několik minut. [32]

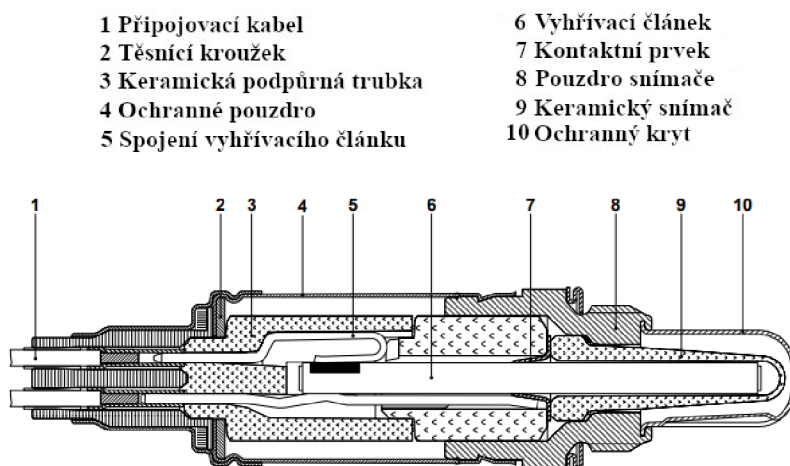


Obrázek 17 - Schématické znázornění jednoduché lambda sondy [30]

7.1.2 Vyhřívaná lambda sonda

Vyhřívaná lambda sonda byla uvedena na trh v roce 1982. Je konstrukčně velmi podobná jako sonda jednoduchá. Hlavní rozdíl spočívá ve vlastním vyhřívání, díky čemuž je schopna dosáhnout provozní teploty již za 30 sekund. K tomu slouží vyhřívací článek, který je připojen ke zdroji el. proudu, viz obrázek 18. Vzhledem k vlastnímu vyhřívání lze tento typ sondy umístit ve spalinových cestách dále od ohniště, což má příznivý vliv na životnost sondy.

Speciálním typem vyhřívané sondy je tzv. planární lambda sonda. Jedná se o nejmodernější typ lambda sondy, kde je elektrolyt tvořen tenkými fóliemi zirkonia a hliníku. Tato technologie umožňuje mnohem rychlejší dosažení provozní teploty, které lze docílit za 10 sekund. [30], [32]



Obrázek 18 - Schématické znázornění vyhřívané lambda sondy [30]

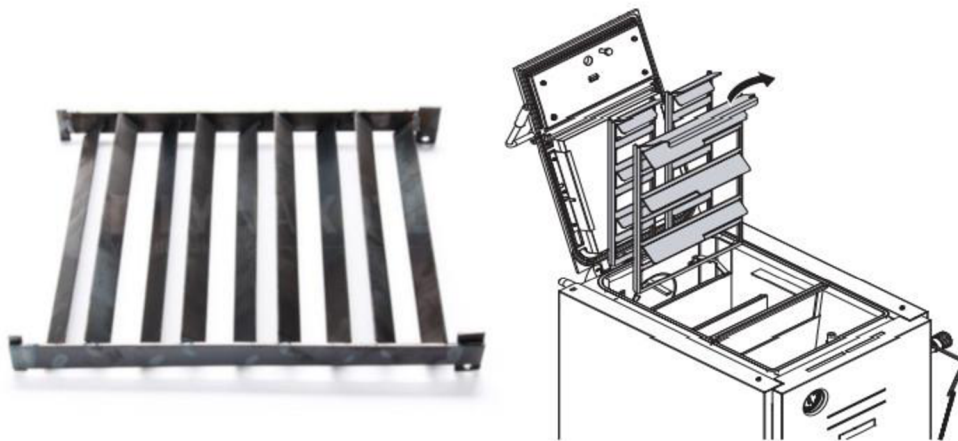
7.2 Turbulátor

Během spalování vznikají horké spaliny, které předávají svou tepelnou energii topnému médiu ve výměníku. Problém nastává, když nedochází k dostatečnému odvodu tepla ze spalin,

především z důvodu příliš krátkých spalinových cest, opotřebení či zanešení teplosměnných ploch, špatného komínového tahu, aj. Následně odchází příliš horké spaliny komínem do ovzduší, což označujeme jako komínovou ztrátu, kvůli čemuž je snížena účinnost kotle až o několik procent.

Problém s příliš horkými spaliny způsobený špatným přenosem tepla či příliš krátkými spalinovými cestami lze vyřešit zavedením tzv. turbulátorů do oblasti výměny tepla. Jejich aplikace vytvoří turbulentní proudění spalin, díky čemuž je dosaženo vyššího přestupu tepla do teplosměnných ploch. U nejmodernějších kotlů na tuhá paliva jsou již samozřejmostí tzv. pohyblivé turbulátory, které slouží i k čištění kotle. Po určité době v provozu je nutné je vyčistit kvůli zanášení.

Turbulátory si lze představit jako ocelová zařízení nejrůznějších tvarů. Jednotlivá zařízení se liší dle výrobce a druhu spalovaného paliva. Na obrázku 19 je turbulátor určený pro automatické kotle DAKON třídy DOR N, spalující uhlí a dřevní pelety. Ten je složen z paralelně řazených ocelových lamel. Oproti tomu turbulátor do zplyňovacích kotlů ATTACK na kusové dřevo, které náleží do nejvyšší 5. emisní třídy, je tvaru šroubovice, viz obrázek 20.



Obrázek 19 - Ocelový turbulátor firmy Dakon pro automatické kotle třídy DOR [33], [34]



Obrázek 20 - Schéma zplyňovacího kotle 5. třídy – ATTACK SLX 25 PROFI [35]

7.3 Regulátor komínového tahu

Termín komínový tah definuje jev, kdy proudění spalin vertikální dutinou – komínem způsobuje tlakovou diferenci mezi vnějším prostředím a vnitřkem dutiny. Většina provozovaných kotlů a lokálních topidel na tuhá paliva jsou atmosféricky provozovány, tzn. podtlak v komíně je způsoben pouze vlivem rozdílu teplot vzduchu uvnitř a vně komína. Moderní spalovací zařízení jsou již provozovány s odtahovým ventilátorem, který vytváří optimální tah komína. Dle osazení ventilátoru lze provoz kotlů rozdělit: [36]

- Přetlakový provoz – spaliny jsou vtačovány do komína ventilátorem, který je umístěn ve spodní části kouřovodu. Tento provoz je využíván především u peletkových kotlů.
- Podtlakový provoz – spaliny jsou odsávány z komína ventilátorem, který je umístěn v horní části kouřovodu. Tento provoz je využíván u kotlů s atmosférickým provozem, kde není generován dostatečný komínový tah (např. nízké a poddimenzované komíny)

Nízký komínový tah způsobuje řadu problémů. Palivo nechce hořet, u krbů dochází k výraznému špinění skla dvířek, při otevření dvířek dochází k zakouření místnosti, aj. Problematický je ovšem taky vysoký komínový tah, v jehož důsledku dochází k velmi rychlému proudění spalin, kvůli čemuž vzrůstá velikost komínové ztráty a tím logicky klesá účinnost spalování.

Problémy s tahem kotle lze spolehlivě vyřešit instalováním regulátoru komínového tahu. Standardní regulátory fungují na principu tíhové síly, kdy je na klapku regulátoru připevněno závaží, které brání v otevření klapky. Nadzvednutí klapky se závažím v případě vyššího tahu okamžitě přivede tzv. falešný vzduch. Díky jednoduchému principu je udržován přibližně stejný komínový tah. Dané regulátory jsou nabízeny ve vícero provedeních, dle místa jejich instalace. [37]



Obrázek 21 - Gravitační regulátor komínového tahu DARCO [37]

Firma VERNER přišla s vlastním unikátním provedením regulátoru. Regulátor obsahuje magnetický toroid, který je umístěn ve šroubem nastavitelné vzdálenosti od klapky. To má za následek vznik magnetického předpětí, které definuje prahovou hodnotu podtlaku. Vlivem změny komínového tahu dojde k pootevření klapky, což zajistí přísátí odpovídajícího falešného vzduchu. [38]

Optimalizací komínového tahu přispívají regulátory ke stabilizaci spalovacího procesu, což má za následek snížení spotřeby paliva až o 9 %. Dále chrání komín před navlhnutím při vysokém komínovém tahu, neboť přísátím falešného vzduchu způsobí zvětšení objemu spalin a rychlosti jejich proudění. Ačkoliv kvůli naředění spalin vzduchem dochází k poklesu jejich teploty, dochází současně k poklesu rosného bodu směsi spalin se vzduchem. Díky tomu je menší náchylnost ke kondenzaci vody v komíně.



Obrázek 22 - Regulátor komínového tahu firmy VERNER [38]

7.4 Tvarovky

Během spalování paliva dochází k tepelnému namáhání stěn kotle, což může při dlouhodobém provozu vyústit i ve zničení izolačního materiálu topného tělesa. Poškození izolace má za následek mj. teplotní namáhání samotného topného tělesa a s tím související vysokou ztrátu tepla sáláním, která se projeví ve snížení celkové účinnosti zařízení. K potlačení uvedeného problému slouží tzv. tvarovky, tedy součásti, jež se umísťují do spalovacího prostoru. [39]

Tvarovky se vyrábí ze třech materiálů, a to z žárobetonu, vermikulitu a keramických vláken. Výhodou tvarovek vyrobených z žárobetonu je zejména jejich mechanická odolnost, což je důležité, neboť poškození tvarovek způsobuje praskliny, které způsobují postupnou degradaci komponentu a zhoršují mísení primárního vzduchu, kvůli čemuž dochází ke snížení teploty ve spalovací komoře. Dle umístění se tvarovky dále dělí na: [39]

- Tvarovky dvířek – slouží k ochraně izolace před mechanickým i chemickým poškozením. Dle principu je lze rozdělit na izolační a akumuláční. Izolační tvarovky slouží k odstínění a ochraně izolace a dvířek kotle. Akumulační tvarovky slouží jak k odstínění dvířek, tak zabránění jejich nadměrnému tepelnému namáhání a k nasměrování toku plynů do spalinových cest kotle.
- Tvarovky spalovací komory – zajišťují rovnoměrné mísení sekundárního vzduchu, zvyšují teplotu ve spalovací komoře a prodlužují teplotní spád kotle.



Obrázek 23 - Tvarovky dvířek a spalovací komory [39]

- Deflektory/rozrážeče plamene – využívají se především u kotlů na uhlí a pelety. Slouží k odstínění spalinových cest, k jejich ochraně před zanášením, k vytvoření turbulentního proudění plynů, což napomáhá k lepšímu spálení úletových částic a k rozrážení plamene, díky čemuž dochází k dokonalejšímu spálení prchavých látek.



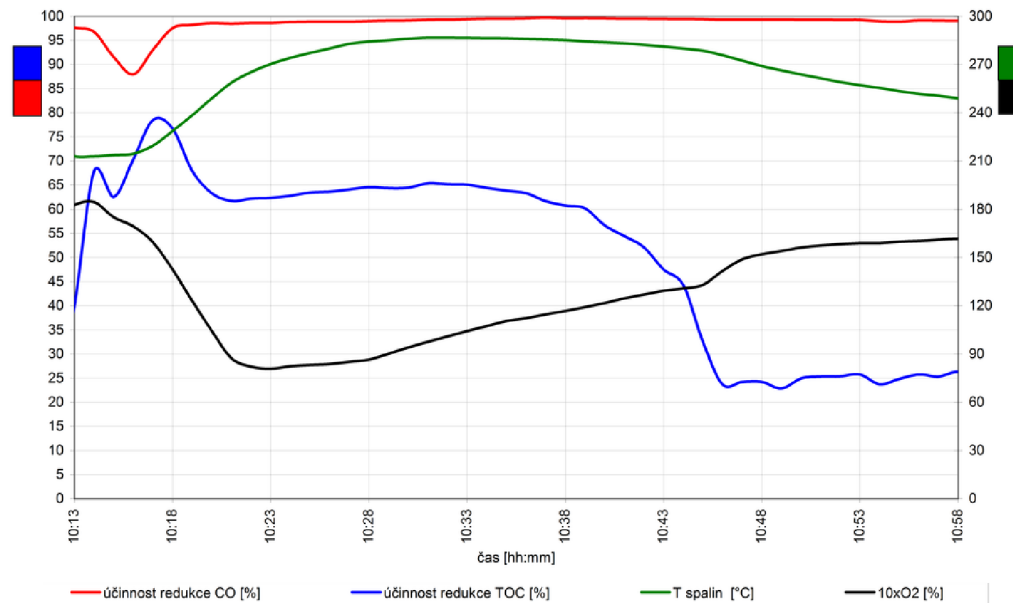
Obrázek 24 - Deflektor kotle na pelety a kotle na uhlí [39]

7.5 Katalyzátor

Katalyzátorem je v podstatě jakákoliv látka, která snižuje hodnotu energetické bariéry, jež je nutné překonat během reakce, tzn. umožňuje průběh reakce za podmínek, při kterých by bez přítomnosti katalyzátoru neproběhla.

Díky užití katalyzátoru lze snížit především vypouštění CO a OGC do ovzduší, což je vzhledem k ochraně ovzduší a stále se zpříšňujícím emisním limitům velmi žádoucí. Princip katalyzátoru spočívá v oxidaci CO na CO₂ a OGC na H₂O a CO₂. Využívají se převážně v automobilismu, kde mimo výše uvedené slouží i k redukci vypouštěných NO_x. Při vhodné volbě katalyzátoru lze docílit snížení emisí CO až o 96 % a OGC až o 60 %. Vzhledem k nutnosti co největší reakční plochy jsou katalyzátory vyráběny ve tvaru včelích pláství, viz obrázek 26. Nejprve je vyrobena tzv. nosná mříž z běžného kovu, popř. keramiky, a až na ni je následně nanášena vrstva samotného materiálu, a to z důvodu užití velmi drahých materiálů. Nejběžnějším užívaným prvkem je platina a palladium, nicméně se využívají i jiné, např. cín, měď, nikl, vanad. Volba materiálu závisí především na druhu spalovaného paliva a

dosahovaných spalovacích teplot, tzn. katalyzátor vhodný do kotle na dřevo může být pro spalování uhlí naprosto nevhodný a naopak. Ačkoliv se může zdát, že se jedná o finančně náročné zařízení, opak je pravdou. Ceny katalyzátorů se pohybují v závislosti na použitém materiálu do několika tisíc korun a dosahují životnosti až 6 let.



Obrázek 25 – Průběh účinnosti katalyzátoru během spalovací zkoušky [40]

Mezi nevýhody katalyzátorů patří především zanášení a s tím související tlaková ztráta. Zařízení je nutné jednou za měsíc vyčistit od nánosu. Intenzitu zanášení lze zmírnit jeho vhodným umístěním ve spalovacím zařízení, a to v oblasti vysokých teplot, tzn. za spalovací komoru. Rychlost zanášení lze také snížit odstavením katalyzátoru během rozhořívání a dohořívání paliva. K tomu běžně slouží sekundární spalinová cesta, kterou jsou spaliny vedeny právě během nedokonalého spalování. Jakmile je v kotli dosaženo požadované spalovací teploty, tak jsou již spaliny vedeny primární spalovací cestou přes katalyzátor.

Užívání katalyzátorů je naprosto běžné v USA, zatímco v Evropě nejsou zatím příliš rozšířeny, vyjma Norska, kde existují i rozdílné emisní limity pro produkci TZL z kotlů s katalyzátorem a bez něj. V brzké době lze v Evropě ovšem očekávat stále častější aplikace katalyzátorů vzhledem k jeho pozitivním vlastnostem, nízké ceně a stále se zpřísňujícím legislativním požadavkům. [40], [41]



Obrázek 26 – Platinový katalyzátor s kovovou mříží (vlevo) a ucpaný katalyzátor [40]

Závěr

Během několika desítek let rostlo množství spalovacích zařízení na tuhá paliva určených k vytápění domácností. Nekontrolované vypouštění škodlivých látek vedlo k přijetí legislativních opatření za účelem zlepšení kvality ovzduší a ochrany obyvatel před vlivem škodlivých látek. V roce 2002 byl přijat zákon č. 86/2002 Sb., který byl v roce 2012 nahrazen zákonem 201/2012 Sb, O ochraně ovzduší. Ten předepisuje emisní požadavky na kotle o příkonu do 300 kW, stanovuje povinnost nechat provést jednou za tři roky kontrolu kotle a zakazuje spalování hnědého uhlí, lignitu a uhelných kalů. V roce 2013 byly v ČR přijaty technické normy EN ČSN 303-5, které stanovují požadavky na výrobu a provoz kotle o výkonu do 500 kW a předepisují emisní limity škodlivých látek a minimální účinnost při jmenovitém výkonu. Dle normy jsou výrobci povinni provést před uvedením kotle na trh zkoušku typu, kdy je dle dosažených limitů kotli přiřazena tzv. třída. V roce 2019 vyšla v platnost norma ČSN EN 16510-1, která definuje emisní limity pro lokální topidla a ve srovnání s normou pro kotle je velmi benevolentní. Nařízení EU 2015/1189 navíc definuje požadavky na ekodesign, které budou muset splňovat všechny kotle o výkonu do 500 kW uvedené na trh či do provozu od 1. 1. 2020. Požadavky na ekodesign se nevyhnou ani lokálním topidlům, pro které budou platné od 1. 1. 2022.

Během posledních let dochází vlivem legislativního tlaku na provozovatele a dotačních programů k výměnám starých prohořivacích kotlů za nové, především automatické či zplyňovací dosahující nejvyšší třídy, což vede ke zlepšení kvality ovzduší. Aby byl naplno využit potenciál nových kotlů, je třeba provést legislativní úpravy, a to především v oblasti kontroly dodržování emisních limitů za provozu těchto kotlů, které jsou běžné v Německu či Rakousku. Naše legislativa se o takových kontrolách vůbec nezmiňuje, a přitom by namátkové kontroly emisních limitů vedly ke snížení škodlivých látek v ovzduší, neboť by byli lidé nuceni kotle provozovat optimálně.

Dále se jeví jako vhodné zpřísnění legislativních požadavků, a to především emisních limitů škodlivých látek, což by vytvořilo tlak na výrobce spalovacích zařízení, kteří by byli nuceni k aplikaci již odzkoušených ale stále ne plně rozšířených inovací.

Významnou inovací je lambda sonda, která slouží k monitorování množství kyslíku ve spalínách, na jehož základně řídicí jednotka upravuje množství přiváděného spalovacího vzduchu. Její aplikaci lze docílit maximální účinnosti spalování s minimem emisí. Vzhledem k vysoké pořizovací ceně a náchylnosti na poškození není ovšem vhodná do všech kotlů. Nutností je provádět pravidelné kontroly její funkčnosti, protože nesprávně měřící sonda může způsobit špatný přívod spalovacího vzduchu, což vede k nedokonalému spalování a snížení účinnosti. Turbulátory vytvářejí turbulentní proudění, což vede k lepšímu přenosu tepla do stěn. Ke správné funkci kotle je nutné jejich pravidelné čištění z důvodu zanášení, které má za následek zvýšení tlakové ztráty. U spalovacích zařízení, kde je proměnlivý komínový tah, se jeví jako vhodné využití regulátoru spalínového tahu. Zařízení je schopné spolehlivě stabilizovat komínový tah, což má zásadní vliv na kvalitu hoření. Ke zvýšení ochrany izolačního materiálu kotle a zlepšení spalování slouží tvarovky, které jsou vyrobeny převážně ze žarobetonu nebo keramiky. Jelikož jsou náchylné k mechanickému poškození, je nutné dbát na pravidelné kontroly jejich technického stavu.

Jako vhodnou považují aplikaci katalyzátoru, jehož potenciál je obrovský, neboť není cenově náročný a je schopný zásadně snížit tvorbu emisí, především oxidu uhelnatého a organických uhlovodíků. Ve většině zemí v Evropě, vyjma Norska, je katalyzátor nevyužitý, avšak vzhledem k jeho potenciálu lze v dohledné době očekávat jeho aplikaci v nově uváděných spalovacích zařízeních.

Seznam použitých zdrojů

- [1] Kotle a výměníky tepla. *Kotle a výměníky tepla*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013, s. 15. ISBN 978-80-214-4770-7.
- [2] Spalování tuhých paliv. *Http://spalovaci-procesy.wz.cz* [online]. 2011 [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: <http://spalovaci-procesy.wz.cz/TP.html>
- [3] *Biomasa* [online]. b.r. [cit. 2019-03-05]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/biomasa-vyuziti-zpracovani-vyhody-a-neyhody>
- [4] Srovnání výhřevnosti dřevního paliva. *Vytapeni.tzb-info.cz* [online]. b.r. [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/12-vyhrevnosti-a-merne-jednotky-palivoveho-dreva>
- [5] Vlhkost dřeva a vliv na topení. *Optimtop.cz* [online]. b.r. [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <https://www.optimtop.cz/vlhkost-dreva-a-vliv-na-topeni/>
- [6] Dřevní štěpka. *Biom.cz* [online]. b.r. [cit. 2019-03-05]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/drevni-stepka-zelena-hneda-bila>
- [7] Pelety z biomasy. *Biom.cz* [online]. b.r. [cit. 2019-03-05]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/pelety-z-biomasy-drevene-rostlinne-kurove-pelety>
- [8] Topíme peletami. *Oze.tzb-info.cz* [online]. b.r. [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/peletky/9744-topeni-pohledem-ekonomy-topime-peletami-ii-dil>
- [9] Brikety z biomasy. *Biom.cz* [online]. b.r. [cit. 2019-03-05]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/brikety-z-biomasy-drevene-rostlinne-smesne-brikety>
- [10] KAMEŠ, Josef. *Fosilní paliva*. 2. Praha, 2012. ISBN 978-80-260-3499-5.
- [11] Výhřevnosti paliv. *Vytapeni.tzb-info.cz* [online]. b.r. [cit. 2019-03-07]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/11-vyhrevnosti-paliv>
- [12] *Srovnání výhřevnosti paliv* [online]. b.r. [cit. 2019-03-13]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/11-vyhrevnosti-paliv>
- [13] *Uhlí* [online]. b.r. [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl?uhli>
- [14] *Neenergetické využití lignitu* [online]. Brno, 2008 [cit. 2019-03-07]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=3359. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [15] *Kotle malých výkonů* [online]. b.r. [cit. 2019-03-14]. Dostupné z: <http://www.iczt.cz/cs/doc/kotleMV.pdf>
- [16] Vytápění. *Publi.cz* [online]. b.r. [cit. 2019-03-14]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/176/02.html>
- [17] *Malá spalovací zařízení na pevná paliva* [online]. b.r. [cit. 2019-03-14]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/dokumenty/54804/62605/648651/priloha001.pdf>

- [18] *Jaké parametry musí splňovat kotle na tuhá paliva* [online]. 2017 [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/15865-jake-parametry-musi-splnit-kotle-na-tuha-paliva>
- [19] Grafická ročenka. *Český hydrometeorologický ústav* [online]. b.r. [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/17groc/gr17cz/Obsah_CZ.html
- [20] NOSKIEVIČ, Pavel, Pavel KOLIČNÝ a Tadeáš OCHODEK. *Malé zdroje znečišťování*. ;. Ostrava: VEC, 2004.
- [21] *Zplyňovací kotel* [online]. b.r. [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/obrazek/zplynovaci-kotel-na-drevo-guntamatic-synchro>
- [22] *Zákon č. 201/2012 Sb.o ochraně ovzduší* [online]. b.r. [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-201/zneni-20190101#f4732138>
- [23] *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. b.r. [cit. 2019-04-26]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/dokumenty/54804/62605/648651/priloha001.pdf>
- [24] *Ztráty kotle* [online]. b.r. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/8644-o-spalovani-tuhych-paliv-v-lokalnich-topenistich-2>
- [25] *Chemie životního prostředí: Těkavé organické látky. MB-eko* [online]. b.r. [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <http://www.mb-eko.cz/sites/default/files/chzp-iii-atmosfera-11-vocs.pdf>
- [26] *Kotle pro ústřední vytápění*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [27] *Jaké parametry musí splňovat kotle na tuhá paliva* [online]. 2013 [cit. 2019-04-17]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/9665-jake-parametry-musi-splnit-kotle-na-tuha-paliva-legislativa-v-cr-a-evrope>
- [28] *Narizení komise EU 2015/1189*. In: . 2015. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015R1189&from=CS>
- [29] *Jaké parametry musí splnit kamna, krbové vložky a sporáky 2017* [online]. b.r. [cit. 2019-04-26]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/16415-jake-parametry-musi-splnit-kamna-krbove-vlozky-a-sporaky-na-tuha-paliva-legislativa-v-cr-a-evrope-stav-v-roce-2017>
- [30] *Lambda sonda BOSCH* [online]. b.r. [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: https://www.eccmec.it/image/data/prodotti/Cataloghi/Lambda%20sensors.pdf?fbclid=IwAR1c5ScXSZAbyd9WrRtPODaGX4jzB3_j2I8_cuMpJTRjcGPhxiJxfeTGNPU
- [31] *Lambda sonda 2* [online]. b.r. [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: https://www.pietro-eshop.cz/clanky-navody/_zobraz=vite--k-cemu-slouzi-lambda-sonda-a-jak-poznate-jeji-poskozeni
- [32] *Oxygen sensors* [online]. b.r. [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: <http://www.walkerproducts.com/o2-sensor-training-guide/types-and-function/>
- [33] *Dakon turbulátor* [online]. b.r. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: https://www.dilynakotle.cz/dakon-turbulator_z6436/

- [34] *Dakon turbulátor DOR F* [online]. b.r. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.dakon.cz/wp-content/uploads/2017/01/DOR-4F-navod-k-obsluze.pdf>
- [35] *Turbulátor ATTACK* [online]. b.r. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://www.attack.sk/cz/kotle-na-drevo/zplynovaci-kotle-slx/attack-slx-25-profi/>
- [36] *Kominový tah* [online]. b.r. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/kominy-a-kourovody/12277-kominovy-tah-podstata-vyznam-a-mereni>
- [37] *Regulátor kominového tahu* [online]. b.r. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://www.nejenkrby.cz/navody/regulatory-kominoveho-tahu-nepoustite-penize-kominem>
- [38] *Regulátor kominového tahu VERNER* [online]. b.r. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: http://www.kotle-verner.cz/data/sharedfiles/3179/cz_regulator_kominoveho_tahu_cerveny.pdf
- [39] *Žárové tvarovky* [online]. b.r. [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.lac.cz/cs/zarobetonove-tvarovky>
- [40] *Katalyzátor* [online]. b.r. [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/10022-potencial-vyuziti-katalyzatoru-pri-spalovani-dreva-v-domacnostech>
- [41] *Katalyzátor 2* [online]. b.r. [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <https://whitebeam.net/2019/occ.html>

Seznam použitých symbolů a zkratk

Symbol	Veličina	Jednotka
h	Podíl hořlaviny v palivu	[-]
A^r	Podíl popeloviny v palivu	[-]
W^r	Podíl vody v palivu	[-]
w	Hmotnostní vlhkost paliva	[%]
m_w	Hmotnost vody v palivu	[kg]
m	Hmotnost paliva	[kg]
Q_s	Spalné teplo	[kJ·kg ⁻¹]
V	Vodní hodnota kalorimetru	[kJ·K ⁻¹]
ΔT	Rozdíl teplot vody v kalorimetru	[K]
Q_i^r	Výhřevnost	[kJ·kg ⁻¹]
r	Výparné/kondenzační teplo vody	[kJ·kg ⁻¹]
H_2	Podíl vodíku v surovém palivu	[-]
\bar{S}	Měrná simatost	[g·kJ ⁻¹]
S	Obsah Síry v palivu	[g·kg ⁻¹]
η_k	Účinnost kotle	[%]
\dot{m}_w	Hmotnostní průtok vody kotlem	[kg·s ⁻¹]
\dot{m}_p	Hmotnostní průtok spalovaného paliva kotlem	[kg·s ⁻¹]
$\dot{i}_{v,out}$	Entalpie vody na výstupu z kotle	[kJ·kg ⁻¹]
$\dot{i}_{v,in}$	Entalpie vody na vstupu do kotle	[kJ·kg ⁻¹]
ξ_{mn}	Ztráta hořlaviny v tuhých zbytcích	[%]
ξ_f	Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků	[%]
ξ_{cn}	Ztráta prchavé hořlaviny ve spalinách	[%]
ξ_k	Ztráta fyzickým teplem spalin	[%]
ξ_{sv}	Ztráta sdílením tepla do okolí	[%]