



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

KOTLE NA TUHÁ PALIVA

BOILERS FOR SOLID FUEL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michal Hotový

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Michal Hotový
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.
Akademický rok:	2017/18

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:

Kotle na tuhá paliva

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Domovní vytápění tuhými palivy zažívá díky nízkým cenám paliva svoji reinkarnaci a to i přes velkou snahu snižování negativních ekologických vlivů tohoto zdroje. Hlavní náplní práce je porovnání různých tuhých paliv v kotli. Zkoumán bude především dopad na účinnost a kvalitu spalování.

Cíle bakalářské práce:

- rešerše dostupných druhů tuhých paliv a jejich úprav pro domovní vytápění
- vlastnosti paliv
- přehled kotlů na tuhá paliva
- experiment posouzení kvality spalování pro uhlí a kusové dřevo

Abstrakt

Cílem bakalářské práce je zpracovat rešerši na téma kotlů na tuhá paliva a dále popsat samotná paliva. Ve druhé části bakalářské práce změřím a porovnáám emise a účinnost spalování dřeva a uhlí.

Abstract

The task of this bachelor thesis is write up a research about solid fuel boilers and describe solid fuels. In second part of bachelor thesis I make an experiment. I measure an emission and efficient burning wood and coal.

Klíčová slova

Kotel, uhlí, biomasa, spalování, emise, účinnost, emisní limity

Keywords

Boiler, coal, biomass, combustion, emissions, efficiency, emission limits

Bibliografická citace

HOTOVÝ, M. Kotle na tuhá paliva. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 55 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D..

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že tato práce je mým osobním dílem, které jsem zpracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Marka Baláše, Ph.D. s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne

Hotový Michal

Poděkování

Děkuji mému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Marku Balášovi Ph.D. za vstřícný a přátelský přístup při konzultačních schůzkách a rychlé reakce při každé žádosti o pomoc.

Obsah

1	Úvod	11
2	Tuhá paliva	12
2.1	Složení paliv	12
2.1.1	Hořlavina	12
2.1.2	Popelovina	13
2.1.3	Voda.....	14
2.2	Výhřevnost	15
2.2.1	Mendělejevův vztah.....	15
2.3	Spalné teplo.....	15
2.4	Sírnatost.....	16
3	Uhlí.....	16
3.1	Rozdělení.....	17
3.1.1	Lignit.....	17
3.1.2	Hnědé uhlí.....	18
3.1.3	Černé uhlí.....	19
3.2	Druhy uhlí	19
4	Biomasa	20
4.1	Dřevo.....	22
4.2	Pelety.....	22
4.3	Brikety.....	23
5	Kotle na tuhá paliva.....	23
5.1	Kotle na tuhá paliva podle způsobu přívodu paliva	24
5.2	Technologie spalování	25
5.3	Kotle podle druhu spalovaného paliva	27
5.3.1	Kotle na uhlí.....	27
5.3.2	Kotle na pelety	27
6	Emise znečišťujících látek.....	28
6.1	Legislativní požadavky	28
	Emise	28
7	Účinnost.....	31
7.1	Ekodesign.....	31

8	Měření emisí a účinnosti	32
8.1	Palivo	33
8.2	Výhřevnost paliv	33
8.3	Přístroje	34
8.4	Průběh měření	35
9	Měření emisí	36
9.1	První měření – brikety	36
9.2	Druhé měření – brikety	37
9.3	Porovnání měření - brikety	39
9.4	Třetí měření – dřevo	40
9.5	Čtvrté měření – dřevo	41
9.6	Porovnání měření – dřevo	43
9.7	Výsledné hodnoty z měření	43
9.8	Porovnání měření – brikety x dřevo	43
10	Účinnost	44
10.1	Přímá metoda	44
10.2	Nepřímá metoda	45
10.3	Nepřímá metoda stanovení účinnosti	47
10.3.1	1. Měření – Brikety	47
10.3.2	2. Měření – Brikety	48
10.3.3	3. Měření – Dřevo (buk)	50
10.3.4	4. Měření – Dřevo (buk)	51
10.4	Přímá metoda stanovení účinnosti	53
10.5	Vyhodnocení účinností	53
11	Závěr	55
12	Seznam použité literatury	56
12.1	Obrázky	58
12.2	Grafy	58
13	Seznam symbolů	59

1 Úvod

Kotle na tuhá paliva se používají k vytápění rodinných domů, nebytových prostor a k přípravě teplé vody. Mezi tuhá paliva patří uhlí, dřevo, biomasa a pelety. Kotle na tuhá paliva využívá více jak 500 000 domácností pouze v České republice.

V oblasti vývoje kotlů na tuhá paliva v poslední době došlo k mnoha vylepšením, například vzniku automatického kotle se šnekovým podáváním paliva. Dalším prvkem jsou ocelové a litinové výměníky s dlouhou životností a také větší účinnost samotného kotle. Technická vyspělost se určuje podle emisních tříd, která zohledňuje především množství vypouštěných emisí.

Mezi nejpoužívanější paliva patří uhlí, které patří mezi paliva neobnovitelná, mezi obnovitelnými palivy se nejvíce používá dřevo, biomasa a pelety.

Cílem bakalářské práce je popsat jednotlivé druhy tuhých paliv, jejich vlastnosti, produkci, využití. V druhé části bakalářské práce se zaměřím na rozdělení kotlů na tuhá paliva. A nakonec, v poslední části provedu měření emisí a účinnosti při spalování dřeva a uhlí.

2 Tuhá paliva

Palivo je všeobecné označení pro chemický prvek, sloučeninu, popřípadě směs, která za vhodných vnějších podmínek má schopnost začít a udržet chemickou reakci spalování [1]. Ke spalování dochází při vysokých teplotách, přístupu kyslíku a hořlavé látky k uvolňování tepelné energie. Od tuhých paliv očekáváme především vhodné fyzikální vlastnosti, například velkou výhřevnost, vhodnou teplotu zápalu, dostatečnou rychlost hoření, vhodné chemické složení a s tím související obsah škodlivých látek po spalování. Mezi velmi důležité faktory patří také finanční aspekt, dostupnost daného paliva, bezpečnost přepravy a možnost bezpečného uskladnění.

Paliva můžeme rozdělit mezi dvě hlavní skupiny, palivo pocházející z obnovitelného a neobnovitelného zdroje. Obnovitelná energie pochází z produktů, které se v určitém časovém měřítku mohou obnovit, nebo jsou „nevyčerpatelné“, do této skupiny patří biomasa, sluneční a větrná energie a geotermální energie. Mezi paliva pocházející z neobnovitelných zdrojů se řadí především ropa, uhlí a zemní plyn.

Paliva také můžeme rozdělit podle skupenství. Mezi plynné skupenství se řadí zemní plyn, vodík, svítiplyn, LPG. Plynná paliva se dobře dopravují, skladují, mají vysokou výhřevnost a méně zatěžují životní prostředí. Kapalné paliva mají velkou škálu využití, nejvíce se používají v transportním průmyslu, kde je jejich výhodou snadná a bezpečná skladovatelnost. Mezi zástupce kapalných paliv patří ropa, a produkty pocházející z ní pocházející. Uhlí a biomasa patří mezi pevná paliva, protože jejich tvar a objem je stálý.

2.1 Složení paliv

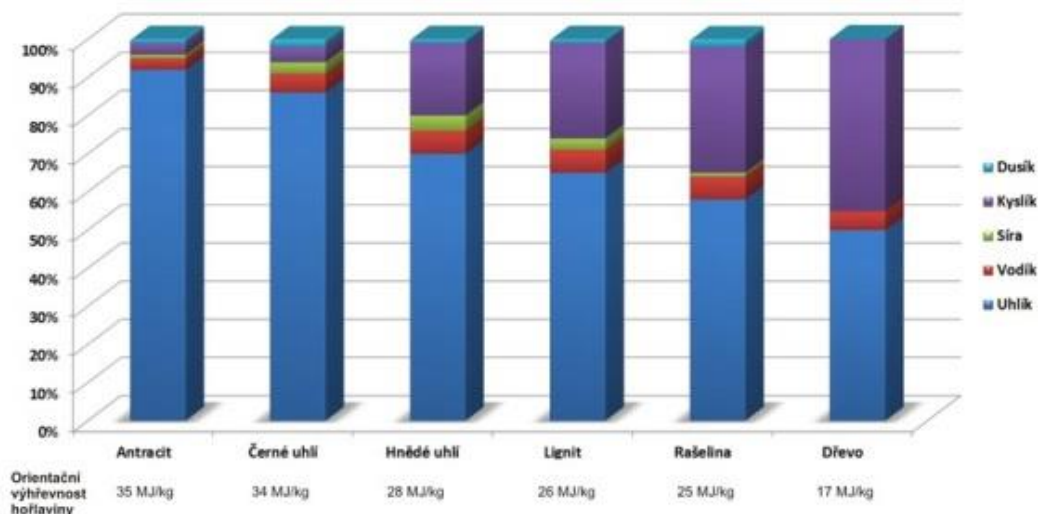
Palivo je látka, která hoří a při procesu spalování uvolňuje teplo. Palivo se skládá z hořlaviny (h) a balastu. Hořlavinou rozumíme část paliva, které při spalování produkuje teplo, je tedy nositelem energie. Balastem rozumíme tu část v palivu, které nepřináší žádný energetický zisk, jedná se o vodu (W) a popelovinu (A). K dosažení co nejlepší výhřevnosti, nebo kvality paliva, je potřeba snížit obsah vody a popeloviny. Se sníženým obsahem popeloviny se snižují emise tuhých látek (popel) a zmenšuje náročnost údržby kotle. [2]

2.1.1 Hořlavina

Je organická látka, která se skládá z pěti základních prvků: uhlíku, vodíku, kyslíku a malého množství dusíku a síry. Uhlík, vodík a kyslík ovlivňují vlastní proces spalování, zatímco zbylé prvky, dusík a síra ovlivňují produkci znečišťujících látek (oxid dusíku a oxid siřičitý).

Mezi aktivní prvky hořlaviny řadíme uhlík, vodík a síru, které jsou nositeli chemicky vázané energie uvolňující se při spalování. Pasivní složku hořlaviny zastupují kyslík a dusík, protože při jejich spalování nevzniká tepelná energie. Chemické složení hořlaviny je u jednotlivých paliv rozdílné, u starších paliv, která jsou již dostatečně prouhelněná, je vyšší zastoupení uhlíku (až 90 %), zatímco u mladších paliv, například u

dřeva nebo biomasy, je obsah uhlíku nižší (okolo 45 %), ale zase obsahují více kyslíku a vodíku. [2]



Graf 1- chemické složení tuhých paliv [2]

Hořlavina se dále může dělit na prchavou hořlavinu a tuhý zbytek. Stanovení obsahu prchavé hořlaviny se provádí rychlým ohřevem paliva v kelímku umístěném v peci po dobu 7 minut. Z měření vyplynulo, že geologicky starší paliva obsahují méně prchavé hořlaviny. U látky s vyšším obsahem prchavé hořlaviny (dřevo) dochází k hoření dlouhým plamenem, dále se daná látka snaze zapaluje. U látek s menším obsahem prchavé hořlaviny (antracit) si při hoření můžeme všimnout, že pouze žnou, a k zapálení je potřeba vyšší teplota. [3] Rozdílný plamen, a samotná teplota hoření mají za následek rozdílné konstrukce u kotlů na tuhá paliva.

Palivo	Prchavá hořlavina [%]	Popelovina [%]
antracit	6,4	10,5
černé uhlí	40,2	9,1
hnědé uhlí	40,8	5,2
rašelina	68	12
dřevo	78,6	1,5

Tabulka 1 - Podíl prchavé hořlaviny a popeloviny v jednotlivých palivech [4]

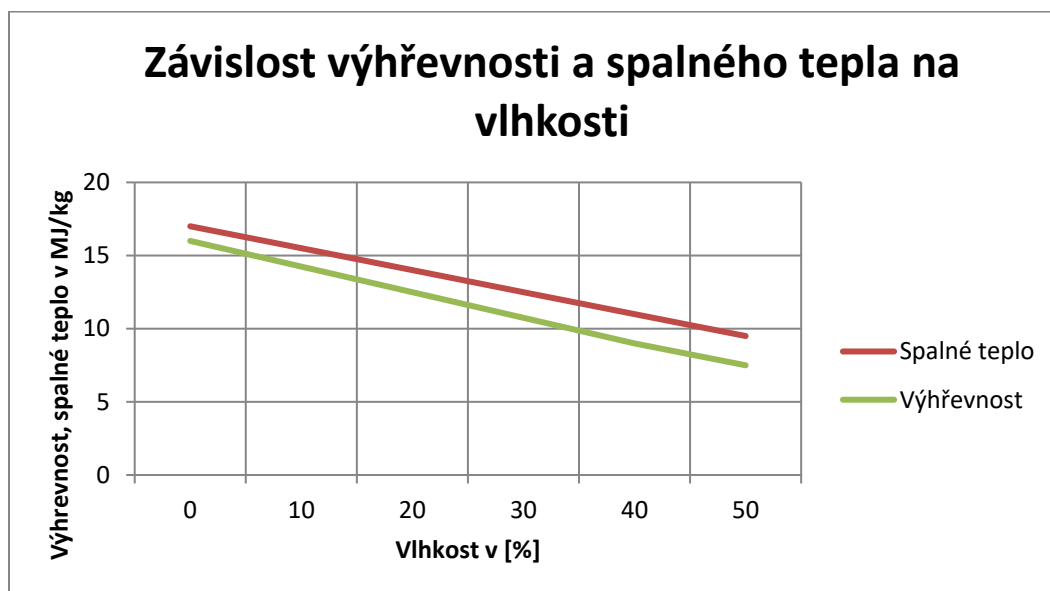
2.1.2 Popelovina

Jedná se o minerální látky (sírany, uhličitany a křemičitany) nacházející se v palivu před jeho spálením, které se nepodílejí na tvorbě energie při spalování. Po shoření paliva se zbývající látce říká popel. U popelu je důležité znát teploty měknutí, tání a tečení. Tyto teploty se určují pomocí předepsané rychlosti zahřívání trojbokého hranolu zkoumaného popela, kdy se změří teplota deformace a následně i teplota tečení. Tyto teploty jsou závislé na chemickém složení popela.

V kotli se může stát, že při teplotě vyšší, než je teplota měknutí může docházet k nalepování nánosů popela na vnitřní strany kotle a následnému snížení účinnosti kotle. V závislosti na teplotě spalování se může objevit popel v podobě škváry nebo strusky. [2]

2.1.3 Voda

Voda je stejně jako popelovina látka v palivu nežádoucí. S větším obsahem vody klesá výhřevnost paliva, protože dané palivo obsahuje menší množství aktivních prvků hořlaviny (C, H, S). Zatímco obsah popeloviny nemůžeme téměř redukovat, množství vody lze u biomasy (dřeva) výrazně snížit například sušením. Obsah vody u surového dřeva se pohybuje v rozmezí 40 až 60 %. Sušením v běžných podmínkách lze snížit obsah vody až na 20 % v průběhu dvou let. Vlivem snížení množství vody ve dřevě se jeho výhřevnost téměř zdvojnásobí, ze 7,5 MJ/kg na 13 MJ/kg u dřeva s 20 % vlhkosti. Samozřejmě dojde ke snížení hmotnosti dřeva o hmotnost vysušené vody. [2]



Graf 2 - závislost výhřevnosti a spalného tepla na vlhkosti [2]

Vysoký podíl vody v palivu dále negativně ovlivňuje další vlastnosti hoření, například snižuje spalovací teplotu, zvyšuje objem spalin a ztěžuje zapalování. Poměr hmotnosti vody a celkové hmotnosti vzorku se nazývá vlhkost.

$$W = \frac{m_v}{m} * 100$$

Kde je

W	– obsah vody v palivu neboli vlhkost [%]
m_v	– hmotnost vody v palivu [kg]
m	– celková hmotnost paliva [kg]

2.2 Výhřevnost

Výhřevnost je fyzikální veličina, která udává, jaké množství tepelné energie získáme úplným spálením 1 kg paliva, přičemž voda ve spalinách zůstane v plynné fázi. Výhřevnost závisí na chemickém složení dané látky a také na obsahu vlhkosti. Výhřevnost je dána vztahem:

$$H = \frac{Q}{m}$$

Kde je

H	– výhřevnost [J*kg ⁻¹]
Q	– teplo uvolněné spalováním [J]
m	– hmotnost látky [kg]

Výhřevnost paliv	
Dřevo palivové	14,62 MJ/kg
Dřevěné brikety	16,21 MJ/kg
HU tříděné – Most	17,18 MJ/kg
ČU energetické – Ostrava	29,21 MJ/kg
Lignit	8,79 MJ/kg
Brikety z hnědého uhlí	23,05 MJ/kg

Tabulka 2 - Výhřevnost paliv [5]

2.2.1 Mendělejevův vztah

Udává dolní výhřevnost podle známého složení paliva.

$$H_u = 33,913 m_C + 102,995 m_H - 10,885 (m_O - m_S) - 2,51m_{H_2O}$$

Kde je

m _C	– hmotnostní podíl uhlíku v palivu [%]
m _H	– hmotnostní podíl vodíku v palivu [%]
m _O	– hmotnostní podíl kyslíku v palivu [%]
m _S	– hmotnostní podíl síry v palivu [%]
m _{H₂O}	– hmotnostní podíl vody v palivu [%]
H _u	– dolní výhřevnost, jednotka [Kj*kg ⁻¹] [6]

2.3 Spalné teplo

Je definováno jako teplo, které se získá spálením jednotkového množství paliva s tím, že spaliny jsou ochlazené na původní teplotu paliva. Na rozdíl od výhřevnosti u spalného tepla veškerá voda obsažená ve spalinách zkondenzuje, a tudíž je na konci experimentu v kapalném stavu.

2.4 Sirnatost

Síra se vyskytuje ve všech typech uhelných paliv a také i v topných olejích. Přítomnost síry v palivu je nežádoucí, protože snižuje výhřevnost paliva, výhřevnost síry je zhruba třetinová proti výhřevnosti uhlíku. Zvýšená koncentrace síry v tuhém palivu má za následek korozi, zalepování vnitřních ploch a struskové nánosy, dále v uhlí při zvýšeném obsahu síry může docházet k samovznícení. V neposlední řadě při spalování paliva se sírou dochází k oxidaci a do ovzduší se uvolňuje SO₂, jedovatý plyn, který způsobuje kyselý dešť. V praxi se obsah síry v palivu snižuje, nebo u tepelných elektrárn se spaliny odsiřují.

Pro popis množství síry v palivu se používá tzv. měrná sirnatost S, která udává kolik gramů síry připadá na 1 MJ výhřevnosti. [7]

$$S = \frac{10 \cdot S}{Q} \quad [\text{g/MJ}]$$

Palivo	Poměrný obsah síry [%]	Výhřevnost [MJ/kg]	Měrná sirnatost [g/MJ]
Mazut	3	41	0,731
Černé uhlí	0,9 - 2,5	17,6 - 27,2	0,33-0,68
Hnědé uhlí	0,8 - 1,2	9,2-13,4	0,60-1,86
Lignit	0,6	7,6	0,754

Tabulka 3 - Sirnatost vybraných paliv [7]

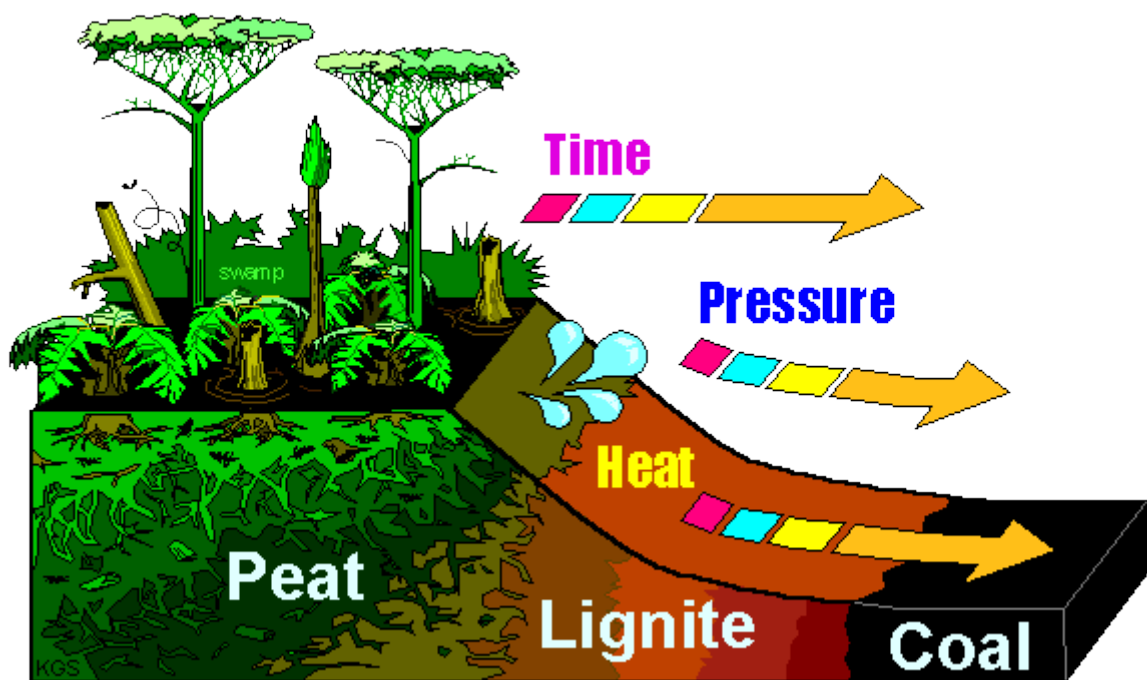
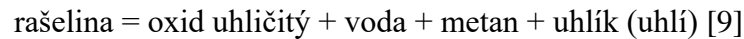
3 Uhlí

Uhlí je hnědá, černá nebo hnědo-černá hořlavá hornina používaná jako palivo. Získává se dolováním z povrchových nebo hlubinných dolů. Uhlí je složeno především z uhlíku, vodíku, kyslíku ale obsahuje i další chemické prvky jako je síra a velmi malé množství uranu. Uhlí je nedílnou součástí našich životů již od dob průmyslové revoluce, jelikož tvoří velmi důležitou energetickou surovinu. V celosvětovém měřítku je uhlí druhou nejvyužívanější energetickou surovinou na světě, hned za ropou. Roční celosvětová spotřeba uhlí je okolo 7,8 miliardy tun, z toho se asi $\frac{3}{4}$ spotřebovaly v tepelných elektrárnách, kde přispěly ke 40 % světové produkce elektřiny [8].

Většina uhlí se začala tvořit před cca 300 miliony let v období karbonu. Uhlí se vytvářelo v bažinných ekosystémech (deltý řek, jezerní pánve) z těl pravěkých rostlin. Rostliny během svého růstu nejdříve vytvářely ze vzduchu, vody a minerálních látek uhlovodíky. Po odumření začaly rostliny klesat pod hladinu bažiny, kde se bez přístupu vzduchu nemohly rozložit biologickými procesy. Tento proces, kdy odumřelá těla rostlin klesala pod hladinu bažiny se neustále opakoval. Vrstva odumřelých rostlin neboli rašelina se postupem času dostávala stále níže pod povrch. Tím docházelo ke zvýšení teploty, tlaku a následnému vytěšňování vody a zvýšení obsahu uhlíku. Vědci se

domnívají, že na 1 metr uhelného sloje bylo potřeba asi 30 metrů rašeliny. Čím déle tento proces pokračoval, tím kvalitnější výsledné uhlí bylo. Nejdokonalejším produktem zuhelňování je grafit, který obsahuje téměř 100 % uhlíku [9].

Přeměnu biologického materiálu na uhlí vyjadřuje rovnice:



Obrázek 1- Vznik uhlí [11]

3.1 Rozdělení

Uhlí se dělí podle doby vzniku a z toho vyplívajícím vlastnostem, jako je například chemické složení a výhřevnost. Uhlí můžeme rozdělit na lignit, hnědé uhlí, černé uhlí a koks.

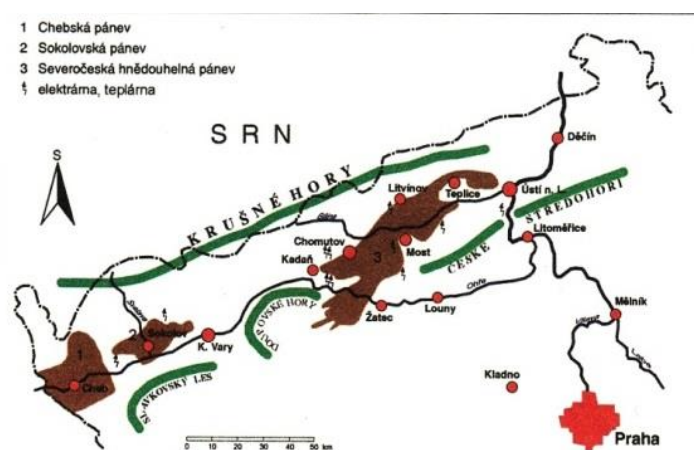
3.1.1 Lignit

Druh hnědého uhlí, které je nejméně kvalitní a začalo vznikat v období třetihor – před 60 miliony let. Může obsahovat menší úlomky dřev a zachovalé kmeny. Obsahuje 40-60 % uhlíku, cca 50 % vody a síru. Největší využití má lignit jako palivo pro tepelné elektrárny. Výhřevnost lignitu je okolo 8,8 MJ/kg. V dnešní době se v České republice těží pouze na jižní Moravě v Mikulčicích u Hodonína.

3.1.2 Hnědé uhlí

Vlastnosti hnědého uhlí závisí především na stáří a geologických podmínkách. Hnědé uhlí bývá obvykle třetihorního původu, ale může být i starší, někdy druhohorního původu a výjimečně i prvohorního stáří. Obecně se dá říct, že je kvalitnější jak lignit, ale je méně kvalitní než černé uhlí. Výhřevnost hnědého uhlí je v rozmezí 15–20 MJ/kg. Kromě uhlíku, kterého obsahuje 50–60 %, obsahuje i velké množství síry, a to od 0,5 % do 2 %. Hnědé uhlí je velmi důležitou energetickou surovinou, ve střední Evropě se používá k produkci elektrické energie, a také k vytápění rodinných domů.

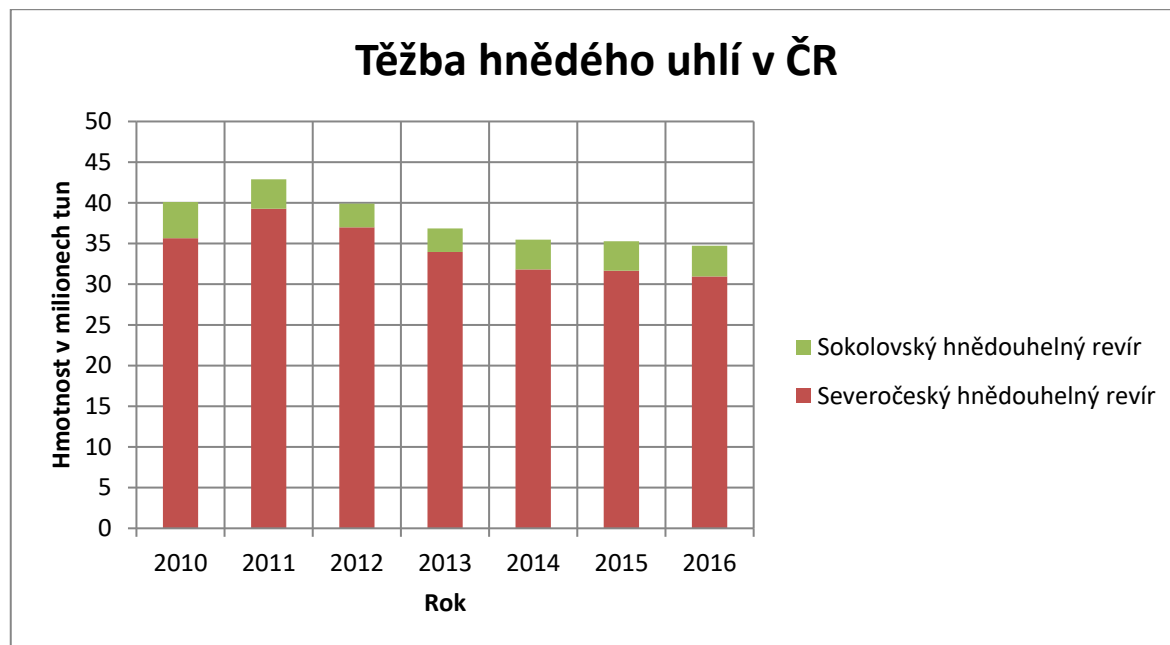
V České republice se hnědé uhlí těží v severních Čechách, v podhůří Krušných hor v chomutovsko-mostecké a sokolovské pánvi. V oblasti mostecké pánve se v období třetihor se nahromadila až 500 metrů vysoká vrstva jílu, písku a organické hmoty. Z této vrstvy se postupem času, vysokých teplot a tlaku vyvinula hnědouhelná sloj o mocnosti 25 až 45 metrů. Těžba hnědého uhlí probíhá povrchově, k dobývání suroviny je potřeba nejprve provést skrývku zeminy a odtěžení nadložních vrstev (jíly a písky). V severních Čechách těžba probíhá v několika lomech, největší jsou lomy Bílina, Nástup Tušimice a lom ČSA, které v roce 2016 vytěžily přes 22 milionů tun z celkových 35 milionů tun hnědého uhlí vytěženého v ČR.



Obrázek 2 - mapa hnědouhelných pánví

Zásoby hnědého uhlí jsou v severních Čechách až na sto let, ale jeho dobývání je omezeno usnesením vlády z roku 1991 o územních limitech těžby. V rámci těchto limitů lze v lomu ČSA těžit pouze do roku 2024, a po ukončení těžby se zde bude nacházet ještě cca 750 milionů tun hnědého uhlí. Při těžbě hnědého uhlí došlo ke mnoha změnám v krajině, byly například přerušeny některé vodní toky (řeka Bílina), přeloženy či zrušeny silnice. Po ukončení těžby se plánuje sanace a rekultivace, při níž vzniknou zatopením dnešních lomů jezera a zalesněné prostory. Jedním z největších hnědouhelných lomů v České republice je lom Nástup Tušimice, který se rozprostírá na 42 km² a ročně vytěží okolo 11,5 mil tun hnědého uhlí, 90 % se zpracuje v tepelných elektrárnách Pruněřov a Tušimice II. [10]

Při porovnání těžby hnědého uhlí v posledních letech, si můžeme všimnout, že dochází k mírnému poklesu těžby. V době největšího rozmachu hnědého uhlí v České republice v 80. letech 20. století se roční produkce pohybovala okolo 85 milionů tun uhlí.



Graf 3 - těžba hnědého uhlí v ČR [10]

3.1.3 Černé uhlí

Černé uhlí vzniklo v období prvohor a druhohor z organického materiálu. Ke svému vzniku potřebovalo větší tlak, který působil na odumřelé rostliny bez přítomnosti vzduchu. Zvýšení tlaku bylo docíleno tím, že organický materiál se dostával níže pod povrch, kde na něj nadložní vrstvy začínaly působit stále větší vahou. Černé uhlí se nachází nerovnoměrně rozloženo v nejsvrchnější zemské kůře. Doba prouhelnění je vyšší než u hnědého uhlí, a tudíž černé uhlí obsahuje vyšší množství uhlíku (75 % až 95%), mezi další látky patří vodík, dusík, voda a síra (0,5 % až 1,25%) [13]. Výhřevnost černého uhlí se pohybuje do $34 \text{ MJ} \cdot \text{Kg}^{-1}$ a je závislá na obsahu uhlíku v uhlí.

Černé uhlí se nejčastěji nachází v podzemí v hloubce od několika desítek až po několik stovek metrů, a proto je jeho těžba daleko náročnější než u hnědého uhlí. U nejhlubších lomů teplota dosahuje až $40 \text{ }^\circ\text{C}$ a vlhkost je okolo 100 %. Těžít se může několika způsoby, v České republice se využívá především stěnování. V černé uhlí se těží pouze v Ostravsko – karvinské pánvi, ale nachází se i v jiných částech České republiky. Většina lokalit ale byla uzavřena v 90. letech 20. století. [14,15]

3.2 Druhy uhlí

V České republice se nejvíce prodává hnědé uhlí. Při zpracování **hnědého uhlí** se snažíme dané uhlí roztrdit podle velikosti. Hnědé uhlí můžeme rozdělit na několik druhů. Hnědá kostka má zrnitost od 40 do 100 mm a používá se u kotlů s manuálním přiřkládáním, kde zaručuje delší dobu hoření jak uhlí s menší zrnitostí. Menší zrnitost má uhlí ořech 1 a to od 20 do 40 mm. Nejprodávanějším uhlím je ořech 2, který má zrnitost

od 10 do 25 mm a je vhodný především do automatických kotlů. Dále je potřeba uvést, že každý druh uhlí má přípustný obsah nadsítné a podsítné části. U Bílinského uhlí může být až okolo 10 až 15 % nadsítné, a maximálně 13 až 15 % podsítné části. Dalším rozdílem je cena, nejlevnější je ořech 2, který má nejmenší zrnitost, a naopak dražší je ořech 1 a kostka. Při zpracování uhlí vzniká také velké množství prachu, který je obvykle spalován v průmyslových závodech nebo tepelných elektrárnách. Z hnědého uhlí se také vyrábějí hnědouhelné brikety, které se vyrábějí jeho lisováním bez přidávání pojiv. Hnědouhelné brikety mají menší podíl vody a větší výhřevnost než hnědé uhlí, ale zase jsou dražší. U černého uhlí je rozdělení obdobné, taky máme kostku, ořech 1 a ořech 2 se stejnou zrnitostí jako u hnědého uhlí. [16]

4 Biomasa

Biomasa se řadí mezi obnovitelné zdroje energie a je to organická hmota rostlinného a živočišného původu. Jsou to těla živočichů, bakterií, hub, sinic a hlavně rostlin. Energií je teoreticky možné získat ze všech forem biomasy, protože základem živé hmoty je uhlík. Pro energetické účely má největší význam rostlinná biomasa. Biomasa má řadu výhod, například možnost využití nejen biologických odpadů, vyrovnaná bilance oxidu uhličitého, možnost využití v domácnostech a cenová dostupnost. Mezi nevýhody biomasy patří nízká účinnost při výrobě elektřiny, v některých případech nutnost úpravy a nutnost skladovacích prostor.

Podle obsahu vody rozlišujeme biomasu [17]

- **suchou** – zejména dřevo, dřevní odpady, sláma a další odpady. Výhodou je možnost přímého spalování, popřípadě po mírném vysušení.
- **mokrou** – především tekuté látky, zejména kejda a další odpady. Pro získání energie nutnost zpracování v bioplynových technologiích.
- **speciální biomasa** – olejniny, cukernaté a škrobové produkty. Využívá se speciálních technologií k získání energetických látek – především lihu a bionafty. [18]

Jedním ze zdrojů biomasy jsou energetické rostliny. Tyto rostliny mohou být jednoleté, ale i víceleté. Výhodou jednoletých rostlin je snadná změna pěstované rostliny, u víceletých rostlin je hlavní výhodou zabránění eroze půdy. Dalším typem je biomasa odpadní, která je v Evropě nejvíce vyhledávaným biopalivem kvůli její dostupnosti. Zpravidla se jedná o organický odpad. Odpadní biomasu dělíme na:

- **Rostlinné odpady** – například sláma, seno, zbytky po likvidaci křovin.
- **Lesní odpady** – vznikají při těžbě dřeva, patří sem pařezy, kořeny, větve. Dalším zdrojem dřevního odpadu je prvotní a druhotné zpracování dřeva.
- **Organické odpady z průmyslových výrob** – spalitelné odpady z dřevařských provozoven, odpady z cukrovarů, lihovarů.
- **Odpady z živočišné výroby** – největší zastoupení tvoří exkrementy hospodářských zvířat, zbytky krmiv a kejda.

- **Komunální organické odpady** – kaly z čistíren odpadních vod, biologický odpad z komunálního odpadu. [19]

Biomasa se skládá přibližně z 50 % uhlíku, 6 % vodíku a cca 40 % kyslíku. Obsahuje i další látky, například síru, chlór, dusík, ale pouze ve velmi malém množství. Obsah popela je také velmi malý, pohybuje se v rozmezí 1–5 %. Biomasa se považuje za neutrální palivo, to znamená, že i když se při spalování uvolňuje CO₂, tak během růstu biomasy se přibližně stejné množství CO₂ z atmosféry spotřebovalo. [20]

Výhřevnost biomasy je závislá na vlhkosti, v průměru se pohybuje okolo 12-19 MJ*Kg⁻¹. Zjednodušeně se dá říct, že čím nižší vlhkost, tím vyšší výhřevnost daného paliva. Při velké vlhkosti biomasy se velká část energie spotřebuje na její vypaření a spalování je nedokonalé. Pro dřevo se doporučuje vlhkost okolo 15 až 20 %, pro pelety je to cca 30 %.

Získávání energie z biomasy závisí na fyzikálních a chemických vlastnostech, především na obsahu sušiny v biomase. Pokud je obsah sušiny do 40 %, jedná se suché procesy, zejména spalování, zplynování a rychlá pyrolýza. U biomasy, která obsahuje více, než 40 % sušiny provádíme mokré procesy, nejčastěji metanové nebo alkoholové kvašení a kompostování.

Technologie k získávání energie z biomasy rozdělujeme podle způsobu zpracování

- **Termochemické přeměny**
 - Spalování – nejstarší a nejjednodušší metoda, kterou se uvolňuje energie vázaná ve spalovaném palivu na energii tepelnou. Jako palivo se využívá dřevo, brikety a pelety. Nejčastěji se vyprodukovaná energie používá k vytápění, ohřevu vody a výrobě elektrické energie.
 - Zplynování – termochemický proces, kdy z tuhých paliv získáme hořlavý plyn. Zplynování je poměrně náročný proces, který se provádí v reaktoru při vyšších teplotách a omezeném přístupu kyslíku. Je závislý na teplotě, tlaku obsahu vlhkosti v palivu a dobou setrvání složek v reaktoru.
 - Pyrolýza – termický rozklad látek bez přístupu kyslíku, tedy v atmosféře, ve které nedochází ke spalování. Produktem je pyrolýzní plyn nebo olej, které můžeme využívat jako palivo. [21]
- **Chemické přeměny v kapalném prostředí**
 - Zkapalňování – nízkoteplotní, vysokotlaký termochemický proces, který probíhá při teplotě do 350 °C a tlaku 12–20 MPa ve vodním prostředí. Produktem bio-olej se sníženým obsahem kyslíku a s vyšší energetickou hustotou. Proces zkapalňování je teprve ve fázi vývoje.
 - Esterifikace – proces, při kterém z olejnatých semen, zejména řepky, lnu a slunečnice vzniká lisováním olej. Ten se pomocí esterifikace mění na látku podobnou motorové naftě. Nevýhodou tohoto procesu je velmi vysoká cena bionafty, a snížení životnosti moderních vznětových motorů. [22]
- **Biochemické přeměny biomasy**

- Metanové kvašení – proces, který vzniká při rozkladu organických látek (hnůj, kal z čističky) bez přístupu vzduchu v uzavřených nádržích. Produktem je bioplyn, který obsahuje 50-80 % metanu, oxid uhličitý a další plyny. Výhřevnost bioplynu je až $24\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$. Bioplyn se používá k výrobě elektrické energie a ohřevu teplotnosného média.
- Alkoholové kvašení – proces, při kterém jsou rostlinné cukry přeměňovány na etanol. Vhodnými surovinami jsou cukrová řepa, kukuřice, obilí, brambory a ovoce. Kvašení může probíhat pouze v mokřím prostředí, a výsledný etanol je oddělen destilací. Etanol se může používat spalovacích motorech.
- Kompostování – proces, u kterého při přístupu vzduchu vzniká z biologického odpadu, organická hmota s humusovými látkami a rostlinnými živinami.
- Mechanické přeměny – nejčastěji se jedná o úpravu kusového dřeva, slámy a jiných odpadních produktů dřevovýroby. Materiál se může lisovat, drtit, peletovat nebo briketovat. [23]

4.1 Dřevo

Jedná se o palivo, které pochází z obnovitelných zdrojů. Kromě využití dřeva jako paliva, můžeme dřevo využít k výrobě nástrojů, nábytku, papíru. Palivové dřevo je velmi snadno dostupný přírodní materiál. Jako palivové dřevo se používá už nějak znehodnocené dřevo (pochází z polomů, je pokřiveno), které není vhodné na další zpracování. Pro vytápění je vhodné dřevo s vlhkostí dřeva 15 %, maximálně 20 %. U čerstvě káceného dřeva je vlhkost až 60 % a výhřevnost pouze $7,1\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, zatímco u několika let starého dřeva s obsahem vlhkosti 15–25 % výhřevnost dosahuje až $14\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ [24]. Mezi výhody dřeva patří jeho dostupnost, cenová výhodnost, doba skladovatelnosti, kdy pod přístřeškem vydrží i několik let. Mezi nevýhody můžeme zařadit nutnost uskladňovacích prostor, nutnost obsluhy kotle, práci štípání, řezání nebo uskladňování.

Dřevo můžeme rozdělit na měkké a tvrdé. Měkké dřevo pochází z jehličnatých stromů, vyznačuje se podobnou výhřevností jako tvrdé dřevo a rychleji rozpálí topeniště. Tvrdé dřevo pochází hlavně z listnatých stromů, ale na rozdíl od měkkého dřeva hoří pomaleji a poskytuje stabilní dlouhodobý žár. Jako palivo na zimu se doporučuje 3 díly tvrdého dřeva a 1 díl měkkého dřeva. [25]

4.2 Pelety

Dřevní pelety jsou vyráběny z pilin vznikajících zpracováním odkorněného dřeva. Piliny obsahují velké množství vody a pro výrobu pelet se musí vysušit na vlhkost 10 až 15 %. Sušení probíhá na pásových sušácích, kde jsou piliny profukovány horkým vzduchem. Po prosušení putují piliny do míchacího zařízení, kde získají konkrétní vlhkost, následně musíme upravit maximální velikost dřevní částice a to na 3 až 3,5 mm. Před lisováním je potřeba piliny povrchově zvlhčit, piliny se změkčí a výsledné lisování

probíhá při menších silách. Po lisování mají pelety vysokou teplotu a je potřeba je schladit. Následuje balení pelet. [26]

Výsledným produktem je peleta s nízkým obsahem popela a vysokou hustotou paliva. Mají vysokou výhřevnost, nízký obsah vody. Pelety lze spalovat pouze v kotlích k tomu určených.

4.3 Brikety

Brikety jsou podobně jako pelety vyráběny z biomasy, konkrétně z dřevního odpadu (dřevní piliny, hobliny nebo oprané kůry). Výroba briket probíhá podobně jako u pelet, jsou lisovány bez pojiv při velmi velkém tlaku. Při lisování vzniká vysoká teplota, a dochází k zatavení povrchu brikety. Briketa následně odolává vnějším vlivům, zejména vzdušné vlhkosti. Výsledným produktem jsou válcové a hranaté brikety.

Briketami lze topit ve všech typech kamen, kotlů na tuhá paliva, krbů apod. Brikety mají vysokou výhřevnost, až $19 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, nízký obsah popela a malý obsah vody. Oproti dřevu mají brikety delší dobu hoření a větší hustotu paliva.

5 Kotle na tuhá paliva

Kotel je zařízení, ve kterém dochází k přeměně energie uložené v palivu na energii tepelnou, která je dále pomocí média (obvykle vody) dále distribuována. Pro dobré hoření paliva a maximální zisk tepelné energie je potřeba vytvořit optimální podmínky spalování, například vhodným konstrukčním řešením, které nám zajistí dostatečný přísuv vzduchu k hoření, správnou teplotu spalování atd. Dnešní kotle jsou už převážně konstruovány na jeden typ paliva, u kterého může výrobce garantovat uvedené parametry, samozřejmě existují kotle, u kterých se k vytápění může použít více druhů paliv. [27]

Účinnost kotle je definována jako poměr výkonu (využitá energie) k příkonu (dodaná energie), a je jednou ze základních vlastností kotlů. Kotle mohou dosahovat účinnosti až okolo 90 %, nejvyšší účinnosti obvykle dosahují při provozu na jmenovitý výkon. [28]

Přenos tepla z kotle se děje pomocí konvekce a radiace. Konvekce neboli proudění je neuspořádaný pohyb částic. U tepelných výměníků pomocí konvekce dochází k tomu, že teplejší částice stoupají kapalinou nahoru, a proto nám stačí ohřívat pouze spodní část nádoby. Konvekci využíváme především u ústředního topení, nebo u akumulčních nádrží, kde je hlavním způsobem rozvodu tepla. Radiace neboli sálání, je přenos tepla, který se děje především u krbů nebo kamen.

Kotle můžeme rozdělit pomocí několika kritérií, například podle způsobu přísuvu paliva, nebo podle použité technologie spalování anebo podle druhu spalovaného paliva.

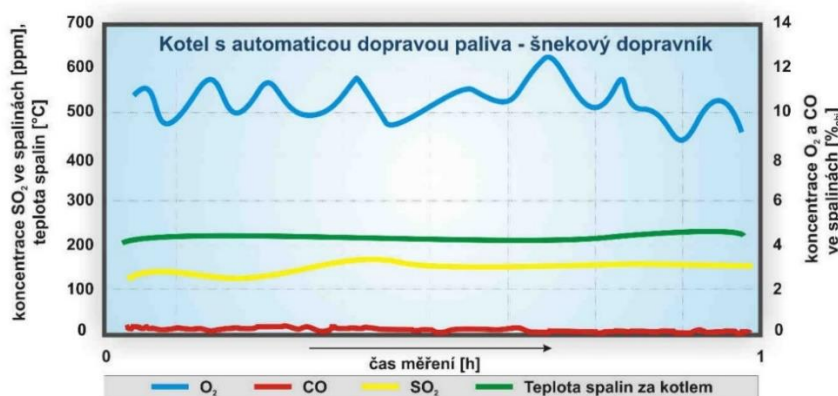
5.1 Kotle na tuhá paliva podle způsobu přívodu paliva

Kotle podle přívodu paliva můžeme rozdělit na kotle s manuálním přikládáním nebo s automatickým přikládáním.

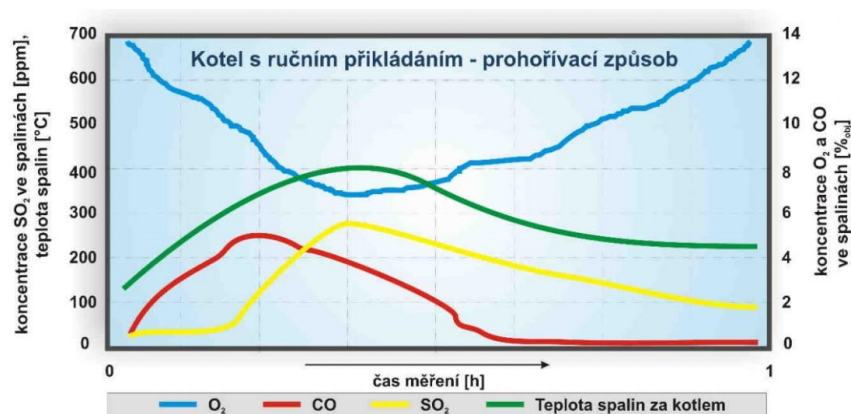
Manuální přikládání je především u kotlů, které jsou cenově dostupné. Nejrozšířenějším konstrukčním řešením je velkoobjemové ohniště, do kterého se manuálně přikládá palivo, většinou přes horní nebo boční dvířka. Palivo se v topeništi postupně zahřívá, vysušuje, uvolňuje se prchavá hořlavina, a následuje samotné hoření. Rychlost hoření je ovlivněna pomocí konstrukce kotle, nebo množstvím přivedeného vzduchu. Mezi nevýhody manuálního přikládání patří časté doplňování paliva, nemožnost levné a spolehlivé regulace přívodu spalovacího vzduchu do ohniště a tím i zvýšené produkce škodlivých látek. Dále je to nemožnost regulace tepelného výkonu kotle.

Automatické kotle jsou charakterizovány kontinuálním, nepřerušením dodáváním paliva do topeniště. K dopravě se využívají šnekové dopravníky, nebo válcové rošty. Proces dopravy paliva ovládá řídicí jednotka kotle, a díky plynulé dodávce paliva mají tyto kotle vysokou účinnost spalování, optimální podmínky hoření, stabilitu požadovaného výkonu a nízkou produkci škodlivých emisí. U automatických kotlů se můžeme setkat s různou konstrukcí topenišť, například topeniště se spodním přívodem paliva nebo topeniště se shazováním paliva.

Z následujících grafů si můžeme všimnout, že kvalita spalování je ovlivněna především délkou periody přikládání, kdy u ručního přikládání se pohybuje mezi 1–5 hodinami, u automatického kotle je to v řádů minut, a z tohoto důvodu je proces spalování stabilnější a kvalitnější. [27]



Graf 4 - spalování v automatickém kotli – průběh koncentrací



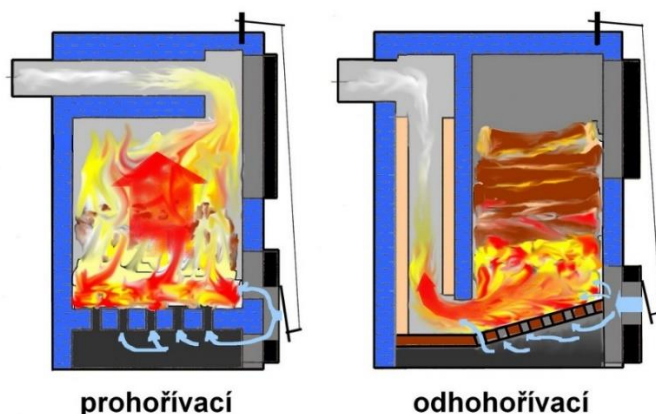
Graf 5 - spalování v kotli s ručním přikládáním – průběh koncentrací

5.2 Technologie spalování

Mezi nejrozšířenější technologie spalování v domácích kotlích na tuhá paliva patří odhořívání, prohořívání a zplyňování. Tyto metody jsou vhodné pro kotle s manuálním přikládáním uhlí nebo dřeva.

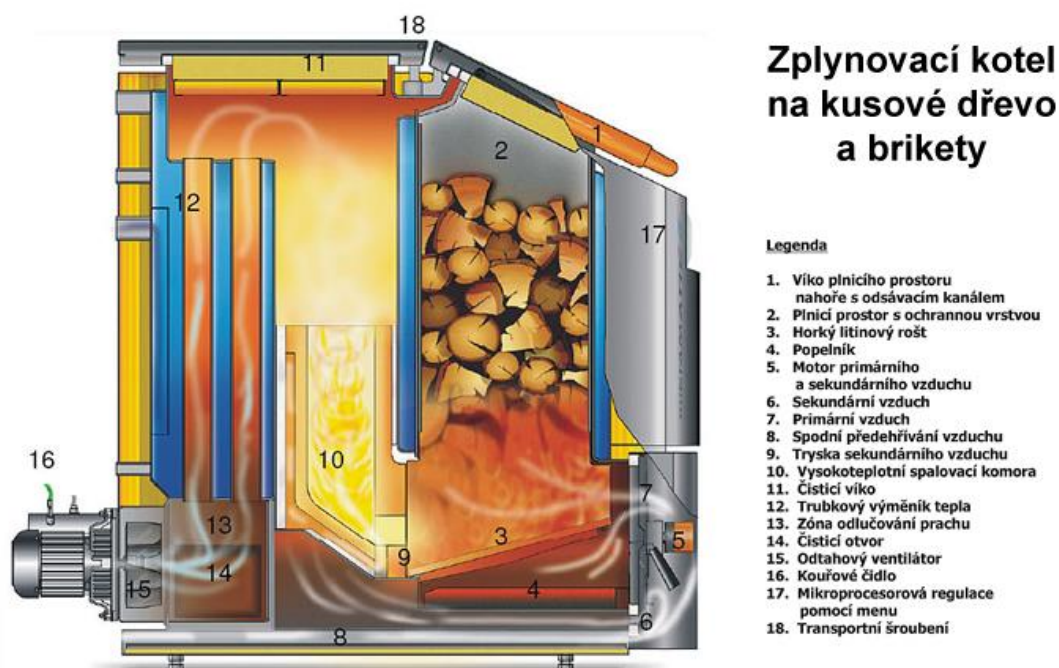
Prohořívací kotle jsou charakterizovány tím, že prohořívání paliva probíhá v celém objemu ve stejnou dobu. Kotle jsou vybaveny přirozeným primárním přívodem vzduchu, který je veden skrz rošť a palivo, hoření probíhá v celé dávce paliva. Sekundární přívod vzduchu je přiveden nad palivo, kde probíhá druhé spalování. Mezi nevýhody tohoto druhu spalování patří nízká účinnost, a vysoké emise uhlovodíku a CO dané nemožností oddělit zplyňování a oxidaci. Nejvhodnějším palivem pro prohořívací kotle je koks, kde u některých konstrukcí můžeme dosáhnout 3 emisní třídy, ale kvůli vysoké ceně je nahrazován nevhodnými palivy tzn. hnědým uhlím, které se v daném typu kotle nesmí spalovat, protože jeho spalováním nedosahujeme požadované emisní třídy. [29]

U odhořívacího kotle palivo prohořívá postupně ve spodní části kotle, a tak jsou plamen a spaliny vedeny dospod topeniště. Zplyňování a následné stabilní spalování probíhá v oddělených komorách. V těchto kotlích je možné spalovat kusové dřevo a uhlí, nebo kusové brikety. Kotle využívají přirozeného tahu, ale některé mohou být vybaveny ventilátorem pro lepší odvod spalin. Ve srovnání s prohořívacími kotli produkují méně emisí, ale i tak starší kotle splňují pouze druhou emisní třídu.



Obrázek 3 - Prohořivací a odhořivací kotel

Zplyňovací kotle jsou odhořivací kotle s ručním přikládáním, ve kterém je optimálních podmínek spalování docíleno řízeným přísunem spalovacího vzduchu ventilátorem. Kotle umožňují spalovat téměř všechny druhy dřevní biomasy, především dřevěná polena a lisované pelety. Při zplyňování dochází k tepelnému rozkladu pevného uhlíku v palivu za vysokých teplot (700 °C až 1200 °C) s omezeným přístupem vzduchu. Produktem zplyňování je výhřevný energetický plyn, který se spaluje v další části kotle za pomoci přívodu sekundárního vzduchu. Vzniklými spalinami je ohříváno tepelné médium. Výhodou zplyňovacích kotlů je vysoká účinnost spalování (až okolo 90 %), velký zásobník paliva a také mála produkce škodlivých emisí. Nové kotle jsou při spalování uhlí schopny dosahovat 3. a 4. popřípadě 5. emisní třídy. [29]



Zplyňovací kotel na kusové dřevo a brikety

Legenda

1. Víko plnicího prostoru
naoře s odsávacím kanálem
2. Plnicí prostor s ochrannou vrstvou
3. Horký litinový rošt
4. Popelník
5. Motor primárního
a sekundárního vzduchu
6. Sekundární vzduch
7. Primární vzduch
8. Spodní předehřívání vzduchu
9. Tryska sekundárního vzduchu
10. Vysokoteplotní spalovací komora
11. Čistící víko
12. Trubkový výměník tepla
13. Zóna odlučování prachu
14. Čistící otvor
15. Odtahový ventilátor
16. Kouřové čidlo
17. Mikroprocesorová regulace
pomocí menu
18. Transportní šroubení

Obrázek 4 - Zplyňovací kotel

5.3 Kotle podle druhu spalovaného paliva

Rozlišujeme kotle, která spalují uhlí, pelety nebo dřevní štěpku. Konstrukce kotle se liší podle typu paliva. Zatímco koks nehoří plamenem, ale pouze žhne, tak nejlepší tepelná přeměna probíhá přímým kontaktem žhavé vrstvy hořícího paliva s vodou chlazenými částmi stroje. U kotlů na koks není potřeba žáruvzdorná vyzdívka, protože koks nehoří plamenem, ale musí být zvolen vhodný materiál kotle, který odolává vysokým teplotám. Druhým typem hoření je spalování dřeva, které díky velkému množství prchavé hořlaviny hoří dlouhým plamenem. Pro úplné shoření prchavé hořlaviny je zapotřebí velký spalovací prostor, který musí být dostatečně vybaven žáruvzdornou vyzdívkou. Nevýhodou dlouhého plamene je, že když se dostane do kontaktu s vodou chlazenou částí kotle, nedojde k jeho dokonalému spálení a vzniká vyšší množství CO a uhlovodíků. Tedy kotel na dřevo má větší rozměry a velký výměník pro větší účinnost samotného kotle. [30]

5.3.1 Kotle na uhlí

Topení uhlím patří v České republice k velmi rozšířenému způsobu vytápění, kvůli nízkým nákladům na provoz. Dnes jsou kotle spalující uhlí rozšířené v domácnostech a v tepelných elektrárnách, kde musí dodržovat přísné limity vypouštěných emisí.

Kotle na spalování uhlí jsou obvykle hybridní, to znamená že v nich můžeme spalovat i dřevo. Vyznačují se většinou prohořivacím spalováním s ručním přikládáním paliva, přívodem spalovacího vzduchu zespodu, při spalování vzniká velké množství popela, a tak tyto kotle mají větší zásobník na popel. Některé vyspělejší kotle mohou mít termostatem řízený regulátor nebo dmychadlo, pomocí kterého dosáhneme požadovaného množství spalovacího vzduchu. Nevýhodou těchto kotlů je časté čištění kotle a odstraňování vzniklého popela.

Kotle na uhlí mohou také mít automatické přikládání paliva, které zajišťuje vyšší účinnost spalování a větší komfort topení. Podle velikosti zásobníku paliva může kotel vydržet až tři dny bez přikládání paliva do zásobníku. Do topeniště se uhlí většinou dopravuje pomocí šnekového mechanismu s přesným dávkováním paliva. Udávaná účinnost automatických kotlů dosahuje až 85 %.

5.3.2 Kotle na pelety

Jedná se o automatické kotle, kde rychlost hoření není tolik ovlivňována přívodem spalovacího vzduchu, ale je řízena množstvím přivedeného paliva. Vyrábí se dva typy těchto kotlů, kotle, kde se spalují pouze pelety a kotle kde se mohou spalovat pelety nebo dřevěná polena.

Pelety jsou do kotle dopravovány pomocí šnekového mechanismu ze zásobníku, který může pojmout pelety a na týden provozu kotle. Podle přívodu paliva rozlišujeme tři typy spalování pelet, spodní, vodorovný nebo horní přívod paliva. Spodní a vodorovný

přívod je univerzálnější, u něho můžeme spalovat kromě pelet i dřevné štěpku nebo zrno. Horní přívod paliva je určen pouze pro spalování pelet. Pelety jsou velmi hygroskopické (savé) a proto bychom je měli uskladňovat v suchých místnostech. Do zásobníku v kotli pelety můžeme přemísťovat ručně, ale existují systémy, které dopraví pelety i ze skladovacích prostor.

Kotle jsou řízeny pomocí řídicí jednotky, která zajišťuje optimální přívod paliva a spalného vzduchu v závislosti na potřebném tepelném výkonu. Kotle na pelety mají minimální požadavky na obsluhu, množství popela, který vzniká spalováním je velmi malé, dále mají nízké emise škodlivých plynů.

6 Emise znečišťujících látek

Protože při spalování tuhých paliv v teplovodní kotlích vznikají znečišťující látky, jsou postupně v jednotlivých zemích EU přijímány nové legislativní požadavky na kotle, především snižování emisí a zvyšování účinnosti. Přes zimní období dochází vlivem topení pevnými palivy v domácích kotlích ke zhoršení kvality ovzduší. [31] Kvalita ovzduší se zhoršuje převážně na vesnicích a malých městech, kde je jenom v České republice přes 600 000 domácností vytápí pomocí tuhých paliv. Mezi roky 2001 a 2011 došlo ke snížení počtu domácností, které topí uhlím z 570 000 na 336 000 domácností. Zároveň došlo ke zvýšení počtu domácností, které spalují palivo na základě dřeva na 285 000.

Jednou z možností, jak snižovat emisní limity je úprava legislativy. Cílem těchto požadavků je zvýšení kvality ovzduší. Legislativa však udává, jakých parametrů musí daný typ kotle dosáhnout za optimálních podmínek, pokud však budou provozní podmínky odlišné, dojde také ke zhoršení reálných emisí a účinnosti. Zhoršení podmínek je dáno vlivem paliva, údržby nebo obsluhy. Na odlišné podmínky jsou nejvíce citlivé kotle prohořivací a odhořivací. [32]

6.1 Legislativní požadavky

V současné normě EN 303-5:2012, které platí pro kotle do 500 kW, jsou popsány způsoby zkoušky kotlů, požadavky na bezpečnost a konstrukční materiál. Tato norma platí v jednotlivých členských státech EU, avšak tuto normu mohou jednotlivé země dále upravovat. V normě jsou dále uvedeny jednotlivé emisní limity rozdělené do pěti tříd, které musí kotle plnit při jmenovitém výkonu, a i sníženém výkonu. Každý model kotle je před uvedením na trh podstoupí emisní zkoušku, a podle výsledků je zařazen do příslušné emisní třídy. Emisní třída vypovídá o možnostech daného kotle v optimálních podmínkách spalování.

Emise

Podle normy EN 303-5:2012 se měří tři mezní hodnoty emisí, a to **koncentrace CO**, celkový organický uhlík označovaný zkratkou **OGC** (celkový organický uhlík,

kterým se rozumí celkový organický uhlík s výjimkou metanu) a množství tuhých znečišťujících látek (celkový **prach** bez rozlišení velikosti). Mezní hodnoty emisí se udávají v $\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ při 10 % O_2 nebo při 13 % O_2 . Jednotka m^3_{N} nám popisuje metr krychlový vzduchu při normálních podmínkách, to je teplota 273,15 K a tlak 101325 Pa. [33]

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný výkon [kW]	Mezní hodnoty emisí (koncentrace)				
			CO				
			$\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ při 10% O_2 ($\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ 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)		
	Fosilní	≤ 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)		
	Fosilní	≤ 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

Tabulka 4 - koncentrace CO [33]

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný výkon [kW]	Mezní hodnoty emisí (koncentrace)				
			OGC				
			$\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ při 10% O_2 ($\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ 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

Tabulka 5 - koncentrace OGC – celkový organický uhlík [33]

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)		
	Fosilní	≤ 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)		
	Fosilní	≤ 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).

Tabulka 6 - koncentrace prachu – všech pevných látek [33]

Z tabulek si můžeme všimnout, že norma od sebe rozlišuje rozdíly v dodávce paliva, samotné palivo a jmenovitý tepelný výkon. Dodávka paliva do kotle je buď ruční, platí zejména pro prohořivací a odhořivací kotle, nebo automatická, kde se dodávka paliva opakuje v řádu minut. Palivo může být buď biologické – zejména palivové dřevo, štěpka a biomasa, nebo fosilní, které zahrnuje uhlí. Dále se norma zaměřuje na jmenovitý tepelný výkon kotle. Kotle do 50 kW se používají především v domácnostech, kotle v tepelném výkonem od 50 do 150 kW se používají pro vytápění objektů jako jsou školy, bytové domy a malých firemních objektů.

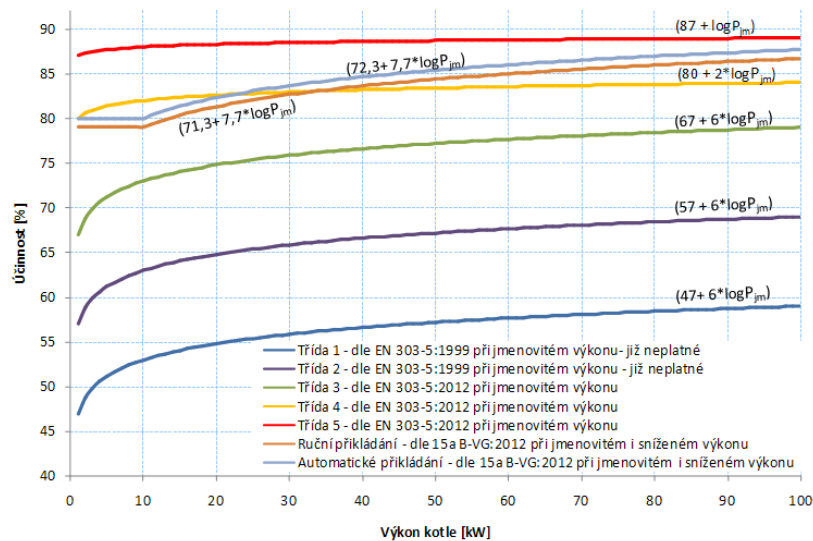
Z emisních limitů je patrné, že emisní limity pro třídu 1 a 2 nejsou moc přísné. Tyto emisní třídy zastupují především klasické kotle s prohořivací a odhořivací konstrukcí spalování. Jsou to levnější kotle, které jsou již zastaralé, a je žádoucí jejich počet postupně snižovat. V porovnání s automatickými kotli vypouštějí více emisí. Navíc jejich neekologický provoz může být způsoben neodbornými zásahy do provozu kotle (dušení kotle – přívod malého množství vzduchu). Emisní limity 3 a 4 třídy splňují již veskrze všechny nové modely kotlů. Emisní limity 5. třídy splňují především kotle kondenzační. Nevýhodou těchto kotlů je vyšší cena. V současné době je ale na moderní a ekologické kotle (které již splňují podmínky Ekodesignu, viz dále) nabízena tzv. kotlíková dotace, která například u automatického kotle na uhlí a biomasu může činit až 75 % způsobilých výdajů, nejvýše však 75 tisíc korun. [34]

Emisní limity mají snižovat množství znečištěného vzduchu, a proto zakazují prodej starých kotlů. Od 1.1.2014 se přestaly prodávat kotle 1. a 2. emisní třídy. Tyto kotle nebude již možné provozovat po 1.9.2022. Od 1.1.2018 je ukončen prodej kotlů s emisní normou 3. třídy, tyto kotle bude možné provozovat i po roce 2022. Od 1.1. 2020 bude ukončen prodej kotlů 4. a 5. emisní třídy a bude se moct koupit kotel, který splňuje požadavky na Ekodesign. Tedy po roce 2022 bude možné provozovat kotle 3. 4. a 5. emisní třídy. [35]

Výše popsaná norma je základem, který má platit v jednotlivých členských zemích EU, tyto země mohou dále normu upravovat. V České republice platí tato evropská norma téměř beze změn. Pouze výrobci kotlů musí před uvedením na trh splnit určité emisní třídy. Provozovatel kotle musí provádět jednou za dva kalendářní roky kontrolu technického stavu a provozu spalovacího zařízení prověřenou osobou. V České republice se nepočítá s realizací pravidelného měření množství emisí, a je otázka, jakých parametrů zařízení dosahuje v reálném provozu. Ale například Rakousko a Německo si emisní limity zpřísnily z důvodu menší ekologické zátěže.

7 Účinnost

Norma EN 303-5 dále stanovuje jakou minimální účinnost musí kotle při daném jmenovitém výkonu dosahovat. Z následujícího grafu plyne, že s každou novější emisní třídou dochází ke zvýšení minimální účinnosti při jmenovitém výkonu. V grafu jsou i dnes již neplatné 1. a 2. emisní třídy. Dnes už pro nové kotle zplyňovací a automatické kotle účinnost 75 % žádný problém, ovšem tato účinnost se měří při jmenovitém výkonu. Pokud výkon kotle bude nižší než jmenovitý (v běžných podmínkách je to větší část topné sezóny), tak dochází ke snížení účinnosti a zvětšení množství škodlivých emisí.



Graf 6 - účinnost jednotlivých emisních tříd [33]

7.1 Ekodesign

Kotle na tuhá paliva prodávaná v zemích EU musí po roce 2020 splňovat novou normu, tzv. Ekodesign. Tato norma zavádí parametr nazývaný „Sezónní energetická účinnost vytápění“. U kotlů do tepelného výkonu 20 kW je minimální hodnota stanovena na 75 % účinnosti, a u kotlů v rozsahu výkonu 20–500 kW je 77 %. Výpočet zahrnuje skutečnost, že kotel topné sezóny nepracuje celou dobu na jmenovitý výkon, ale větší část pracuje na snížený výkon. Norma tuto skutečnost zohledňuje a váha jmenovitého výkonu je stanovena na 15 % a váha sníženého výkonu je stanovena na 85 %. Obecně mají kotle vyšší účinnost, pokud pracují v oblasti jmenovitého výkonu. Výpočet účinnosti používá ke stanovení příkonu spalné teplo místo výhřevnosti.

U emisí jsou nejvíce sledovány hodnoty tuhých částic, CO, Nox, SO₂ a TOC. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty v mg/m³ v suchých spalínách při 10 % O₂. Hodnoty jsou stanoveny jako vážený průměr sníženého a jmenovitého výkonu. V porovnání s 5. emisní třídou jsou hodnoty koncentrací oxidu uhelnatého, celkového tuhého uhlíku (OGC) a tuhých částic při 10 % O₂ stejné, ale musíme brát v úvahu to, že se jedná o vážený průměr sníženého a jmenovitého výkonu. Z toho plyne, že dochází k dalšímu zpřísnění emisních norem. [36]

Požadavky dle směrnice Ekodesignu, platnost po 1.1.2020					
Výkon kotle	typ kotle	CO	OGC	prach	oxidy dusíku (NO ₂)
do 500kW	automatický	40	20	500	200
	ruční	60	30	700	350

(vyjádřeno jako koncentrace znečišťující látky v mg/m³ v suchých spalínách při 10 % O₂, (101 325 Pa, 0 °C)

Tabulka 7 - Emisní požadavky dle Ekodesignu

8 Měření emisí a účinnosti

Měření účinnost a emisí proběhlo ve školní laboratoři na zplyňovacím kotli Dakon. Tento kotel dosahuje výkonu 20 KW, a je schopen spalovat dřevo nebo uhelné brikety. Kotel je schválen na 3. emisní třídu a podle výrobce dosahuje účinnosti mezi 83 až 88 %. Kotel je určený k vytápění a přípravě TUV v rodinných domech.

Jedná se o zplyňovací kotel, takže při spalování využívá pyrolýzu. Pyrolýza je tepelný rozklad látek kdy se při vysokých teplotách a omezenému přístupu vzduchu rozkládají organické materiály na jednodušší sloučeniny a tuhý zbytek. Kotel se skládá ze dvou komor, ve vrchní komoře se zapaluje palivo a přikládá, je zde přiváděn primární vzduch a dochází ke zplyňování. Ve druhé spalovací komoře se spaluje zplyňovací plyn za přístupu sekundárního vzduchu. Teplo ze spalování je následně předáváno ve výměníku vodě, která by při vstupu do kotle měla mít 60°C. Pokud teplota vody je menší, dochází na stěnách výměníku ke kondenzaci vlhkosti obsažené ve vzduchu a v palivu.

Při samotném zapalování paliva v kotli byla využita horní spalovací komora, do které bylo umístěno palivo a byla otevřena vrchní klapka, které odděluje vrchní spalovací komoru od komína. Dále je vhodné lehce pootevřít spodní dveře, aby nám palivo mělo větší přísun vzduchu a lépe hořelo. V této fázi využíváme u kotle prohořivací děj, při kterém jdou spaliny přímo do komína. Jakmile se palivo dostatečně rozhoří, můžeme vrchní klapku zavřít a začít využívat zplyňovací spalování.

Na zadní části kotle jsou dva nasávací otvory pro primární a sekundární nasávání, u kterých je možné regulovat množství vzduchu. Primárním vzduchem je ovlivňována

především rychlost hoření paliva a sekundárním vzduchem se ovlivňuje spalování organického plynu.



Obrázek 5 - Kotel Dakon Damat Pyro 20G

8.1 Palivo

Při měření byly použity dva druhy paliva. Při prvních dvou měřeních byly použity uhelné brikety od společnosti Union vyráběné v Německu. Brikety jsou lisovány za vysokého tlaku a bez přidání pojiva. V porovnání s uhlím mají brikety nižší popelnatost a podobnou dobu hoření.

Při dalších dvou měřeních byl jako palivo použit buk lesní. Buk lesní se řadí mezi nejpoužívanější dřevo ke spalování, neboť velmi rychle vysychá. Jeho dřevo je tvrdé a je vhodné pro spalování. V našem případě bylo dřevo několik let uskladněno v prostorách kotelny, a tudíž je dostatečně vyschlé. Pomocí vlhkoměru jsme naměřili průměrnou vlhkost pouze okolo 7 %. Dřevo bylo připravené ve formě štípaných polen, spíše menších rozměrů.

8.2 Výhřevnost paliv

Před samotným měřením účinnosti byly stanoveny hodnoty výhřevnosti jednotlivých paliv. Stanovení výhřevnosti se provádí pomocí kalorimetru a následným přepočtem spalného tepla na výhřevnost. V našem případě byl použit kalorimetr IKA C 200, dále byla použita laboratorní váha, a zařízení Kern k určení vlhkosti paliva. Stanovení spalného tepla probíhalo ve školní laboratoři. Nejprve bylo provedeno stanovení hmotnosti měřeného vzorku a následně byl daný vzorek připraven a vložen do kalorimetru. Měření každého druhu paliva proběhlo 2x a rozptyl jednotlivých měření byl menší než 3 %.

Spalné teplo	1. měření [MJ/kg]	2. měření [MJ/kg]	Průměrné spalné teplo [MJ/kg]	Vlhkost [%]
Dřevo – buk	17,785	17,685	17,735	7,337
Brikety	18,917	18,109	18,513	10,152

Tabulka 8 - naměřené hodnoty spalného tepla

Při přepočtu spalného tepla na výhřevnost je potřeba znát vlhkost paliva, a obsah vodíku v palivu. Přepočet se provádí pomocí následujícího vztahu:

$$Q_n = Q_s - 24,53 * (W + 8,94 * H_h)$$

Kde je Q_n – výhřevnost paliva [J/g]
 Q_s – spalné teplo [J/g]
 24,53 - koeficient odpovídající 1 % vody ve vzorku při teplotě 20 °C
 [J*g]
 W - obsah vody v analytickém vzorku [%]
 8,94 – koeficient pro přepočet vodíku na vodu
 H_h – obsah vodíku v analytickém vzorku [41]

Výhřevnost dřeva

Vlhkost dřeva byla velmi malá, pouze 7,337 %, a průměrné spalné teplo ze dvou měření bylo 16 235 J/g. Dřevo v průměru obsahuje okolo 6,3 % vodíku [37].

$$Q_n = 17735 - 24,53 * (7,337 + 8,94 * 6,3) = 16173,4 \text{ J/g}$$

Výhřevnost briket

U briket byla stanovena vlhkost 10,152 % a průměrné spalné teplo ze dvou měření bylo 18 513 J/g. Brikety Union obsahují okolo 4 % vodíku [36].

$$Q_n = 18513 - 24,53 * (10,152 + 8,94 * 4) = 17386,8 \text{ J/g}$$

Výsledná výhřevnost paliv odpovídá teoretickým předpokladům. Jednotlivé výhřevnosti se od sebe liší jen nepatrně, vyšší výhřevnost mají uhelné brikety.

8.3 Přístroje

Během měření jsme použili přístroje k měření výstupních hodnot. Jednalo se především o vlhkoměr, analyzátor spalín, váhu, a další.

Vlhkoměr WHT 770 – jedná se o zařízení, které měří vlhkost paliva, v našem případě dřeva. Na přístroji se navolí teplota okolí, a následně se provede více měření jak na povrchu dřeva, tak i ve středu polena. V dalším kroku měření se pomocí tabulky přepočítá vlhkost na konkrétní druh dřeva. Z naměřených hodnot byla pomocí aritmetického průměru zjištěna vlhkost polen buku okolo 7 %.

Digitální teploměr M 305 – S pomocí digitálního teploměru byla změřena teplota povrchu kotle, důležitá k určení účinnosti kotle. Jednalo se o kontaktní odporový teploměr, s přesností na 0,1°C.

Digitální váha – samotná kotel byl umístěn na digitální váze. Tato váha s nosností až 600 kg a přesností na 0,02kg byla spárována s počítačem. Na váze se dala odečítat hmotnost paliva v průběhu zkoušky.

Analyzátor spalin – Během měření bylo analyzováno množství emisí, a množství kyslíku na analyzátoru spalin ULTRAMAT 21/O₂ a ULTRAMAT 22, které měřily množství kyslíku, oxidu uhelnatého, oxidů síry a oxidů dusíku během měření. Tyto zařízení jsou propojena s počítačem, do kterého jsou v reálném čase ukládány naměřené hodnoty. Spaliny byly analyzovány každých 60 sekund.

Metr – pomocí metru byly změřeny rozměry kotle, použil se klasický svinovací metr.

8.4 Průběh měření

Měření probíhalo na zplyňovacím kotli Dakon Damat Pyro 20 G, který je napojen na teplovodní zásobník. Pro měření jsme měli k dispozici dvě paliva, uhelné brikety a štípaný buk. U každého paliva byla provedena 2 měření, kdy u druhého měření byl změněn přívod sekundárního vzduchu do kotle. Při měření byly zaznamenány obsahy jednotlivých složek spalin, jejich teplota a tah komína.

Před prvním měřením bylo nutné připravit kotel. Znamenalo to jeho vyčištění od popela z minulého měření. Dále bylo potřeba připravit třísky na podpal. Následovalo samotné zapálení třísek a postupné rozhořování kotle za postupného přikládání dřeva. Po rozhoření dřeva byly postupně do kotle přiloženy přibližně 2 kg briket. Počkali jsme až se kotel rozhoří a spálí většinu paliva na zátop. Mezitím jsme si připravili měřicí přístroje. Následně bylo podle návodu k obsluze odváženo přesné množství paliva, 11 kg na dvě hodiny provozu, které byly do kotle přiloženy. Počkali jsme až se kotel rozhoří a jemnou manipulací s přívody vzduchu jsme se snažili najít optimální podmínky hoření.

	palivo	hmotnost paliva [kg]	čas zkoušky [min]	sekundární vzduch [%]
1. měření	brikety	11	120	20
2. měření	brikety	5,5	60	5
3. měření	buk	5,5	60	33
4. měření	buk	5,66	60	75

Tabulka 9 - přehled měření

9 Měření emisí

Při zjišťování množství oxidu uhelnatého ve spalinách, přístroje měří jeho koncentraci při různém obsahu O₂. Abychom získali porovnatelné hodnoty CO, je potřeba přepočítat naměřené hodnoty tak, aby koncentrace O₂ ve spalinách byla stejná. Podle normy je tato referenční koncentrace stanovena na 10 % O₂. K přepočtu využijeme následující vztah:

$$CO = CO_{avg} * \frac{21 - O_{2standart}}{21 - O_{2avg}}$$

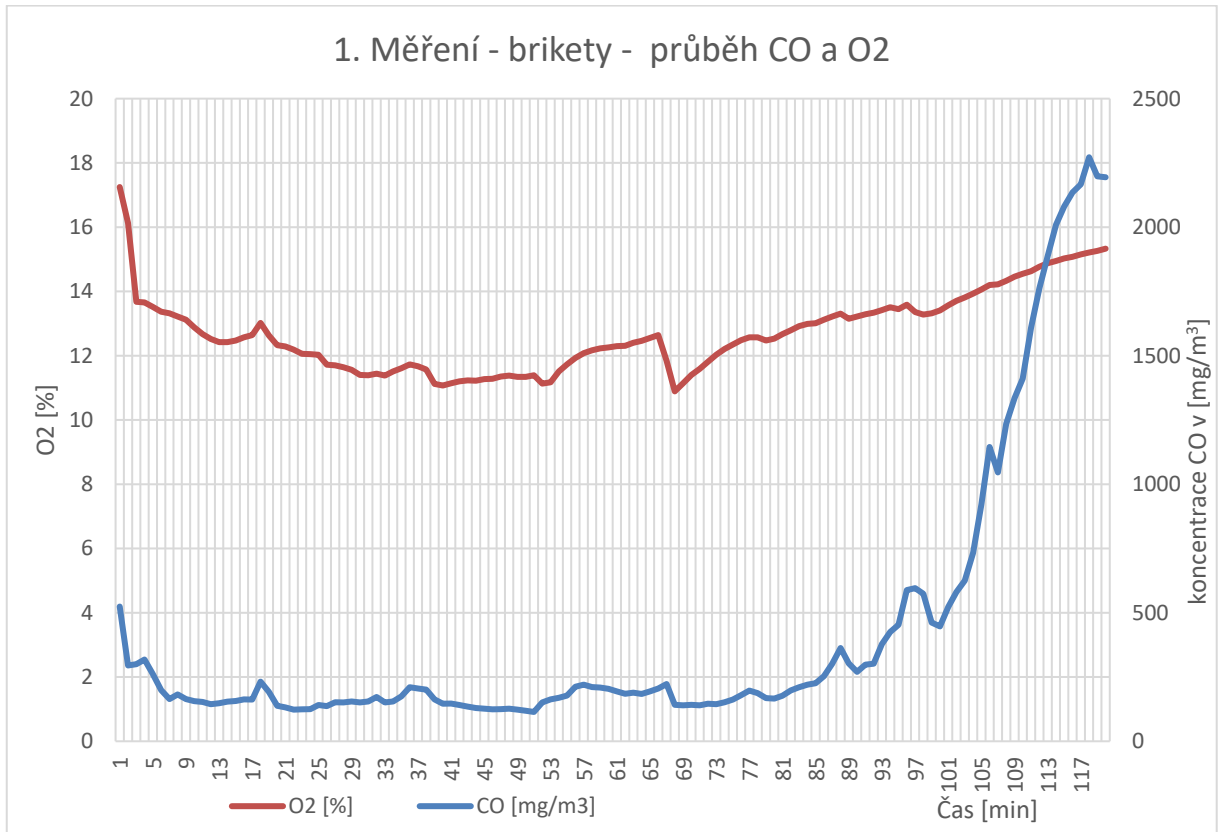
kde CO – výsledné množství CO [mg/m³_N] při 10 % O₂
CO_{avg} – průměrné množství CO v měření při určité koncentraci [mg/m³_N]
O_{2standart} – požadované množství O₂ [%]
O_{2avg} – průměrné množství O₂ během spalování [%]

9.1 První měření – brikety

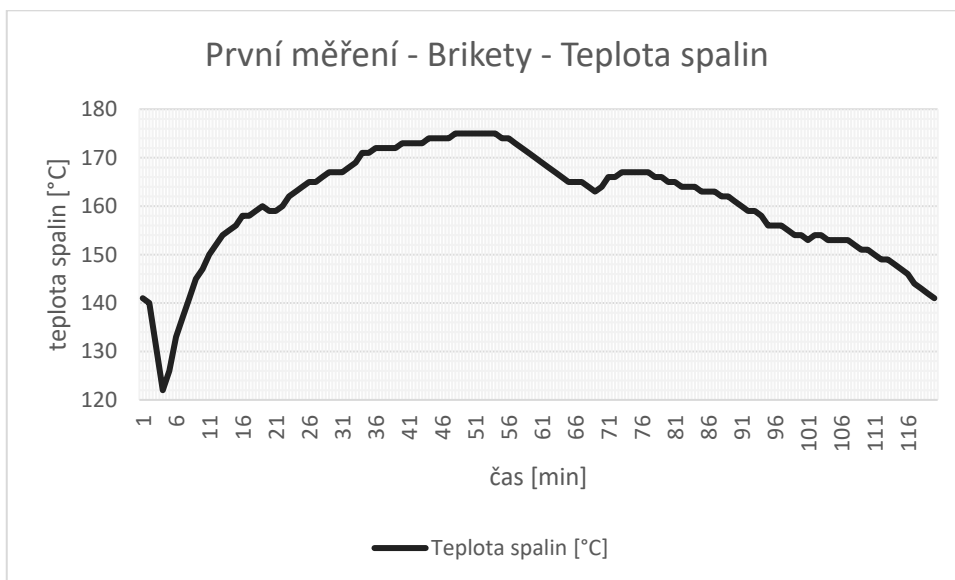
Při první měření jsme spalovali brikety Union. Měření probíhalo 120 minut, a zápis hodnot probíhal každých 60 sekund. Palivo do kotle bylo dodáno na začátku měření a v průběhu měření již nedocházelo k manipulaci s ovládacími zařízeními kotle. Na konci měření se v kotli ještě nacházelo značné množství nespálených briket. Bohužel z časové náročnosti nebylo možné mezi samotnými měřeními zjistit množství tuhých zbytků paliva. Během spalování se také měřila teplota jednotlivých ploch kotle, kvůli následnému výpočtu účinnosti.

První měření – Brikety – průměrné hodnoty			
CO [mg/m ³]	O ² [%]	Teplota spalin [°C]	CO [mg/m ³ _N] při 10 % O ₂
423	12,73	160,39	563

Tabulka 10 - průměrné hodnoty při prvním měření



Graf 7 - Koncentrace CO, O₂ a teploty spalin na čase - 1. měření



Graf 8 - závislost teploty spalin na čase - 1. měření

9.2 Druhé měření – brikety

Ve druhém měření jsme spalovali opět brikety Union, avšak z časové úspory trvalo měření pouze 60 minut. Tomu také odpovídalo snížené množství paliva – 5,5 kg.

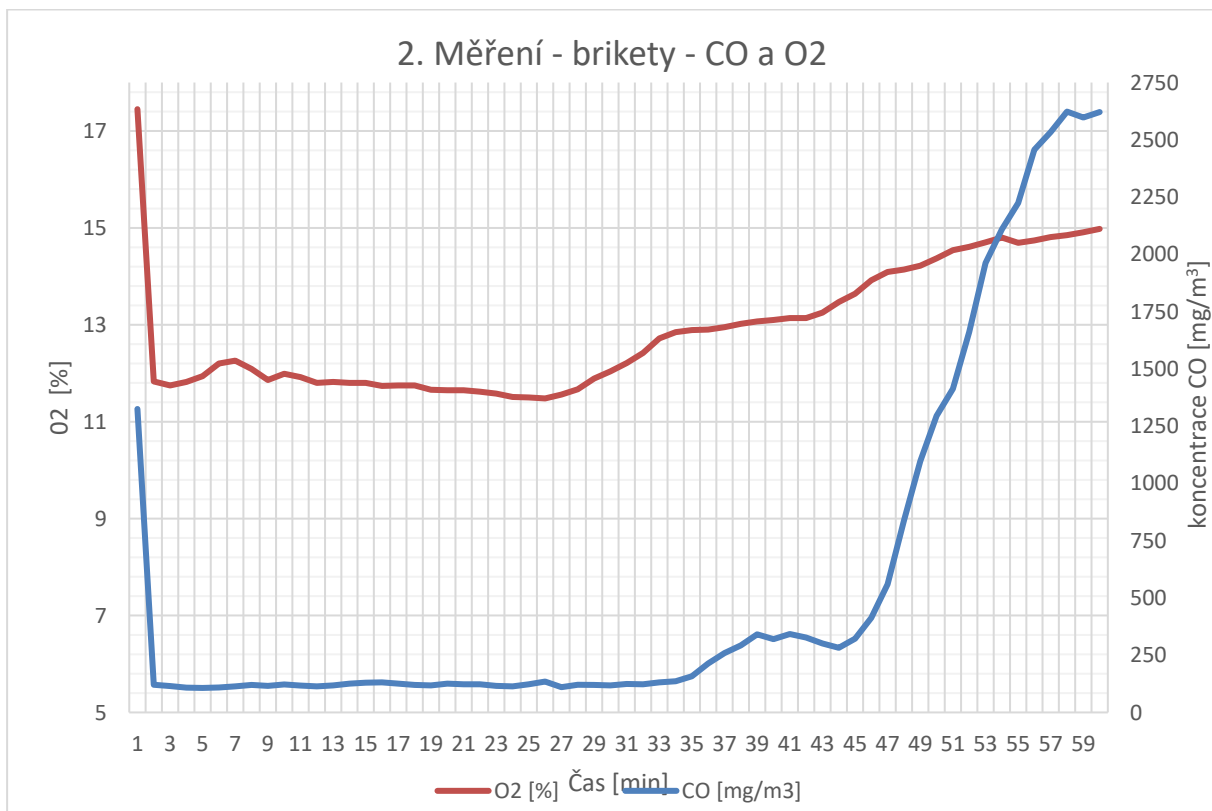
Rozdíl oproti prvnímu měření byl ve změně polohy ventilu sekundárního vzduchu, a to tak, že bylo sníženo množství tohoto vzduchu. Je to vidět na obrázku níže.



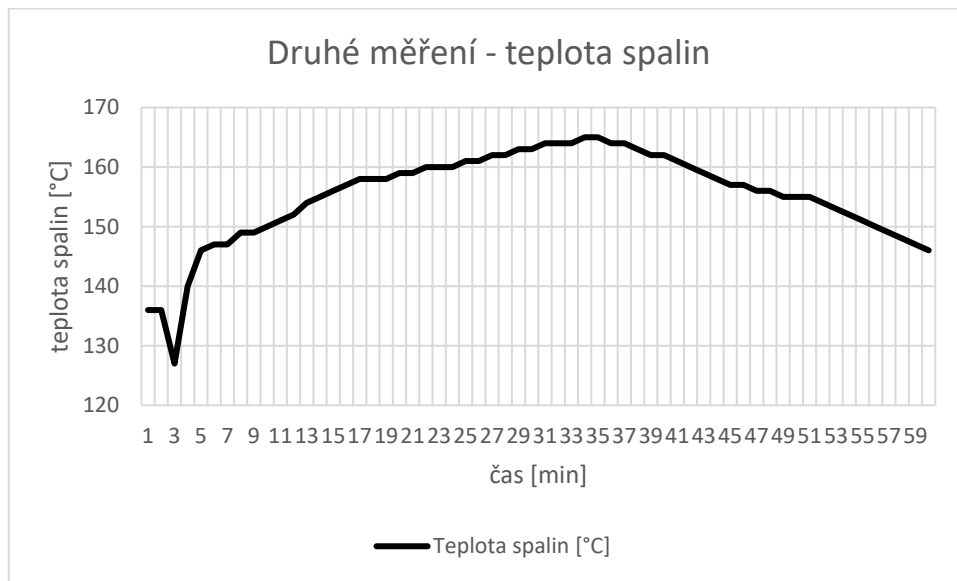
Obrázek 6 - porovnání nastavení přívodu vzduchu pro 1. měření (vlevo) a 2. měření (vpravo)

Druhé měření – Brikety – průměrné hodnoty			
CO [mg/m ³]	O ² [%]	Teplota spalin [°C]	CO [mg/m ³ _N] při 10 % O ₂
581	12,88	155,20	787

Tabulka 11 - Průměrné hodnoty u druhého měření



Graf 9 - Koncentrace CO, O₂ a teploty spalin na čase - 2. měření



Graf 10 - Závislost teploty spalin na čase - 2. měření

9.3 Porovnání měření - brikety

Při porovnání obou grafů je patrné že průběh naměřených veličin je podobný, avšak je třeba podotknout, že druhé měření trvalo poloviční čas, a byla spotřebována polovina paliva. Nejlépe je to vidět na průběhu koncentrace CO, kdy u prvního měření dochází k výraznému zvýšení koncentrace CO až okolo 90 minuty, zatímco u druhého měření je to už za 45 minut. Toto zvýšení koncentrace CO je dáno dohoříváním paliva, a také změnou hoření, kdy palivo z hoření s plamenem přechází spíše na sálání. Obě koncentrace CO jsou si podobné, avšak průměrná koncentrace je vyšší u druhého měření, kvůli rychlejšímu spálení paliva a následnému sálání.

Teplota spalin byla u obou měření poměrně nízká, dosahovalo maximálně 175 °C, průměrná teplota byla vyšší u prvního měření, je to dáno především delší dobou měření a spálením více paliva.

Průběh koncentrace kyslíku ve spalinách byl u obou měření podobný, průměrná koncentrace kyslíku byla 12,8 %. V grafech je vidět že měření O₂ ve spalinách je za začátku ovlivněné přiložením paliva a jeho rozhořením, v průběhu spalování se koncentrace O₂ snižuje až k 11 %. Ke konci měření se zase postupně zvyšuje, vlivem dohořívání paliva.

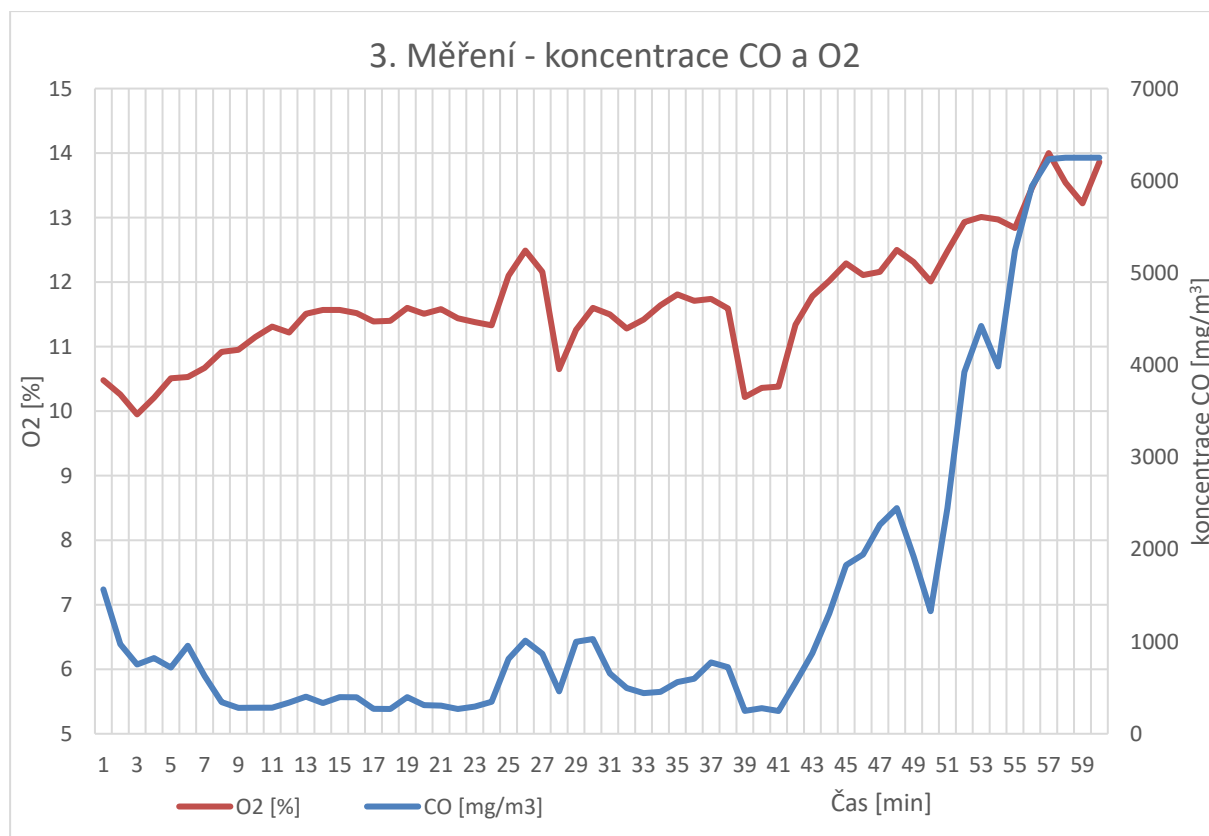
Daný kotel splňuje 3. emisní třídu, která dovoluje koncentrací až 5000 mg/m³_N při 10 % O₂. I když dané měření přesně neodpovídá měření podle ČSN, můžeme si povšimnout, že kotel dosahoval nižších průměrných hodnot koncentrace CO, konkrétně 563 mg/m³_N při 10 % O₂ a 787 mg/m³_N při 10 % O₂. Je to dáno dobrým stavem kotle a jeho vhodným nastavením a také kvalitním palivem.

9.4 Třetí měření – dřevo

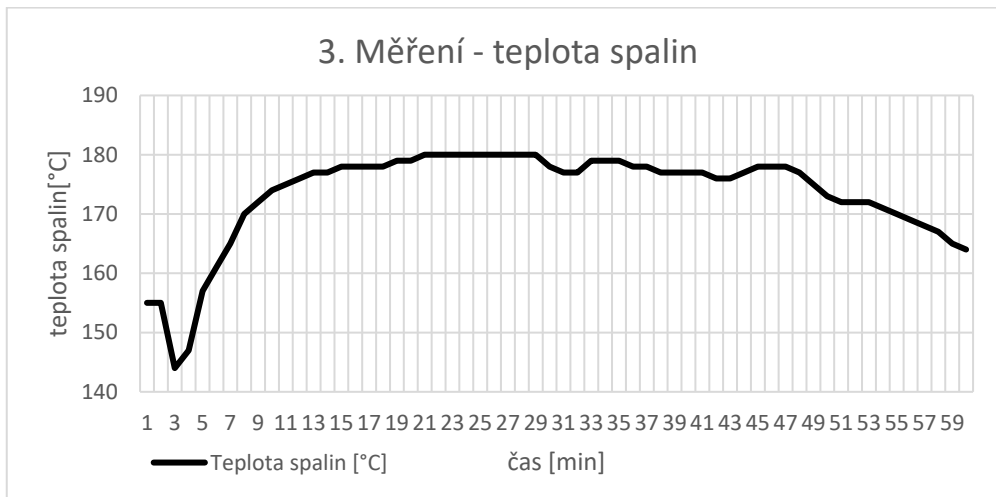
Dalším palivem, u kterého jsme měřili koncentraci CO bylo dřevo, konkrétně buk. Buk byl připraven ve formě malých špalků, vlhkoměrem jsme určili vlhkost dřeva okolo 8 %. Měření probíhalo 1 hodinu a bylo při něm spáleno 5,50 kg dřeva. U kotle byl nastaven primární vzduch podobně jako u prvního měření u briket, ale sekundární vzduch byl otevřen více, cca do 1/3.

3. měření – dřevo – průměrné hodnoty			
CO [mg/m ³]	O ² [%]	Teplota spalin [°C]	CO [mg/m ³ _N] při 10 % O ₂
1467	11,68	173,43	1731

Tabulka 12 - průměrné hodnoty u třetího měření



Graf 11 - Koncentrace CO, O2 a teploty spalin na čase - 3. měření



Graf 12 - závislost teploty spalin na čase - 3. měření

9.5 Čtvrté měření - dřevo

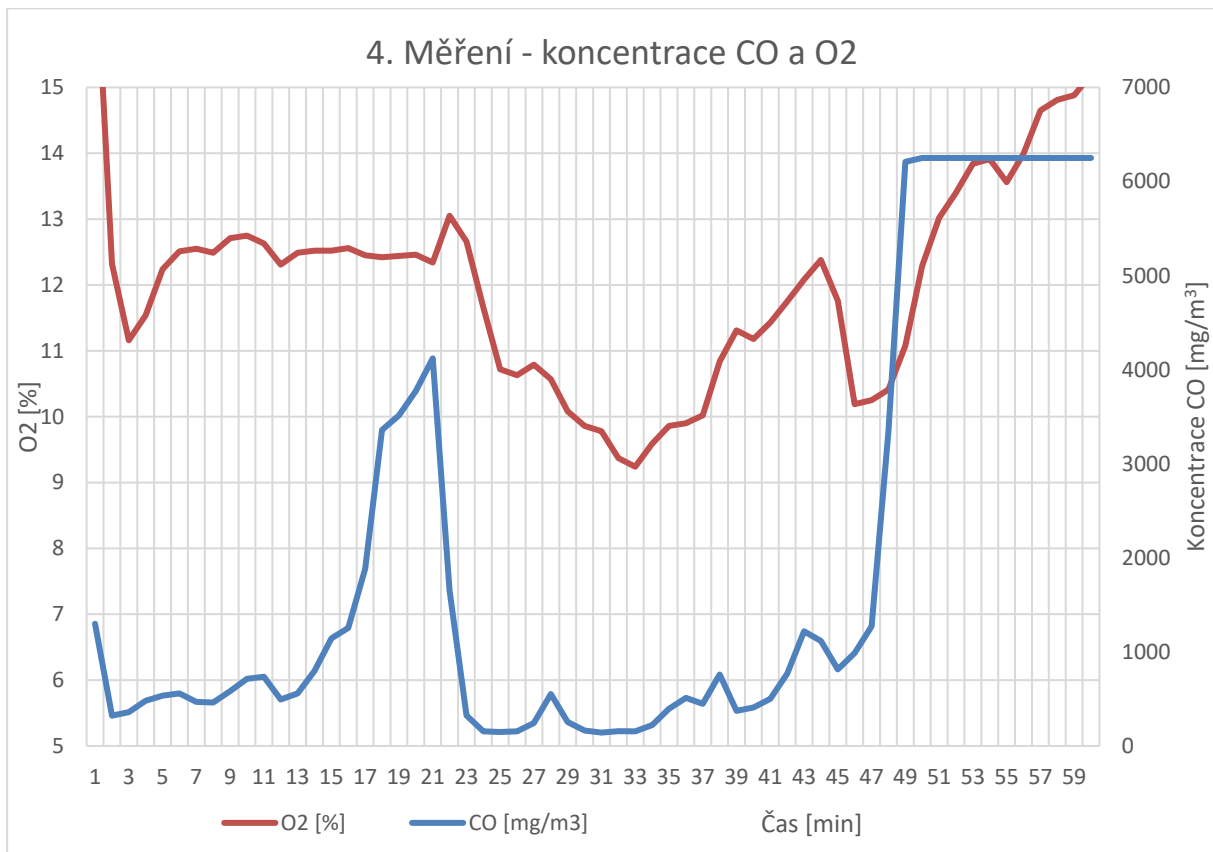
Poslední měření trvalo 60 minut, a bylo při něm spáleno 5,66 kg. Oproti předchozímu měření bylo pozměněno nastavení přívodu sekundárního vzduchu, byl otevřen cca do $\frac{3}{4}$. Dřevo, které jsme u měření použili bylo stejné jako u předešlého měření.



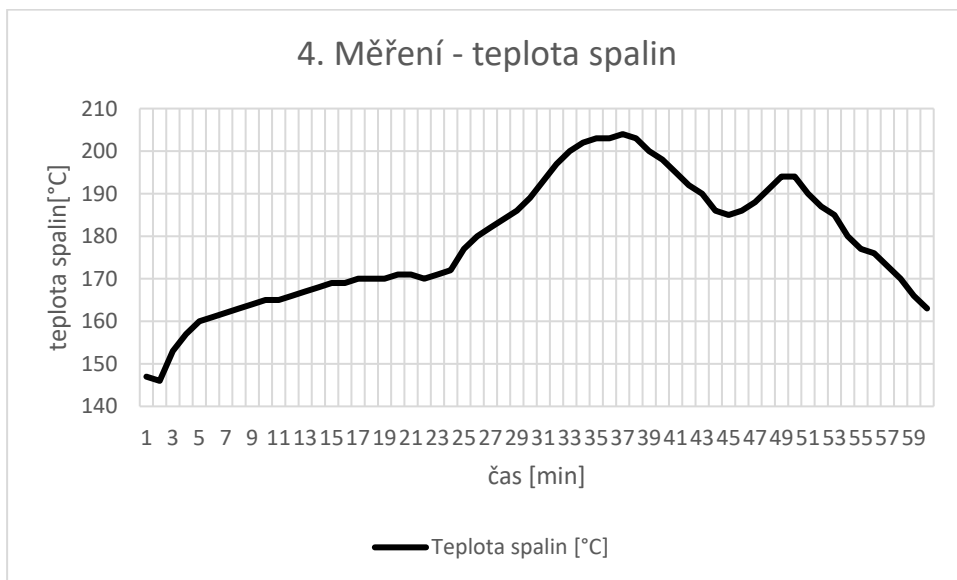
Obrázek 7 - Nastavení kotle, při spalování dřeva, je zde vidět změna nastavení sekundárního vzduchu (vrchní klapka)

4. měření – dřevo – průměrné hodnoty			
CO [mg/m ³]	O ² [%]	Teplota spalin [°C]	CO [mg/m ³ _N] při 10 % O ₂
1994	12,01	178,60	2440

Tabulka 13 - průměrné hodnoty u 4 měření



Graf 13 - Koncentrace CO, O2 a teploty spalin na čase 4. měření



Graf 14 - Průběh teploty spalin u 4. měření

9.6 Porovnání měření - dřevo

Spalování dřeva se mezi sebou lišilo v odlišně nastaveném přívodu sekundárního vzduchu do kotle, u prvního měření byl sekundární vzduch otevřen do cca 1/3 a u druhého měření byl otevřen až do 3/4.

Při porovnání dvou měření, ve kterých se spalovalo dřevo, si můžeme všimnout podobného průběhu koncentrací CO. Průměrná hodnota je u prvního spalování dřeva okolo 1730 mg/m³_N při 10 % O₂ a u druhého měření je téměř 2450 mg/m³_N při 10 % O₂. Druhé měření bylo ovlivněno vysokými hodnotami koncentrace CO v časovém rozmezí od 16 do 23 minuty měření, bohužel nevím čím byly tyto hodnoty způsobeny, protože se celou dobu měření s nastavením kotle nemanipulovalo. Ke konci měření došlo ke zvýšení koncentrace CO až nad úroveň rozsahu měření přístroje.

U průběhu množství kyslíku ve spalinách si můžeme pozorovat, že větší přívod sekundárního vzduchu do kotle, má za následek jeho zvýšení z 11,7 % u prvního měření na 12 %.

U teploty spalin mělo větší množství sekundárního vzduchu vliv na vyšší teplotu spalin, kdy nejvyšší teplota dosahovala až 205°C. Je to dáno tím, že kotel měl při spalování zplyňovacího plamene dostatek vzduchu a tím pádem i kyslíku.

3. emisní třídu, která udává maximální množství CO ve spalinách na 5000 mg/m³_N při 10 % O₂, by kotel při spalování dřeva v našem měření splnil, protože při 4. měření emisí dřeva dosahoval průměrně 2440 mg/m³_N při 10 % O₂.

9.7 Výsledné hodnoty z měření

	palivo	množství CO [mg/m ³ _N při 10 % O ₂]	O ₂ [%]	teplota spalin [°C]
1. měření	brikety	563	12,73	160,39
2. měření	brikety	787	12,88	155,2
3. měření	buk	1730	11,68	173,43
4. měření	buk	2440	12,01	178,6

Tabulka 14 - výsledné hodnoty CO, O₂ a teploty spalin

9.8 Porovnání měření - brikety x dřevo

Při porovnání spalování uhelných briket Union a polen buku jsem zjistil několik poznatků. Doba hoření obou paliv je podobná. Pro mě největší překvapení bylo množství emisí CO, kdy při spalování briket byla tato koncentrace násobně menší než u spalování dřeva. Tento rozdíl je způsobený především vyšší koncentrací CO ke konci měření při spalování dřeva. Pro snížení hodnoty CO u spalování dřeva by pomohlo častější přikládání, přibližně po 45 minutách. Dále by pomohlo jiné nastavení kotle, kdy bychom lehce snížili přívod primárního vzduchu, a naopak zvýšili přívod sekundárního vzduchu, to by mělo za následek snížení průměrného obsahu CO ve spalinách. Množství kyslíku

ve spalinách bylo u spalování dřeva v průměru asi o jedno procento menší, tento rozdíl může být dán větším přívodem sekundárního vzduchu při spalování dřeva, a větší přívod sekundárního vzduchu má vliv také na vyšší teploty spalin při spalování dřeva.

10 Účinnost

Obecně účinnost definujeme jako poměr výkonu (využitá energie) k příkonu (přivedená energie). Účinnost přeměny energie obsažené v palivu na tepelnou energii média je nejvýznamnějším technicko-ekonomickým parametrem kotle, protože nevyužitá energie představuje ztráty, ať už ve formě tepla nebo nespálené hořlaviny paliva. Účinnost kotlů můžeme stanovit dvěma způsoby, přímou a nepřímou metodou. [39]

10.1 Přímá metoda

Spočívá ve stanovení účinnosti podle poměru tepla předaného teplovodní látce ku množství tepla přivedeného do kotle palivem ve stejném časovém úseku.

$$n = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} * 100$$

kde je: Q_{out} - teplo předané teplotnímu médiu [J/s]
 Q_{in} - teplo přivedené do kotle v palivu [J/s]
 n - účinnost spalování [%]

Teplo předané teplovodnímu médiu za čas Δt se určí ze vztahu:

$$Q_{out} = M_n * c_n * (t_{vy} - t_{vs})$$

Kde je M_n - množství napájecí vody za čas Δt [kg/s]
 c_n - střední měrná kapacita vody (4180 KJ/kg*K)
 t_{vy} - výstupní teplota napájecí vody za kotlem [°C]
 t_{vs} - vstupní teplota napájecí vody před kotlem [°C]

Teplo přivedené do kotle za čas Δt se určí podle vztahu:

$$Q_{in} = M_{pv} * Q_i$$

kde je M_{pv} - množství přivedeného tepla za čas Δt [kg/s]
 Q_i - výhřevnost paliva [J/kg]

Nevýhodou přímé metody je menší přesnost stanovení účinnosti, protože se obtížně stanovuje množství spáleného paliva M_{ps} .

10.2 Nepřímá metoda

Tato metoda je o poznání složitější, neboť stanovujeme jednotlivé ztráty. Výsledkem jsou hodnoty kotlových ztrát, které nám mohou pomoci v jejich možném snížení a zvýšení účinnosti kotle.

Nepřímá metoda vychází z předpokladu, že teoretická účinnost ideálního kotle je 100 %, a u reálného kotle je snížena jednotlivými ztrátami. [37]

Součet ztrát Z_i se vypočítá součtem jednotlivých ztrát dle vztahu:

$$\sum Z_i = Z_C + Z_{CO} + Z_f + Z_k + Z_{sv}$$

Kde	Z_i	– celková ztráta [%]
	Z_C	– ztráta způsobená únikem hořlaviny v tuhých zbytcích [%]
	Z_{CO}	– ztráta způsobená únikem plynné hořlaviny ve spalínách [%]
	Z_f	– ztráta způsobená únikem tepla v tuhých zbytcích [%]
	Z_k	– ztráta způsobená únikem tepla ve spalínách (komínová ztráta) [%]
	Z_{sv}	– ztráta způsobená odevzdáním tepla do okolí – sáláním a vedením [%]

Stanovení objemu spalín se provádí podle hmotnostního zastoupení v daného prvku v palivu a následným výpočtem. Lze však také použít rovnici, podle které zjistíme objem spalín v závislosti na výhřevnosti paliva. Tento postup sice není úplně přesný, ale pro naše stanovení objemu spalín je dostatečný. Jeho odchylka je v řádů procent. [40]

$$V_{ss} = 0,2365 * Q_i + 0,4467$$

kde je	V_{ss}	– objem spalín suchých teoretických [m^3/kg]
	Q_i	– výhřevnost paliva [MJ/kg]

Následně je nutné přepočítat teoretických suchých spalín na referenční obsah kyslíku ve spalínách. Přepočítání provedeme podle následujícího vztahu:

$$O_p = \frac{V_{ss} * 20,95}{20,95 - O_{2ref}}$$

Kde je O_p – objem spalin vzniklých spálením 1 kg paliva [m^3/kg]
 O_{2ref} – referenční obsah kyslíku ve spalinách [%]

Ztráta Z_k způsobena únikem tepla ve spalinách (komínová ztráta). Je obvykle největší ztrátou, a proto je rozhodující pro výslednou výhřevnost.

$$Z_k = \frac{O_p * c_p * (t_k - t_{air})}{Q_i} * 100$$

Kde je O_p - objem spalin vzniklých spálením 1 kg paliva [m^3/kg]
 c_p – střední měrná tepelná kapacita vlhkých spalin [$J/m^3 * K$]
 t_k – teplota spalin na výstupu z kotle [$^{\circ}C$]
 t_{air} – teplota vzduchu na vstupu do kotle [$^{\circ}C$]
 Q_i – výhřevnost spalovaného paliva [J/kg]

Ztráta Z_{CO} způsobená únikem plynné hořlaviny ve spalinách vyjadřuje ztrátu při uvolňování tepla v důsledku nedokonalého spalování hořlaviny paliva, kdy se objevují hořlavé složky ve spalinách a snižují účinnost kotle. Nejvíce se ve spalinách vyskytuje nespálená oxid uhelnatý – CO.

$$Z_{CO} = \frac{\sum Q_{Hi} * \varpi_i * O_{ps}}{Q_i} * 100$$

Kde je Q_{Hi} – výhřevnost hořlavých složek (CO 12600kJ/ m^3)
 ϖ_i – objemový podíl hořlavé složky v suchých spalinách
 O_{ps} – množství suchých spalin vzniklých z 1 kg paliva [kg]
 Q_i – výhřevnost spalovaného paliva [J/kg]

Ztráta Z_{sv} způsobena odevzdáním tepla do okolí. Pro kotle menších výkonů je založena na stanovení povrchových teplot dílčích ploch kotle a součinitele přestupu tepla.

$$Z_{sv} = \frac{A_H * t * \sum S_H * (t_i - t_m)}{m * Q_i} * 100$$

Kde je	A_H	– součinitel přestupu tepla z vnějšího povrchu kotle do okolí [W/(m ² *K)]
	t	– doba měření [s]
	S_H	– dílčí plocha [m ²]
	t_i	– teplota povrchu [°C]
	t_m	– teplota prostředí [°C]
	m	– hmotnost spáleného paliva [kg]
	Q_i	– výhřevnost spalovaného paliva [J/kg] [39]

10.3 Nepřímá metoda stanovení účinnosti

10.3.1 1. Měření – Brikety

Výpočet pomocí nepřímé metody účinnosti

Stanovení objemu spalin:

$$V_{ss} = 0,2365 * 17,4 + 0,4467 = 4,56 \frac{m^3}{kg}$$

$$V_{ref} = \frac{4,56 * 20,95}{20,95 - 12,73} = 11,62 \frac{m^3}{kg}$$

Ztráta Z_k způsobena únikem tepla ve spalinách:

$$Z_k = \frac{O_p * c_p * (t_k - t_{air})}{Q_i} * 100$$

$$Z_k = \frac{11,62 * 1034 * (160,39 - 20)}{17,4 * 10^6} * 100 = 9,69\%$$

Ztráta Z_{CO} způsobená únikem plynné hořlaviny ve spalinách:

$$Z_{CO} = \frac{\sum Q_{Hi} * \varpi_i * O_{ps}}{Q_i} * 100$$

$$Z_{CO} = \frac{12,6 * 10^6 * 3,39 * 10^{-4} * 11,62}{17,4 * 10^6} * 100 = 0,29\%$$

Kde ϖ_i , neboli objemový podíl hořlavé složky v suchých spalinách se vypočítá:

$m_{CO} = \text{průměrné množství CO} * \text{celkový objem spalin} (V_{cel})$

$$m_{CO} = 0,423 * 127,82 = 54,07 \text{ g CO}$$

$$V_{CO} = \frac{m_{CO}}{M_{(CO)}} * 22,41 = \frac{54,07}{28} * 22,41 = 43,27 dm^3$$

$$\varpi_i = \frac{V_{CO}}{V_{cel}} = \frac{0,04327}{127,82} = 3,39 * 10^{-4}$$

Ztráta Z_{sv} způsobena odevzdáním tepla do okolí:

$$Z_{sv} = \frac{A_H * t * \sum S_H * (t_i - t_m)}{m * Q_i} * 100$$

$$Z_{sv} = \frac{14 * 7200 * \sum 125,08}{11 * 17,4 * 10^6} * 100 = 6,59\%$$

$$\sum S_H * (t_i - t_m)$$

$$\begin{aligned} &= 0,35 * (40 - 20) + 0,20 * (46 - 20) + 0,18 * (95 - 20) + 0,48 \\ &* (32 - 20) + 0,15 * (118 - 20) + 0,48 * (36 - 20) + 0,15 \\ &* (116 - 20) + 0,3 * (50 - 20) + 0,43 * (100 - 20) + 0,34 \\ &* (36 - 20) + 0,08 * (120 - 20) = 125,08 \end{aligned}$$

Součet ztrát Z_i se vypočítá součtem jednotlivých ztrát dle vztahu:

$$\sum Z_i = Z_C + Z_{CO} + Z_f + Z_k + Z_{sv}$$

$$\sum Z_i = 0,29 + 9,69 + 6,59 = 13,84\%$$

Výsledná účinnost:

$$n = 100 - Z_i = 100 - 13,84 = 86,16\%$$

10.3.2 2.Měření - Brikety

Výpočet pomocí nepřímé metody účinnosti

Stanovení objemu spalin:

$$V_{ss} = 0,2365 * 17,4 + 0,4467 = 4,56 \frac{m^3}{kg}$$

$$V_{ref} = \frac{4,56 * 20,95}{20,95 - 12,88} = 11,84 \frac{m^3}{kg}$$

Ztráta Z_k způsobena únikem tepla ve spalínách:

$$Z_k = \frac{O_p * c_p * (t_k - t_{air})}{Q_i} * 100$$

$$Z_k = \frac{11,84 * 1034 * (155,20 - 20)}{17,4 * 10^6} * 100 = 9,49\%$$

Ztráta Z_{CO} způsobená únikem plynné hořlaviny ve spalínách:

$$Z_{CO} = \frac{\sum Q_{Hi} * \varpi_i * O_{ps}}{Q_i} * 100$$

$$Z_{CO} = \frac{12,6 * 10^6 * 4,65 * 10^{-4} * 11,84}{17,4 * 10^6} * 100 = 0,40\%$$

Kde ϖ_i , neboli objemový podíl hořlavé složky v suchých spalínách se vypočítá:

m_{CO} = průměrné množství CO * celkový objem spalin (V_{cel})

$$m_{CO} = 0,581 * 65,12 = 37,83 \text{ g CO}$$

$$V_{CO} = \frac{m_{CO}}{M_{(CO)}} * 22,41 = \frac{37,83}{28} * 22,41 = 30,27 \text{ dm}^3$$

$$\varpi_i = \frac{V_{CO}}{V_{cel}} = \frac{0,03027}{65,12} = 4,65 * 10^{-4}$$

Ztráta Z_{sv} způsobena odevzdáním tepla do okolí:

$$Z_{sv} = \frac{A_H * t * \sum S_H * (t_i - t_m)}{m * Q_i} * 100$$

$$Z_{sv} = \frac{14 * 3600 * \sum 114,21}{5,5 * 17,4 * 10^6} * 100 = 6,01\%$$

$$\sum S_H * (t_i - t_m)$$

$$= 0,35 * (40 - 20) + 0,20 * (54 - 20) + 0,18 * (91,5 - 20) + 0,48 * (32 - 20) + 0,15 * (105 - 20) + 0,48 * (33 - 20) + 0,15 * (107 - 20) + 0,3 * (44 - 20) + 0,43 * (90 - 20) + 0,34 * (36 - 20) + 0,08 * (115 - 20) = 114,21$$

Součet ztrát Z_i se vypočítá součtem jednotlivých ztrát dle vztahu:

$$\sum Z_i = Z_C + Z_{CO} + Z_f + Z_k + Z_{sv}$$

$$\sum Z_i = 0,40 + 9,49 + 6,01 = 15,9$$

Výsledná účinnost:

$$n = 100 - Z_i = 100 - 15,9 = 84,10\%$$

10.3.3 3. Měření - Dřevo (buk)

Výpočet pomocí nepřímé metody účinnosti

Stanovení objemu spalin:

$$V_{ss} = 0,2365 * 16,2 + 0,4467 = 4,28 \frac{m^3}{kg}$$

$$V_{ref} = \frac{4,28 * 20,95}{20,95 - 12,73} = 10,91 \frac{m^3}{kg}$$

Ztráta Z_k způsobena únikem tepla ve spalinách:

$$Z_k = \frac{O_p * c_p * (t_k - t_{air})}{Q_i} * 100$$
$$Z_k = \frac{10,91 * 1034 * (173,43 - 25)}{16,2 * 10^6} * 100 = 10,33 \%$$

Ztráta Z_{CO} způsobená únikem plynné hořlaviny ve spalinách:

$$Z_{CO} = \frac{\sum Q_{Hi} * \varpi_i * O_{ps}}{Q_i} * 100$$
$$Z_{CO} = \frac{12,6 * 10^6 * 1,17 * 10^{-3} * 10,91}{16,2 * 10^6} * 100 = 0,99 \%$$

Kde ϖ_i , neboli objemový podíl hořlavé složky v suchých spalinách se vypočítá:

m_{CO} = průměrné množství CO * celkový objem spalin (V_{cel})

$$m_{CO} = 1,467 * 60 = 88,02 \text{ g CO}$$

$$V_{CO} = \frac{m_{CO}}{M_{(CO)}} * 22,41 = \frac{88,02}{28} * 22,41 = 70,45 dm^3$$

$$\varpi_i = \frac{V_{CO}}{V_{cel}} = \frac{0,07045}{60} = 1,17 * 10^{-3}$$

Ztráta Z_{sv} způsobena odevzdáním tepla do okolí:

$$Z_{sv} = \frac{A_H * t * \sum S_H * (t_i - t_m)}{m * Q_i} * 100$$

$$Z_{sv} = \frac{14 * 3600 * \sum 102,83}{5,5 * 16,2 * 10^6} * 100 = 5,81\%$$

$$\sum S_H * (t_i - t_m)$$

$$= 0,35 * (35 - 25) + 0,20 * (56 - 25) + 0,18 * (103 - 25) + 0,48 * (32 - 25) + 0,15 * (113,5 - 25) + 0,48 * (33 - 25) + 0,15 * (125 - 25) + 0,3 * (50 - 25) + 0,43 * (86 - 25) + 0,34 * (35 - 25) + 0,08 * (118 - 25) = 102,83$$

Součet ztrát Z_i se vypočítá součtem jednotlivých ztrát dle vztahu:

$$\sum Z_i = Z_c + Z_{CO} + Z_f + Z_k + Z_{sv}$$

$$\sum Z_i = 0,99 + 10,33 + 5,81 = 17,13 \%$$

Výsledná účinnost:

$$n = 100 - Z_i = 100 - 17,13 = 82,87 \%$$

10.3.4 4. Měření - Dřevo (buk)

Výpočet pomocí nepřímé metody účinnosti

Stanovení objemu spalin:

$$V_{ss} = 0,2365 * 16,2 + 0,4467 = 4,28 \frac{m^3}{kg}$$

$$V_{ref} = \frac{4,28 * 20,95}{20,95 - 12,01} = 10,03 \frac{m^3}{kg}$$

Ztráta Z_k způsobena únikem tepla ve spalinách:

$$Z_k = \frac{O_p * c_p * (t_k - t_{air})}{Q_i} * 100$$

$$Z_k = \frac{10,03 * 1034 * (178,60 - 25)}{16,2 * 10^6} * 100 = 9,83\%$$

Ztráta Z_{CO} způsobená únikem plynné hořlaviny ve spalinách:

$$Z_{CO} = \frac{\sum Q_{Hi} * \varpi_i * O_{ps}}{Q_i} * 100$$

$$Z_{CO} = \frac{12,6 * 10^6 * 1,59 * 10^{-3} * 10,03}{16,2 * 10^6} * 100 = 1,24 \%$$

Kde ϖ_i , neboli objemový podíl hořlavé složky v suchých spalínách se vypočítá:

m_{CO} = průměrné množství CO * celkový objem spalín (V_{cel})

$$m_{CO} = 1,996 * 56,67 = 113,11g \text{ CO}$$

$$V_{CO} = \frac{m_{CO}}{M_{(CO)}} * 22,41 = \frac{113,11}{28} * 22,41 = 90,53 \text{ dm}^3$$

$$\varpi_i = \frac{V_{CO}}{V_{cel}} = \frac{0,09053}{56,67} = 1,59 * 10^{-3}$$

Ztráta Z_{sv} způsobena odevzdáním tepla do okolí:

$$Z_{sv} = \frac{A_H * t * \sum S_H * (t_i - t_m)}{m * Q_i} * 100$$

$$Z_{sv} = \frac{14 * 3600 * \sum 113,6}{5,66 * 16,2 * 10^6} * 100 = 6,24 \%$$

$$\sum S_H * (t_i - t_m)$$

$$= 0,35 * (34 - 25) + 0,20 * (65 - 25) + 0,18 * (105 - 25) + 0,48$$

$$* (32 - 25) + 0,15 * (106 - 25) + 0,48 * (33 - 25) + 0,15$$

$$* (109 - 25) + 0,3 * (56 - 25) + 0,43 * (101 - 25) + 0,34$$

$$* (37 - 25) + 0,08 * (113 - 25) = 113,6$$

Součet ztrát Z_i se vypočítá součtem jednotlivých ztrát dle vztahu:

$$\sum Z_i = Z_C + Z_{CO} + Z_f + Z_k + Z_{sv}$$

$$\sum Z_i = 1,24 + 9,82 + 6,24 = 17,30\%$$

Výsledná účinnost:

$$n = 100 - Z_i = 100 - 17,30 = 82,70 \%$$

10.4 Přímá metoda stanovení účinnosti

Při stanovení účinnosti pomocí přímé metody vycházíme z následujícího vztahu, který porovnává získané teplo z kotle vůči teplu dodanému do kotle v podobě paliva.

$$n = \frac{M_n * c_n * (t_{vy} - t_{vs})}{M_{pv} * Q_i} * 100$$

1. Měření – Brikety

$$n_1 = \frac{2004 * 4180 * (76,53 - 60,08)}{11 * 17,4 * 10^6} * 100 = 71,99 \%$$

2. Měření – Brikety

$$n_2 = \frac{1004 * 4180 * (75,40 - 59,99)}{5,5 * 17,4 * 10^6} * 100 = 67,58 \%$$

3. Měření – Dřevo (buk)

$$n_3 = \frac{1001 * 4180 * (76,91 - 60,03)}{5,5 * 16,2 * 10^6} * 100 = 79,27 \%$$

4. Měření – Dřevo (buk)

$$n_4 = \frac{1002 * 4180 * (76,77 - 59,09)}{5,65 * 16,2 * 10^6} * 100 = 80,90 \%$$

10.5 Vyhodnocení účinností

Výsledné účinnosti	Brikety		Dřevo – buk	
	1. měření	2. měření	3. měření	4. měření
sekundární vzduch [%]	20	5	33	75
přímá metoda [%]	71,99	67,58	79,27	80,90
nepřímá metoda [%]	87,34	87,68	82,87	82,70

Tabulka 15 - výsledné účinnosti

Výsledná účinnost byla vypočítaná pomocí dvou metod, přímé metody, která porovnává získané a přivedené teplo. A také pomocí nepřímé metody, u které předpokládáme že teoretická účinnost spalování je 100 %, a výsledná účinnost je dána odčítáním jednotlivých ztrát během spalování (komínová ztráta, ztráta odevzdáním tepla do okolí, nebo ztráta způsobena únikem hořlaviny v tuhých zbytcích).

V nepřímé metodě byly stanoveny jednotlivé ztráty. Můžeme si povšimnout, že největší ztráty jsou způsobeny únikem tepla ve spalinách a odevzdáním tepla z povrchu kotle do okolí. Naopak nejmenší ztrátou je ztráta únikem plynné hořlaviny ve spalinách (konkrétně CO, protože u dalších prvků ve spalinách nebyla měřena jejich koncentrace v průběhu měření), která se pohybuje okolo jednoho procenta. Dále je potřeba říct, že ztráta způsobena únikem hořlaviny v tuhých zbytcích nebyla stanovena, protože mezi jednotlivými měřeními nebyl dostatečný časový prostor k vychladnutí kotle a následnému určení hmotnosti popela. Z tohoto důvodu je výsledná účinnost stanovena nepřímou metodou vyšší, než by byla reálná účinnost kotle. Při spalování briket je ztráta únikem hořlaviny v tuhých zbytcích větší, přibližně okolo 10 % a více, při spalování dřeva se tato ztráta pohybuje v řádů jednotek procent.

Při porovnání výsledků nepřímé metody u spalování briket a dřeva, je zřejmé že nastavení množství sekundárního vzduchu nemá velký vliv na účinnost kotle. Rozdíl účinností je do jednoho procenta.

Při určení účinnosti pomocí přímé metody nám účinnost vyšla podstatně nižší. Během spalování briket je účinnost pouze okolo 70 %, zatímco u nepřímé metody je výsledná účinnost téměř 88 %. Tak velký rozdíl v účinnosti mezi přímou a nepřímou metodou u spalování briket je dán absencí ztráty způsobenou únikem hořlaviny v tuhých zbytcích. Při porovnání výsledné účinnosti pomocí přímé a nepřímé metody při spalování dřeva jsou výsledné rozdíly účinnosti okolo 2–3 %, avšak i tady není započítána ztráta únikem hořlaviny v tuhých zbytcích u nepřímé metody.

Nižší účinnost spalování briket vypočítána pomocí přímé metody je dána tím, že kotel není primárně určen ke spalování briket, ale je uzpůsoben ke spalování dřeva. Výrobce udává účinnost spalování pro dřevo v rozmezí 83–88 %, nám vyšla účinnost pomocí přímé metody nižší (79,27 % a 80,90%), tento rozdíl je dán tím, že výrobci dokáží nastavit optimální podmínky pro spalování v určitém kotli.

Odchyly výsledných vypočítaných účinností mohou být dány rozdílným přístupem ke stanovení účinnosti, nepřesností měření, špatným odečtem hodnot, nebo také možnou chybou při výpočtu. Dále je potřeba uvést, že při měření nebyly nastaveny optimální podmínky pro spalování paliva.

11 Závěr

Bakalářská práce se zabývá problematikou kotlů na tuhá paliva, především popisem jednotlivých paliv, rozdělením kotlů, popisem emisních tříd. V praktické části byly porovnány emise oxidu uhelnatého a vypočítána účinnost pomocí přímé a nepřímé metody.

Při vytápění pomocí kotle Dakon Damat PYRO 20G, který je určený ke spalování dřeva, můžeme podle měření vyhodnotit jednotlivá paliva. Při spalování briket kotel produkuje přibližně $700 \text{ mg/m}^3_{\text{N}}$ CO při 10 % O_2 , a při spalování dřeva, konkrétně buku produkuje $2440 \text{ mg/m}^3_{\text{N}}$ CO při 10 % O_2 . 3. emisní třída udává maximální množství CO na $5000 \text{ mg/m}^3_{\text{N}}$ při 10 % O_2 , a daný kotel tedy tuto 3. emisní třídu splňuje i při běžných podmínkách spalování.

Při porovnání vypočítané účinnosti pomocí přímé a nepřímé metody vychází účinnost při spalování dřeva podobně, avšak u nepřímé metody není zohledněna ztráta vlivem úniku hořlaviny v tuhých zbytcích, tudíž konečný výsledek pomocí nepřímé metody by byl nižší v řádů procent. Při spalování briket je rozdíl větší, a také u nepřímé metody zde není zohledněna ztráta hořlaviny v tuhých zbytcích, která zde bude větší (okolo 10 a více %).

Výsledné účinnost spalování počítána pomocí přímé metody dosahuje 72 % u spalování briket a 80 % při spalování dřeva. 3. emisní třída požaduje účinnost minimálně 75 %, a daný kotel ji při spalování dřeva splňuje.

Pro zvýšení účinnosti a snížení emisí při spalování bych volil nové modely zplyňovacích kotlů, které již splňují 4. nebo 5. emisní třídu a dosahují účinnosti až okolo 90 %. Dále bych dodal, že i když není daný kotel nejnovější, tak při spalování produkuje daleko méně emisí a má vyšší účinnost než starší typy kotlů, jako jsou kotle odhořivací a prohořivací.

12 Seznam použité literatury

- [1] Uhlí – Wikipedie [online]. [cit. 27.10.2017]. Dostupné z <https://cs.wikipedia.org/wiki/Uhl%C3%AD>
- [2] Spalování tuhých paliv – Energetika.tzb-info [online]. [cit. 27.10.2017]. Dostupné z <http://energetika.tzb-info.cz/8618-o-spalovani-tuhych-paliv-v-lokalnich-topenistich-1>
- [3] Vlastnosti hořlaviny – česká asociace pro pyrolýzu a zplyňování [online]. [cit. 27.10.2017]. Dostupné z <http://www.cpga.cz/veda-a-vyzkum/zarizeni-vscht>
- [4] BALÁŠ, Marek. Kotle a výměníky tepla. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. 119 s. ISBN 978-80-214-3955-9.
- [5] Ing. Jan Novák, Výhřevnosti paliv – tabulka [online]. [cit. 27.10.2017]. Dostupné z <http://vytapani.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/11-vyhrevnosti-paliv>
- [6] Palivo - Wikipedie [online]. [cit. 27.10.2017]. Dostupné z <https://cs.wikipedia.org/wiki/Palivo>
- [7] Sírnatost jednotlivých paliv- Ing. Přemysl Kól [online]. [cit. 27.10.2017]. Dostupné z <http://spalovaci-procesy.wz.cz/TP.html>
- [8] Uhlí - Wikipedie [online]. [cit. 27.10.2017]. Dostupné z <https://cs.wikipedia.org/wiki/Uhl%C3%AD>
- [9] OKD Jak uhlí vzniklo [online]. [cit. 29.10.2017]. Dostupné z <http://www.okd.cz/cs/tezime-uhli/jak-uhli-vzniklo>
- [10] Těžba hnědého uhlí na odbyt loni v Česku mírně poklesla [online]. [cit. 2.11.2017]. Dostupné z <http://oenergetice.cz/rychle-zpravy/tezba-hnedeho-uhli-na-odbyt-loni-v-cesku-mirne-poklesla/>
- [11] Těžba a využití černého uhlí - Stěnování [online]. [cit. 5.11.2017]. Dostupné z <http://tezba-a-vyuziti-cerneho-uhli.webnode.cz/hornictvi/dobyci-metody/stenovani/>
- [12] Ostravsko-Karvinská uhelná pánev [online]. [cit. 2.11.2017]. Dostupné z <http://www.okd.cz/cs/tezime-uhli/ostrovsko-karvinska-uhelna-panev>
- [13] Uhlí – složení – geologická encyklopedie [online]. [cit. 5.11.2017]. Dostupné z <http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl?uhli>
- [14] Stěnování – těžba a využití černého uhlí [online]. [cit. 5.11.2017]. Dostupné z <https://tezba-a-vyuziti-cerneho-uhli.webnode.cz/hornictvi/dobyci-metody/stenovani/>
- [15] Elektrárna detmarovice [online]. [cit. 5.11.2017]. Dostupné z <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/uhelne-elektrany/cr/detmarovice.html>
- [16] Katalog uhlí - Bílina [online]. [cit. 5.12.2017]. Dostupné z http://www.sd-bilinskeuhli.cz/dokumenty/Katalog_2018.pdf
- [17] Biomasa [online]. [cit. 5.12.2017]. Dostupné z <http://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/biomasa-vyuziti-zpracovani-vyhody-a-nevyhody/>

- [18] Biomasa [online]. [cit. 5.12.2017]. Dostupné z <http://www.biomasa2010.cz/co-je-to/>
- [19] Biomasa [online]. [cit. 5.12.2017]. Dostupné z <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/biomasa-pro-energii-1-zdroje>
- [20] Biomasa - příručka [online]. [cit. 5.12.2017]. Dostupné z <http://www.biomasa-info.cz/cs/doc/prirucka1.pdf>
- [21] Pyrolýza [online]. [cit. 8.12.2017]. Dostupné z <http://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/pyrolyza-princip-historie-a-soucasnost/>
- [22] Bionafta [online]. [cit. 8.12.2017]. Dostupné z <http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=bionafta&site=doprava>
- [23] Biomasa – zpracování [online]. [cit. 8.12.2017]. Dostupné z http://www2.zf.jcu.cz/~moudry/skripta/4/energie_biomasy.html
- [24] Dřevo – výhřevnost [online]. [cit. 8.12.2017]. Dostupné z <http://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/4844-topeni-kusovym-drevem-je-nejlevnejsi-ale>
- [25] Vytápění dřevem [online]. [cit. 12.12.2017]. Dostupné z <https://www.nazeleno.cz/vytapeni/biomasa/drevo-na-vytapeni-7-otazek-a-odpovedi.aspx>
- [26] Vlastnosti pelet [online]. [cit. 12.12.2017]. Dostupné z <http://www.ceska-peleta.cz/pelety-a-brikety/vyroba-drevnich-pelet/>
- [27] Kotle na tuhá paliva [online]. [cit. 9.2.2018]. Dostupné z <http://www.iczt.cz/cs/doc/kotleMV.pdf>
- [28] Účinnost vytápění [online]. [cit. 9.2.2018]. Dostupné z <http://vytapeni.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/9798-jak-vybirat-novy-kotel-na-pevna-paliva-1>
- [29] Rozdělení kotlů na tuhá paliva [online]. [cit. 9.2.2018]. Dostupné z <http://vytapeni.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/11107-stanoveni-ucinnosti-kotlu>
- [30] Kotle na tuhá paliva [online]. [cit. 9.2.2018]. Dostupné z <http://vytapeni.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/10844-ocelovy-nebo-litinovy-automaticky-kotel>
- [31] Emise [online]. [cit. 15.2.2018]. Dostupné z http://www.mzp.cz/cz/narodni_program_snizovani_emisi
- [32] vytápění tuhými palivy [online]. [cit. 15.2.2018]. Dostupné z <https://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/15419-bilancovani-emisi-znecistujicich-latek-z-vytapeni-ceskych-domacnosti-tuhymi-palivy>
- [33] Limity emisí – emisní normy [online]. [cit. 15.2.2018]. Dostupné z <https://vytapeni.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/9665-jake-parametry-musi-splnit-kotle-na-tuha-paliva-legislativa-v-cr-a-evrope>
- [34] Zelená úsporám – kotlíková dotace [online]. [cit. 15.2.2018]. Dostupné z <http://www.kovarson.cz/cs/kotlikova-dotace-2-vyzva-2017--a1>
- [35] platnost emisních tříd [online]. [cit. 25.2.2018]. Dostupné z <http://www.dakon.cz/nebojte-se-tridy-3/>

- [36] Obsah vodíku v briketách Union [online]. [cit. 16.04.2018]. Dostupné z <http://www.uhli-kohar.cz/file.php?nid=13507&oid=6099457>
- [37] Obsah vodíku ve dřevě [online]. [cit. 16.04.2018]. Dostupné z <https://www.fld.czu.cz/dl/59778?lang=cs>
- [38] Ekodesign [online]. [cit. 25.2.2018]. Dostupné z <http://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/12909-co-musi-splnit-novy-kotel-na-tuha-paliva-po-roce-2020>
- [39] stanovení účinnosti kotle [online]. [cit. 20.3.2018]. Dostupné z <https://vytapeni.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/11107-stanoveni-ucinnosti-kotlu>
- [40] Stanovení objemu spalin [online]. [cit. 20.3.2018]. Dostupné z <http://www.emise.cz/clanek/aktualni-podklady/13>
- [41] Přepočet spalného tepla na výhřevnost [online]. [cit. 16.4.2018]. Dostupné z https://fbiweb.vsb.cz/materialy/NM/pdf/spalene_teplo.pdf

12.1 Obrázky

[obrázek 1] Vznik uhlí [online]. [cit. 29.10.2017]. Dostupné z <https://tezba-a-vyuziti-cerneho-uhli.webnode.cz/uhli/vznik/>

[obrázek 2] Těžba uhlí v Podkrušnohoří [online]. [cit. 2.11.2017]. Dostupné z <http://litvinov.sator.eu/kategorie/krusnohori/v-prirode/tezba-uhli-v-podkrusnohori>

[obrázek 3] Těžba a využití černého uhlí - Stěnování [online]. [cit. 5.11.2017]. Dostupné z <http://tezba-a-vyuziti-cerneho-uhli.webnode.cz/hornictvi/dobyci-metody/stenovani/>

[obrázek 4] Prohořivací a odhořivací kotel [online]. [cit. 5.2.2018]. Dostupné z <https://vytapeni.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/9798-jak-vybirat-novy-kotel-na-pevna-paliva-1>

[obrázek 5] Prohořivací kotel [online]. [cit. 5.2.2018]. Dostupné z <https://biom.cz/cz/obrazek/zplynovaci-kotel-na-drevo-guntamatic-synchro>

12.2 Grafy

[graf 4, graf 5] kotel s ručním a automatickým přikládáním [online]. [cit. 5.2.2018]. Dostupné z <http://www.iczt.cz/cs/doc/kotleMV.pdf> str. 36,37.

13 Seznam symbolů

W	– obsah vody v palivu neboli vlhkost [%]
m_v	– hmotnost vody v palivu [kg]
m	– celková hmotnost paliva [kg]
H	– výhřevnost [$J \cdot kg^{-1}$]
Q	– teplo uvolněné spalováním [J]
m	– hmotnost látky [kg]
m_C	– hmotnostní podíl uhlíku v palivu [%]
m_H	– hmotnostní podíl vodíku v palivu [%]
m_O	– hmotnostní podíl kyslíku v palivu [%]
m_S	– hmotnostní podíl síry v palivu [%]
m_{H_2O}	– hmotnostní podíl vody v palivu [%]
H_u	– dolní výhřevnost, jednotka [$Kj \cdot kg^{-1}$]
Q_n	– výhřevnost paliva [J/g]
Q_s	– spalné teplo [J/g]
24,53	- koeficient odpovídající 1 % vody ve vzorku při teplotě 20 °C [$J \cdot g$]
W	- obsah vody v analytickém vzorku [%]
8,94	– koeficient pro přepočítání vodíku na vodu
H_h	– obsah vodíku v analytickém vzorku
Q_{out}	- teplo předané teplotnímu médiu [J/s]
Q_{in}	- teplo přivedené do kotle v palivu [J/s]
n	– účinnost spalování [%]
M_n	– množství napájecí vody za čas Δt [kg/s]
c_n	– střední měrná kapacita vody (4180 $Kj/kg \cdot K$)
t_{vy}	– výstupní teplota napájecí vody za kotlem [°C]
t_{vs}	– vstupní teplota napájecí vody před kotlem [°C]
M_{pv}	- množství přivedeného tepla za čas Δt [kg/s]
Q_i	– výhřevnost paliva [J/kg]
Z_i	- celková ztráta [%]
Z_C	- ztráta způsobená únikem hořlaviny v tuhých zbytcích [%]
Z_{CO}	- ztráta způsobená únikem plynné hořlaviny ve spalinách [%]
Z_f	- ztráta způsobená únikem tepla v tuhých zbytcích [%]
Z_k	- ztráta způsobená únikem tepla ve spalinách (komínová ztráta) [%]
Z_{sv}	- ztráta způsobená odevzdáním tepla do okolí – sáláním a vedením [%]
V_{ss}	– objem spalin suchých teoretických [m^3/kg]
Q_i	– výhřevnost paliva [MJ/kg]
O_p	– objem spalin vzniklých spálením 1 kg paliva [m^3/kg]
O_{2ref}	– referenční obsah kyslíku ve spalinách [%]
O_p	- objem spalin vzniklých spálením 1kg paliva [m^3/kg]
c_p	- střední měrná tepelná kapacita vlhkých spalin [$J/m^3 \cdot K$]
t_k	- teplota spalin na výstupu z kotle [°C]
t_{air}	- teplota vzduchu na vstupu do kotle [°C]

- Q_i - výhřevnost spalovaného paliva [J/kg]
 Q_{HI} - výhřevnost hořlavých složek (CO 12600kJ/m³)
 ϖ_i - objemový podíl hořlavé složky v suchých spalinách
 O_{ps} - množství suchých spalin vzniklých z 1 kg paliva [kg]
 Q_i - výhřevnost spalovaného paliva [J/kg]
 A_H - součinitel přestupu tepla z vnějšího povrchu kotle do okolí [W/(m²*K)]
 t - doba měření [s]
 S_H - dílčí plocha [m²]
 t_i - teplota povrchu [°C]
 t_m - teplota prostředí [°C]
 m - hmotnost spáleného paliva [kg]
 Q_i - výhřevnost spalovaného paliva [J/kg]
 CO - výsledné množství CO [mg/m³_N] při 10 % O_2
 CO_{avg} - průměrné množství CO v měření při určité koncentraci [mg/m³_N]
 $O_{2standart}$ - požadované množství O_2 [%]
 O_{2avg} - průměrné množství O_2 během spalování [%]