



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

OVĚŘENÍ ÚČINNOSTI A EMISNÍ TŘÍDY KOTLŮ NA TUHÁ PALIVA

BOILERS FOR SOLID FUEL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michal Biskup

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Patrik Elbl

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Michal Biskup**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojírenského inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Patrik Elbl**
Akademický rok: 2018/19

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

Ověření účinnosti a emisní třídy kotlů na tuhá paliva

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Domovní vytápění tuhými palivy se dostává díky nízkým cenám paliva znovu do popředí a to i přes velkou snahu snižování negativních ekologických vlivů tohoto zdroje.

Náplní práce je posouzení užitečných vlastností různých typů kotlů a provedení experimentu za účelem ověření účinnosti a emisní třídy kotle pro různé typy paliv.

Cíle bakalářské práce:

- Rešerše dostupných druhů tuhých paliv a jejich úprav pro domovní vytápění.
- Přehled kotlů na tuhá paliva.
- Experiment s cílem ověření účinnosti a emisní třídy kotle pro různé typy paliv.

Seznam doporučené literatury:

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

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

QUASCHNING, Volker. Obnovitelné zdroje energií. Praha: Grada, 2010. Stavitel. ISBN 978-80-2-7-3250-3.

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

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce má za cíl pojednat o kotlích na tuhá paliva malých výkonů (do 500 kW). Teoretická část se zabývá základním rozdělení paliv a kotlů. Je zde podrobně popsáno složení a typy paliv. Dále je zde uvedeno rozdělení kotlů a emisních požadavků. Praktická část je věnována popisu experimentu, který se prováděl na zkušebním kotli Dakon Damat Pyro 20 G. Experiment proběhl dle normy ČSN EN 303-5, podle které byl daný kotel testován při certifikaci. V závěrečné části jsou diskutovány a srovnány výsledky dle daných norem.

Klíčová slova

Kotel, palivo, emise, účinnost, zplyňování

ABSTRACT

The aim of the bachelor thesis is to discuss about boilers for solid fuel which small output (up to 500 kW). The theoretical part deals with basic distribution of fuel and boilers. The composition and type of fuel are described here in more detail. Further, there is listed the distribution of boilers and emission requirements. The practical part is devoted to the description of the experiment, which was carried out on the testing boiler Dakon Damat Pyro 20 G. The experiment was conducted in accordance with the ČSN EN 303-5 according to which the boiler was testing during certification. The results are discussed and compared according to given standards in the final part.

Keywords

Boiler, fuel, emission, efficiency, gasification

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BISKUP, Michal. Ověření účinnosti a emisní třídy kotlů na tuhá paliva [online]. Brno, 2019, 55 s, [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116673>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Patrik Elbl.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci na téma Ověření účinnosti a emisní třídy kotlů na tuhá paliva vypracoval samostatně pod vedením svého vedoucího práce Ing. Patrika Elbla. Vycházel jsem pouze ze svých vědomostí a znalostí, odborných konzultací a s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na konci práce.

V Brně dne 20. 5. 2019

.....

Michal Biskup

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Patriku Elblovi za obětavou spolupráci, cenné rady, připomínky a odborné vedení po celou dobu řešení tématu bakalářské práce. Poděkování patří rovněž panu Ing. Otakaru Štelcovi za odbornou pomoc a čas, který mi věnovali při experimentálním měření.

Michal Biskup

Obsah

Úvod.....	15
1 Paliva.....	17
1.1 Paliva tuhá.....	17
1.2 Složení paliva.....	17
1.2.1 Hořlavina.....	17
1.2.2 Voda v palivu.....	18
1.2.3 Popelovina v palivu.....	19
1.2.4 Spalné teplo.....	19
1.2.5 Výhřevnost.....	20
1.2.6 Sírnatost.....	20
1.3 Uhlí.....	21
1.3.1 Typy uhlí.....	22
1.3.2 Umělá uhelná paliva.....	23
1.3.3 Srovnání různých druhů paliv.....	24
1.4 Biomasa.....	24
1.4.1 Zpracování biomasy pro energetické účely.....	25
1.4.2 Dřevo.....	26
1.4.3 Brikety.....	27
1.4.4 Pelety.....	27
1.5 Srovnání různých typů tuhých paliv.....	28
2 Kotle na tuhá paliva.....	29
2.1 Kotle na tuhá paliva podle způsobu přísunu spalovacího vzduchu.....	29
2.2 Kotle na tuhá paliva podle způsobu dodávky paliva.....	30
2.2.1 Kotle s manuálním přikládáním (ruční).....	30
2.2.2 Automatické kotle.....	30
2.3 Typy kotlů na tuhá paliva podle použité technologie.....	30
2.3.1 Prohořivací kotle.....	30
2.3.2 Odhořivací kotle.....	31
2.3.3 Zplyňovací kotle.....	32
2.4 Kotle na tuhá paliva podle druhu spalovaného paliva.....	32
2.5 Emise znečišťujících látek.....	33
2.5.1 Ekodesign.....	33
2.5.2 Legislativa.....	34

3	Experiment ověření účinnosti a emisní třídy kotle na tuhá paliva.....	35
3.1	Dakon Damat Pyro 20 G	35
3.2	Popis experimentu	36
3.3	Použité palivo	37
3.4	Měřicí vybavení.....	37
3.5	Průběh měření	39
3.6	Experiment ověření emisní třídy kotle Dakon Damat Pyro 20 G	39
3.6.1	Výsledky měření plynných emisí.....	40
3.6.2	Výsledky měření tuhých emisí.....	44
3.7	Účinnosti kotle	46
3.7.1	Experiment ověření účinnosti kotle Dakon Damat Pyro 20 G	46
3.8	Vyhodnocení zkoušky dle normy ČSN EN 303-5	47
3.9	Vyhodnocení zkoušky podle směrnice o Ekodesignu.....	48
	Závěr	49
	Seznam použité literatury	50
	Seznam použitých symbolů a zkratk.....	53
	Seznam obrázků	54
	Seznam tabulek	55
	Seznam grafů	55

Úvod

Více jak 650 000 domácností v České republice pro získání TUV¹ využívá kotle na tuhá paliva zejména díky nízkým cenám tuhých paliv. Jedná se především o kotle malých výkonů (do 500 kW) [19].

Současný trend snižování emisí samozřejmě nemohl neposkvřnit tyto zařízení. Evropská unie vydala řadu norem a směrnic. V současné době se jedná hlavně o směrnici o Ekodesignu 2009/125/ES, která doplnila dřívější normu ČSN EN 303-5. Podle těchto norem rozdělujeme spalovací zařízení do emisních tříd. Emisní třídy jsou rozděleny dle maximálního množství CO, NO, TZL², OCG³ a v neposlední řadě také minimální účinnost. Každý kotel před uvedením na Evropský trh musí získat certifikaci, která probíhá ve specializovaných laboratořích. Současně při certifikaci kotel obdrží také danou emisní třídu. Zavedení těchto norem klade nároky zejména na výrobce. Výrobci jsou tak nuceni zdokonalovat konstrukční řešení, což se daří zejména u zplyňovacích kotlů, kde výrobci dosahují velmi dobrých hodnot.

V roce 2022 bude mnoho uživatelů nuceno vyměnit svůj dosavadní kotel. Tento rok totiž padne v platnost zákaz používání kotlů 1. a 2. tříd. Evropská unie se tyto kotle snaží regulovat už dlouho dobu, a to také zejména kotlíkovou dotací. Pomocí této dotace lze získat značnou část finanční investice do nového kotle zpět.

Cílem této práce je vypracování dostupných druhů tuhých paliv a přehledu kotlů na tuhá paliva. Druhá část práce se zabývá provedením experimentu na zplyňovacím kotli za účelem naměření potřebných hodnot pro stanovení emisní třídy a účinnosti. Tento experiment podléhá normě ČSN EN 303-5.

¹ TUV je zkratka označující teplou užitkovou vodu

² TZL je zkratka pro tuhé znečišťující látky. Jedná se o mechanické částice od 0,1 μm po 0,5 mm.

³ OCG je zkratka pro organické plynné sloučeniny (uhlovodíky)

1 Paliva

Palivo je všeobecné označení pro chemickou látku nebo jejich směsi, mající schopnost za vhodných podmínek začít a udržet chemickou reakci spalování. Při spalování se uvolňuje chemická energie obsažená v palivu a přeměňuje se hlavně na tepelnou energii, kterou je možné dál využít [1]. Spalování probíhá za vysokých teplot a dostatečného množství vzduchu.

Paliva dělíme na paliva:

- tuhá,
- kapalná,
- plynná.

Paliva lze také dělit podle jejich původu:

- fosilní – paliva, která nelze obnovit (ropa, uhlí, zemní plyn),
- obnovitelná – zejména biomasa,
- odpadní – paliva, která vznikají jako vedlejší produkt lidské činnosti (různé druhy odpadu, odpadní plyny, kaly z čistíren odpadních vod).

U paliv jsou zejména důležité náklady spojené s těžbou, popř. výrobou, které by měly být co nejmenší.

1.1 Paliva tuhá

Nejčastějším tuhým palivem je uhlí, dále se do této skupiny paliv řadí biomasa, průmyslové, zemědělské a komunální odpady.

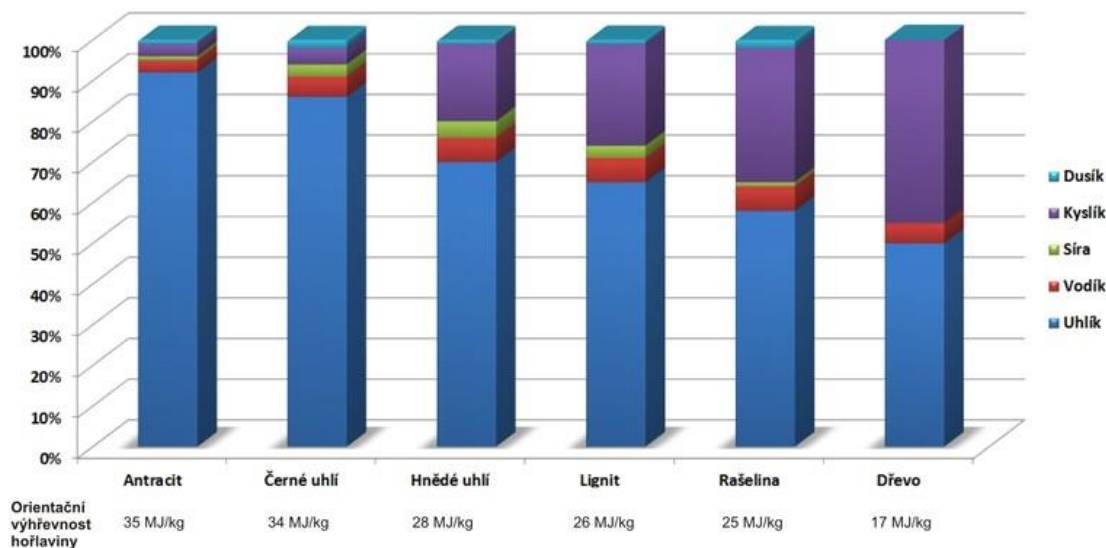
1.2 Složení paliva

Palivo se skládá ze dvou základních částí. První část je hořlavina (h), která je v palivu žádaná, protože hořlavina je nositelem energie. Druhá část paliva je balast (přítěž). Balast je část, která nepřináší žádný energetický zisk, ale přesto je v palivu obsažena. Touto přítěží neboli balastem máme na mysli vodu v palivu (W) a popelovinu (A). Čím menší obsah vody a popeloviny palivo obsahuje, tím více se zvyšuje kvalita paliva, jednodušeji probíhá proces spalování a obsahuje tudíž více energie. Obsah popeloviny nám dále ovlivňuje emise tuhých znečišťujících látek (prach) a rovněž zanesení spalovacího zařízení (odpopelnění – tuhý zbytek po spálení nazýváme popelem).

1.2.1 Hořlavina

Organická složka paliva (hořlavina) se skládá s pěti základních prvků: C – uhlík, H – vodík, O – kyslík, N – dusík a S – síra. První tři prvky zásadním způsobem ovlivňují vlastní spalovací proces a poslední dva spíše ovlivňují produkci znečišťujících látek (tvorba oxidů dusíku – NO_x a oxidu siřičitého – SO_2). Uhlík, vodík a síra představují aktivní prvky hořlaviny a jsou nositeli chemicky vázané energie, která se při jejich spalování uvolňuje. Kyslík a dusík představují pasivní složku hořlaviny, protože nepřináší žádnou energetickou hodnotu. Složení hořlaviny jednotlivých paliv je proměnlivé, ale pro srovnání jsou na Obr. 1-1 uvedeny průměrné hodnoty prvkového složení hořlaviny. „Mladá“ paliva (biomasa) jsou málo prouhelněna, takže obsahují nejméně uhlíku (cca

45 %), ale více vodíku (cca 5 %) a kyslíku (cca 40 %). Stejně tak obsahují více prchavé hořlaviny (hořlavina, která se po dostatečném zahřátí uvolňuje v podobě hořlavých plynů), takže se snáze zapalují a hoří větším plamenem [2].



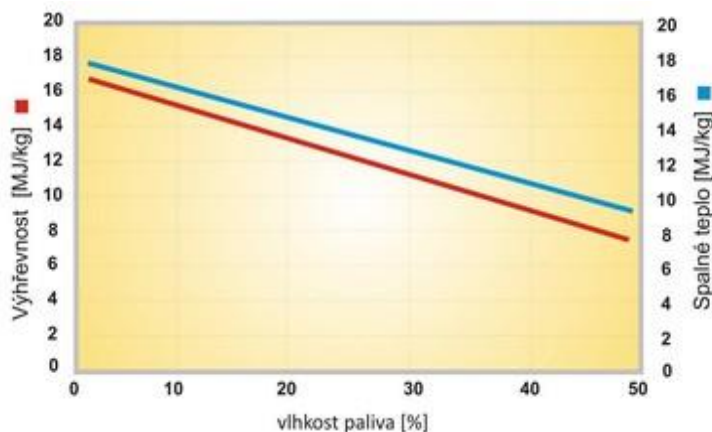
Obr. 1-1 Srovnání prvkového složení hořlaviny různých paliv včetně výchřevností [2].

1.2.2 Voda v palivu

Voda, společně se vzduchem, tvoří základní podmínky pro existenci života na Zemi, také je základní stavební látkou živých těl. Na druhou stranu voda, která je obsažená v tuhých palivech, je nežádoucí. Snižuje výchřevnost paliva a působí mnoho komplikací nejen při dopravě, ale i při samotném spalování. Z paliva voda odchází se spalinami v podobě vodní páry, tím zvětšuje obsah spalin. Snižuje teplotu spalování, zvyšuje komínovou ztrátu a pohlcuje část uvolněného tepla. Voda v palivu také ovlivňuje životnost kotle, pokud teploty spalin poklesnou pod hranici rosného bodu, urychlují korozi kotle.

Obsah vody v palivu lze výrazně ovlivnit sušením. Kdyby dřevo bylo naprosto suché, tak by jeho výchřevnost (hovoříme o výchřevnosti hořlaviny, popelovina je zanedbatelná, její obsah bývá většinou menší než 1 %) byla kolem 17 MJ/kg_{hořlaviny}. Bohužel surové dřevo

(čerstvě pokácené) obsahuje značné množství vody (je mokré, „živé“). Obsah vody je ovlivněn druhem stromu a také ročním obdobím, ve kterém byl strom pokácen. Obsah vody v surovém dřevu se pohybuje přibližně od 40 do 60 hmotnostních procent. Závislost výchřevnosti dřeva na jeho vlhkosti je uvedena na Obr. 1-2. Zjednodušeně můžeme říci, že polovina surového dřeva je tvořena



Obr. 1-2 Závislost výchřevnosti a spalného tepla dřeva na jeho vlhkosti [2].

vodou a druhá polovina je tvořena hořlavinou, takže výhřevnost surového dřeva bude přibližně poloviční ($8,5 \text{ MJ/kg}_{\text{dřeva}}$ – ve skutečnosti to bude ještě méně o výparné teplo vody $1,2 \text{ MJ/0,5kg}_{\text{vody}}$) ve srovnání s výhřevností samotné hořlaviny ($17 \text{ MJ/kg}_{\text{hořlaviny}}$). Výhřevnost dřeva po jednom roce sušení na vzduchu se zvýší cca na $11,2 \text{ MJ/kg}_{\text{dřeva}}$ a po dvou letech sušení, kdy dřevo můžeme již považovat za vysušené a vhodné pro spalování (obsah vody pod 20 %), se zvedne jeho výhřevnost přibližně na $13,1 \text{ MJ/kg}_{\text{dřeva}}$ [2].

1.2.3 Popelovina v palivu

Popelovinou jsou myšleny minerální látky (křemičitany, uhličitany, sírany a další), které se vyskytují v tuhém palivu před jeho spálením. Spálením se popelovina přemění na tuhý zbytek, tzv. popel. Popel může také vznikat z nečistot přimíšených během těžby, transportu nebo skladování paliva (písek, hlína, kamení). Ze spalovací komory popel odchází v podobě strusky, škváry nebo popílku. Pokud dojde ke spálení nad teplotou tečení popela, vzniká struska, která obsahuje minerální zbytky paliva. Škvára vzniká spalováním za teploty, při které nastane spékání a tavení, tj. část minerálních zbytků dosáhne měknutí nebo teploty tavení popela a následně nastane spojení jednotlivých zrn na větší části. Minerální částice, které jsou unášené spalinami, nazýváme popílek [3].

Pro stavbu a provoz kotlů spalujících tuhá paliva jsou velmi důležité charakteristické teploty popele, které nám určují chování popele při různých teplotách. Jedná se o teplotu sintrace, měknutí (t_a), tavení (t_b) a tečení (t_c). Jedním ze způsobů určení těchto teplot je metoda založená na sledování deformace volného zkušebního tělíska (dle ČSN ISO 540). Princip spočívá v ohřívání válečku nebo jehlanu o hraně 3 mm vylišovaného ze zkušebního popele. Pro teplotu měknutí t_a je charakteristické ohnutí špičky jehlanu, teplota tavení t_b je dosažena, když se jehlan zhroutí v polokouli a teplota tečení t_c , když se vzorek rozteče na podložce [3].

V kotli může docházet k nalepování popele na výhřevné plochy. Tento proces nám začne probíhat při překročení teploty t_a a má za následek zhoršení prostupu tepla ze spalin do média, tudíž sníží účinnost kotle. K roztavení popele dojde při teplotě t_c . Charakteristické teploty popele jsou ovlivněny chemickým složením. Prvky jako SiO_2 , Al_2O_3 teploty zvyšují a prvky Fe_2O_3 , MgO , CaO teploty snižují. Popel v kotli při spalování zabraňuje přístupu kyslíku k hořlavině, usazuje se na teplosměnných plochách, zhoršuje přenos tepla a tvoří nánosy. Spaliny se méně ochlazují a komínová ztráta roste. Vlivem ucpávání tahů kotle se zvyšuje odpor průtoku spalin [3].

1.2.4 Spalné teplo

Spalné teplo Q_s ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$) je teplo uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na $20 \text{ }^\circ\text{C}$, přičemž voda ve spalinách zkondenzuje, tj. je v kapalné fázi [3].

Spalné teplo se stanoví za pomoci kalorimetru. Kalorimetr je nádoba podobná termosce, uvnitř je vodní lázeň a kalorimetrická bomba, ve které se spálí jednotkové množství (většinou přibližně 0,5 g) paliva v kyslíkové atmosféře o přibližném tlaku 2,5 MPa. Teplo, které se uvolní při spálení, ohřeje vodní lázeň kalorimetru a z tohoto se následně spočítá spalné teplo dle vzorce:

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

kde V [kJ·K⁻¹] vodní hodnota kalorimetru,
G [kg] hmotnost paliva [3].

1.2.5 Výhřevnost

Výhřevnost Q_i^r (kJ·kg⁻¹) je teplo uvolněné dokonalým spálením 1kg paliva při ochlazení spalin na 20 °C, přičemž voda ve spalinách zůstane v plynné fázi. Tím, že voda ve spalinách nekondenzuje, ale zůstává v plynné fázi, se neuvolňuje skupenské teplo vody na rozdíl od spalného tepla. Výhřevnost paliva se nedá změřit, určuje se ze spalného tepla pomocí rovnice:

$$Q_i^r = Q_s - r \cdot (W^r + 8,94 \cdot H_2) \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}\text{]}, \quad (2)$$

kde r [kJ·kg⁻¹] výparné/kondenzační teplo vody, r = 2454 kJ·kg⁻¹,
W^r [-] obsah vody v palivu,
H₂ [-] obsah vodíku v surovém palivu (z 1 kg vodíku vznikne 8,94 kg vody) [3].

Další možnost zjištění výhřevnosti paliva je za pomoci Mendělejeva vztahu

$$Q_i^r = 33910 \cdot C^r + 120580 \cdot \left(H^r - \frac{O^r}{8}\right) + 10470 \cdot S^r - 2453 \cdot W^r \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}\text{]}, \quad (3)$$

kde C, H, O, S [-] obsah prvku v palivu,
W^r [-] obsah vody v palivu [3].

1.2.6 Sirnatost

Síra v palivu se vyskytuje jako organická (spalitelná), pyritická a síranová (příp. siřičitá) – odchází v popelu. Spalitelná síra se nazývá též sírou prchavou a tvoří cca 65 % veškeré síry v palivu (pro severočeské uhlí). I když oxidace síry je exotermická reakce⁴, je obsah síry v palivu nežádoucí, neboť zvyšuje obsah SO₂ (a SO₃) ve spalinách. Výrazně zvyšuje rosný bod spalin a způsobuje snížení charakteristických teplot popela [3].

Poměrný obsah síry S není dostatečným ukazatelem. Mnohem lepším ukazatelem sirnatosti je měrná sirnatost \bar{S} , která udává hmotnost síry vzhledem k výhřevnosti.

$$\bar{S} = \frac{10 \cdot S}{Q_i^r} \text{ [kg} \cdot \text{kJ}^{-1}\text{]} \quad (4)$$

kde S [-] obsah síry v palivu,
 Q_i^r [kJ·kg⁻¹] výhřevnost paliva [4].

⁴ Exotermní reakce je chemická reakce, při níž se uvolňuje energie, obvykle ve formě tepla.

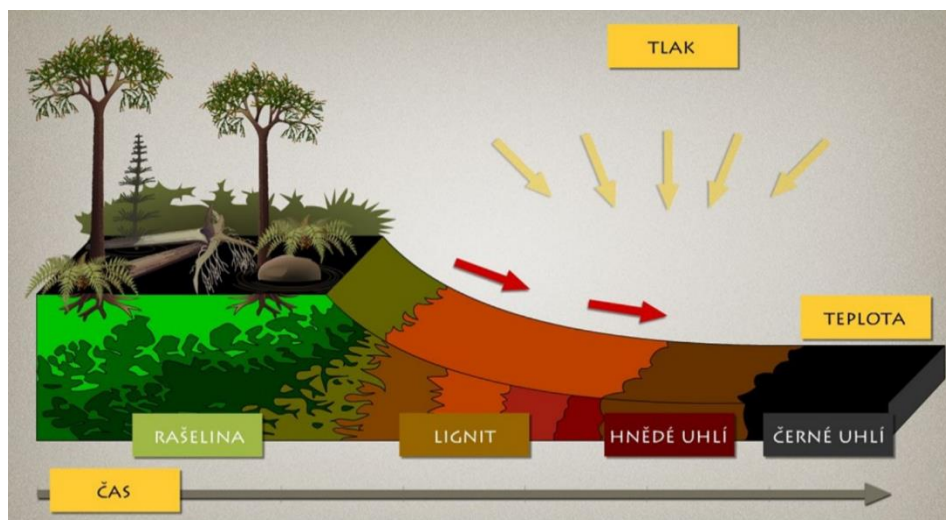
Tab. 1-1 Obsah síry a měrná sirnatost fosilních paliv [4].

Palivo	Poměrný obsah síry [%]	Výhřevnost [MJ/kg]	Měrná sirnatost [kg/kJ]
Mazut	3,0	41,0	0,731
Černé uhlí	0,9 až 2,5	17,6 až 27,2	0,331 až 0,682
Hnědé uhlí	0,8 až 1,2	9,2 až 13,4	0,597 až 1,869
Lignit	0,6	7,6	0,754

1.3 Uhlí

Uhlí je tuhé fosilní palivo s vysokým obsahem uhlíku (C) a vodíku (H). Většina zásob uhlí se začala tvořit přibližně před 300 miliony lety v tzv. období karbonu [5].

Uhlí vznikalo v bažinných ekosystémech (pánve jezer, nízko položené území na okraji pevnin, v okolí řek) z těl pravěkých rostlin. Za pomoci slunečního záření se vytvářely uhlovodíky, zejména ze vzduchu, minerálních látek a vody. Poté co odumřely, klesaly pod hladinu bažiny. Zde se bez přístupu kyslíku nemohly dále rozložit běžnými biologickými procesy. Následovaly další geologické procesy, které překryly vrstvy biologického původu jinými materiály. Hmota, která na počátku tohoto procesu byla velmi podobná rašelině, se postupně dostávala do hlubších vrstev bažiny. S rostoucí hloubkou se zvyšoval nejenom tlak, ale i teplota, které má za následek vytěsnění vody a jiné látky, zatímco podíl uhlíku rostl. Doklady o tomto původu uhlí a druhovém složení pravěkých ekosystémů poskytují četné paleontologické nálezy [6].



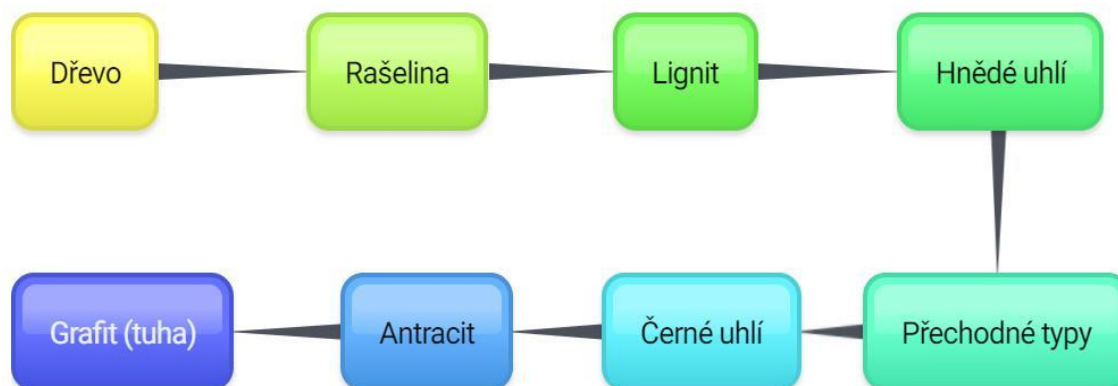
Obr. 1-3 Mechanismus tvorby uhlí z rostlinného materiálu [29].

Přeměnu biologického materiálu na uhlí zjednodušeně vyjadřuje rovnice:



Aby vznikl uhelný sloj o síle jeden metr je zapotřebí přibližně třicetimetrové vrstvy rašeliny. Největší a nejkvalitnější uhelné sloje se tvořily v období prvohor příznačně nazývaném karbon, do kterého spadá také vznik ostravsko-karvinského uhlí. Uhlí se pak

tvořilo ještě v prvohorním období zvaném perm, a i v pozdějších dobách. Proces přeměny zuhelnování je znázorněn na Obr. 1-4. Čím déle tento proces probíhá, tím je uhlí kvalitnější. Nejvyšším produktem zuhelnování je grafit (tuha), který obsahuje skoro sto procent uhlíku [6].



Obr. 1-4 Jak vzniklo uhlí [6].

Uhlí dělíme podle geologického stáří. Nejstarší je antracit, černé uhlí, potom hnědé uhlí a nejmladší jsou lignity. Z hlediska kvality uhlí platí, že čím je uhlí geologicky starší, tím více dosahuje lepší výhřevnosti a nižších emisí při jeho spalování. Černé uhlí má tedy oproti hnědému uhlí vhodnější energetické a emisní vlastnosti, z čehož plyne, že jeho užívání je příznivější pro životní prostředí. Geologické stáří dále ovlivňuje také vlastnosti uhlí. Čím je uhlí starší, tím méně vody obsahuje, naopak obsah uhlíku je větší, ale klesá obsah vodíku a kyslíku. Geologicky mladší paliva, jako například lignit nebo hnědé uhlí, se snáze zapalují, hoří delším plamenem a dosahují nižších spalovacích teplot [3,5].

1.3.1 Typy uhlí

- **Lignit**

Lignit neboli nejmladší typ uhlí. Jedná se o uhlí třetihorního původu (před 60 miliony let). Obsahuje zachované kmeny stromů a také úlomky dřev. Se stářím souvisí i nízký obsah uhlíku (40-60 %) na rozdíl od ostatních druhů uhlí. V případě lignitu může obsah vody převyšovat obsah uhlíku, dále ještě obsahuje složky síry. V důsledku velkého obsahu vody v lignitu (více než 50 %) má výhřevnost menší než 17 MJ/kg. Jediný rozšířený způsob využití lignitu je jako materiálu určeného ke spalování v teplených elektrárnách, ale spalováním přicházíme o cennou surovinu, která obsahuje velké množství huminových látek. Huminové látky (zvláště huminové kyseliny) se využívají v oblasti zemědělství, kde mohou pozitivně ovlivňovat např.: klíčení semen, regulovat množství živin, podporovat růst kořene a zvyšovat úrodnost. Zejména na pokusech s kukuřicí byl pozitivní efekt lignitu velmi zřetelný [7,8].

V současné době se lignit na území ČR vyskytuje na jižní Moravě v okolí Hodonína [8].

- **Hnědé uhlí**

Hnědé uhlí je starší, a tudíž i kvalitnější typ uhlí než lignit. Vytvářelo se v období jury a křídly (přibližně před 200 miliony let) [8]. Je hnědé až černohnědé barvy.

Obsahuje přibližně 70 % uhlíku a velké množství příměsí (síry, popeloviny, vody). Hnědé uhlí dosahuje výhřevnosti kolem 17 MJ/kg. Využívá se zejména v tepelných elektrárnách, kde se spalováním uhlí získává energie, která se dále využívá pro výrobu elektřiny. V Česku se hnědé uhlí těží především v oblasti Krušných hor (v sokolovské a chomutovsko-mostecké pánvi). Těžba probíhá povrchovým způsobem, kterým dochází k ničení rozsáhlých oblastí.

- **Černé uhlí**

Černé uhlí je jedno z nejdůležitějších fosilních paliv. Vytvářelo se v prvohorách a druhohorách (přibližně před 541–145 miliony lety). Největší význam mělo v období průmyslové revoluce (od 18. do 19. století), kdy došlo k přechodu z ruční výroby na tovární a strojní velkovýrobu. Černé uhlí se těží zejména v podzemí. Skládá se z uhlíku, dále obsahuje v menším množství vodu, jílové horniny a sloučeniny síry. V současnosti je černé uhlí využíváno zejména pro výrobu elektřiny a lze jej také použít pro zušlechťování na koks [9].

Ačkoliv se lidstvo snaží ustupovat od těžby uhlí, počítá se s ní i do budoucna. Vzhledem k ubývajícím zásobám ropy a uranu se uhlí stane jediné ekonomicky dostupné fosilní palivo. Celosvětové zásoby uhlí se odhadují na 200–300 let, což v porovnání se zásobami ropy, které se odhadují na 40–70 let [18], je o mnoho více. V dnešní době lze černé uhlí přeměňovat na ekologicky šetrné palivo (uhlí s menším obsah síry tzv. aditivované uhlí), a proto se stává zajímavou surovinou. Černé uhlí se využívá v mnoha odvětvích jako hutnictví, plynárenství nebo v chemickém průmyslu [9].

Černé uhlí se dělí na několik typů:

- Antracit – nekvalitnější typ uhlí s nejvyšší výhřevností a podílem uhlíku až 90 %,
- Černé, kamenné uhlí – černé, lesklé a tvrdé uhlí, obsah uhlíku 80-90 %,
- Koksovatelné druhy – slouží na následnou výrobu koksu, vzniká zušlechťováním,
- Plynové uhlí – slouží k výrobě svítiplynu [9].

Největší zásoby černého uhlí se vyskytují v USA, Indii, Číně, Rusku a Jihoafrické republice. Aktuálně největším spotřebitelem je Čína, ale největším vývozcem je Austrálie. V České republice je část z Ostravsko-karvinského revíru exportována do zahraničí, zároveň však nějaké zásoby uhlí dovážíme s Polska [9].

1.3.2 Umělá uhelná paliva

Vytěžené uhlí se dá dále zpracovávat na koks a brikety. Na rozdíl od těžených paliv se jedná o paliva dražší, ale s docela dobrou výhřevností. Koks otopný má výhřevnost 23–28 MJ·kg⁻¹ a hnědouhelné brikety 19-20 MJ·kg⁻¹. Koks se vyrábí karbonizací⁵ z kvalitního černého uhlí. Využití koksu je zejména v metalurgii. Brikety se vyrábějí z černého nebo hnědého rozemletého předsušeného uhlí lisováním [3].

⁵ Karbonizace je proces, při kterém je uhlí zahříváno nad teplotu 900 °C bez přístupu vzduchu.

1.3.3 Srovnání různých druhů paliv

Tab. 1-2 Hrubý a prvkový rozbor různých druhů paliv [3].

	antracit	černé uhlí	hnědé uhlí	lignit	rašelina	dřevěné piliny
vlhkost (%)	7,7	5,2	23,4	33,3	20,0	16,5
prchavá hořlavina (%)	6,4	40,2	40,8	43,6	68,0	78,6
pevný uhlík (%)	83,1	50,7	54,0	45,3	–	–
popelovina (%)	10,5	9,1	5,2	11,1	12,0	5,2
C ^r (%)	83,7	74,0	72,0	63,3	57,5	51,2
H ^r (%)	1,9	5,1	5,0	4,5	5,5	6,3
N ^r (%)	0,9	1,6	0,9	1,0	1,9	1,9
S ^r (%)	0,7	2,3	0,4	1,1	0,1	–
A ^r (%)	10,5	9,1	5,2	11,1	–	1,5
O ^r (%)	2,3	7,9	16,4	19,0	35,0	33,0
spalné teplo (MJ.kg ⁻¹)	34,7	29,2	21,4	16,5	21,0	9,9
teplota měknutí popele – ta °C	–	1215	1149	1110	1120	–

1.4 Biomasa

Biomasa je velice důležitý obnovitelný zdroj energie, která je získána ze sluneční energie. Pojmem biomasa nazýváme veškerou hmotu biologického původu, jako je rostlinná biomasa (sláma, náletové dřeviny, dřevní kůra) pěstovaná buď ve vodě nebo v půdě, živočišná biomasa (zbytky krmiv, exkrementy zvířat, odpady z potravinářského průmyslu, hnůj) a také vedlejší organické produkty nebo odpady. Biomasa je velmi využívaným produktem v energetickém průmyslu, zejména díky malé ekologické zátěži. V energetice je využívána převážně sláma nebo dřevní štěpka [10].

Spalováním biomasy dochází k rozkladu organického materiálu na hořlavé plyny a při následné oxidaci se uvolňuje energie, oxid uhličitý (CO₂) a voda. Velkou výhodou spalování biomasy je téměř nulová bilance CO₂ oproti spalování fosilních paliv. Množství CO₂, které je vyprodukováno při spalování, je téměř totožné s množstvím, které je zpětně vázané do rostlin v zemědělských a lesních porostech. Při spalování se nám dále uvolňují oxidy síry. U biomasy se obsah síry pohybuje do 0,1 %, což je velmi nízká hodnota, například uhlí dosahuje i více než 2 %. Množství vznikajících NO_x lze kontrolovat pomocí upravování teploty spalování. Biomasa má podíl těkavé hořlaviny až 80 % a vzniklé plyny mají různé spalovací teploty [11].

Jedním z nejdůležitějších parametrů u biomasy je vlhkost, protože její obsah často kolísá, a to jak v závislosti na čase, tak na druhu biomasy. Vlhkost následně ovlivňuje výhřevnost, která u biomasy dosahuje až 18 MJ·kg⁻¹. Pokud je vlhkost biomasy vysoká,

dochází k nedokonalému spalování a velká část energie se spotřebuje na vypaření vody. Pro dokonalé spalování by se vlhkost měla pohybovat u dřeva kolem 20 % a u slámy kolem 13 %. Obsah popeloviny je velmi nízký v porovnání s fosilními palivy. U dřeva je obsah popeloviny do 1 %, u stébelnin až do 8 %. Nejčastěji využívaná biomasa je ve formě kusového dřeva, pelet, briket, štěpky, pilin, hoblin [3].

1.4.1 Zpracování biomasy pro energetické účely

Mechanická úprava

- Mechanické úpravy se provádějí především pro snadnější přepravování biomasy. Mezi mechanické úpravy patří řezání (zpracování dřeva), drcení (pro výrobu briket a pelet), štěpkování a lisování briket nebo pelet (výsledný produkt) [12].

Termické procesy

- Karbonizace – jedna z nejstarších metod zušlechťování dřeva využívaná pro výrobu dřevěného uhlí v energetickém průmyslu. Dříve dřevěné uhlí vznikalo pomocí tepelného rozkladu bez přístupu vzduchu. Tento proces však nebyl moc hospodárný a ekologicky výhodný. Dnes se využívá suchá destilace v karbonizačních pecích a retortách (nádoby a komory určené k suché destilaci). Při výrobě dřevěného uhlí vzniká oxid uhelnatý, toxické (formaldehyd, acetaldehyde) a karcinogenní látky (kondenzované uhlovodíky, fenoly). Ke vzniku 1 tuny dřevěného uhlí je potřeba přibližně 10 tun dřeva [12].
- Pyrolýza – proces termického rozkladu organických látek bez přístupu kyslíku. Organické sloučeniny materiálu jsou štěpeny na nízkomolekulární sloučeniny a to všechno probíhá za teploty nad mezí termické stability. Jedná se o velmi zajímavou metodu využití biomasy. Při použití katalytické pyrolýzy lze využít komunální odpad, papír, plasty (polystyren, polyetylen, PVC) nebo pneumatiky pro výrobu biooleje. Výchřevnost biooleje se pohybuje v rozmezí 13-18 MJ·kg⁻¹ [12].
- Zplyňování – přeměna slámy, palivového nebo odpadního dřeva na generátorový plyn, který se využívá k výrobě elektřiny, tepla nebo jako palivo pro vozidla [12].

Biochemické a chemické přeměny

- Alkoholová kvašení – materiálem jsou rostliny obsahující cukr a škrob, z nichž se vyrábí pomocí organické fermentace a následné destilace vysokoprocenní alkohol (etanol). Etanol se používá jako ekologické palivo pro spalovací motory. Teoreticky 0,65 litru paliva čistého etanolu odpovídá 1 kg cukru [12].
- Metanové kvašení – jedná se o metodu získávání bioplynu, což je směs plynů obsahujících 50-75 % metanu, 25-40 % CO₂ a další plyny. Bioplyn vzniká díky anaerobní fermentaci, což je proces přeměny odpadních vod a zvířecích exkrementů za nepřístupu vzduchu [12].

1.4.2 Dřevo

Dřevo je nejpoužívanější surovina pro vytápění. Využívá se v různých podobách. Spadané stromy a větve se nařezou na stejnou délku pro další zpracování. Hodnotné dřevo většinou nekončí na topeništi, ale je zpracováno dřevoprůmyslem. Piliny a hobliny lze dále zpracovat na dřevěné brikety nebo pelety. Jako u ostatních tuhých paliv je i u dřeva důležitá vlhkost. Vlhké dřevo špatně hoří, protože část energie při spalování se spotřebuje na odpaření vody. To má za následek pokles výhřevnosti. Vlhké dřevo je těžší, tudíž vzrůstají náklady za dopravu, navíc dochází k zanášení komínu. Pro určení, zda je dřevo suché či mokré, máme dva základní údaje:

- vlhkost dřeva, která udává hmotnost vody v poměru k úplně suchému dřevu,
- obsah vody, který stanovuje hmotný podíl vody ve vlhkém dřevě.

Jestliže polovinu hmotnosti dřeva představuje voda, pak je obsah vody 50 %, ale vlhkost je 100 %. U čerstvě poraženého stromu je vlhkost dřeva 50 % a výhřevnost pouhých 7,78 MJ/kg, proto je důležité dřevo nechat vysušit. Venku se dřevo vysuší na 12–20 % přibližně za 2 roky. Je důležité, aby dřevo bylo rozštípané, pod přístřeškem a mělo dostatečný přístup vzduchu. Při obsahu vody 15 % má bukové dřevo výhřevnost 14,94 MJ/kg. Absolutně suché dřevo je dřevo, které má 0 % obsah vody. Výhřevnost absolutně suchého bukového dřeva je 18 MJ/kg. Srovnání různých druhů paliv v závislosti na obsahu vody je v Tab. 1-3 [13].

Tab. 1-3 Vlastnosti různých druhů palivového dřeva [13].

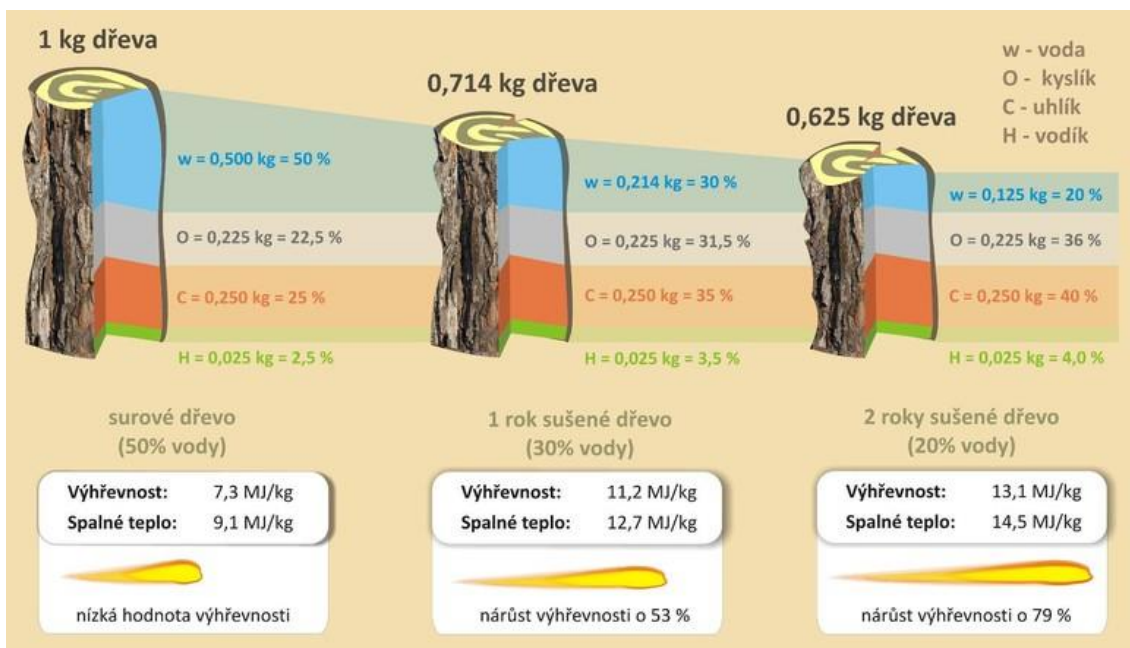
	výhřevnost absolutně suchého dřeva Q^r v MJ/kg	hustota absolutně suchého dřeva Q^r v kg/plm ⁶	výhřevnost Q^r při $w = 15\%$		
			v MJ/kg	v MJ/plm	v MJ/rm ⁷
buk	18	558	14,94	9792	6876
bříza	18	526	14,94	9252	6480
borovice	18,72	431	15,55	7884	5508
smrk	18,72	379	15,52	6948	4860

Co probíhá při sušení dřeva znázorňuje Obr. 1-5. Při sušení klesá obsah vody a současně stoupá obsah kyslíku, uhlíku a vodíku. Konečný nárůst výhřevnosti je až o 79 % vyšší než u surového dřeva.

V závislosti na hustotě se dřevo rozděluje na tvrdé a měkké. Tvrdé dřevo pochází z listnatých stromů (buk, dub, jasan), měkké naopak z jehličnatých (smrk, borovice). Největší rozdíl mezi tvrdým a měkkým dřevem je při hoření. Tvrdé dřevo hoří déle než měkké, avšak výhřevnost těchto dřevin je velmi podobná.

⁶ plm je zkratka označující plnometr, pevný metr, což představuje 1 m³ vyplněný dřevem bez mezer.

⁷ rm je zkratka označující prostorový skládaný metr, což představuje naskládaná polena do 1 m³



Obr. 1-5 Schématické zobrazení dějů při vysoušení [2].

1.4.3 Brikety

Dřevěné brikety jsou vyráběny z dřevního odpadu (piliny, kůra, hobliny) a nesmí obsahovat žádné další příměsi (pojiva, chemické látky). Dřevní odpad se liší podle druhu dřeva, a to určuje výhřevnost. Brikety jsou vyráběny lisováním při velkém tlaku. Produktem lisování je briketa, buď válcového nebo hranatého tvaru, která má hladký povrch (vzniká zapečením při lisování). Díky tomu dobře odolává vzdušné vlhkosti. Brikety se vyznačují výhřevností od 16 do 19 MJ/kg, nízkým obsahem popela a malým obsahem vody. Lze s nimi topit ve všech typech kamen, kotlů nebo krbů. V porovnání s dřevem mají brikety větší hustotu a delší dobu hoření.

1.4.4 Pelety

Dřevěné pelety se dnes stávají velmi výhodným palivem díky svému normovanému tvaru. Dříve u pelet nebyly dodržované požadované rozměry, a proto docházelo k zasekávání v dopravním zařízení. Dnes výroba pelet podléhá přísným normám, podle kterých se musí výrobci řídit. Normy upravují rozměr pelet, obsah vody, popela, výhřevnost a spousty dalších věcí. Pelety se vyrábí stejným způsobem jako brikety, a to lisováním. Je důležité, aby pelety byly dostatečně slisovány, jinak by se mohly předčasně rozpadnout a ucpat dopravní zařízení. Výhřevnost pelet se pohybuje okolo 16,5 MJ/kg. Tuna sypaných pelet má přibližně stejnou výhřevnost jako 500 l topného oleje, což znamená, že 2 kg pelet mohou nahradit litr topného oleje [13].

1.5 Srovnání různých typů tuhých paliv

V Tab. 1–4 jsou uvedeny náklady na vytápění pro různé typy tuhých paliv. Přednastavené údaje odpovídají běžnému rodinnému domu se 4člennou domácností, s podlahovou plochou 150 m² a výpočtovou tepelnou ztrátou 7 kW. Výpočtová venkovní hodnota je -15 °C. V dnešní době se tepelná ztráta novostaveb pohybuje v rozmezí 5 až 10 kW.

Tab. 1-4 Porovnání nákladů na vytápění [14].

Palivo	Výhřevnost [MJ/kg]	Roční spotřeba [kg]	Cena za kg v Kč	Náklady na vytápění Kč / rok
Černé uhlí	23,1	2 275	5,5	8 708
Hnědé uhlí	18	2 920	3,4	6 908
Dřevo	14,6	3 789	3,5	9 428
Dřevěné brikety	17	3 511	4,8	11 876
Dřevěné pelety	17	2 955	5,4	11 210
Štěpka	12,5	4 367	2,5	8 356
Rostlinné pelety	16	3 257	4,1	9 437

Cenově nejvýhodněji vychází hnědé uhlí, ale v porovnání se štěpkou zde není moc velký rozdíl. Na druhou stranu štěpka je obnovitelný zdroj s nulovou bilancí CO₂ a vzhledem k přírodě je daleko vhodnější než uhlí. Náklady na vytápění se také odvíjejí od účinnosti kotlů, popř. krbu.

2 Kotle na tuhá paliva

Kotle na tuhá paliva představují klasický způsob vytápění, zejména díky nízkým cenám tuhých paliv jsou velmi oblíbené a hojně využívány. Využívají se pro vytápění rodinných domů nebo menších komplexů. Volba správného kotle je velmi důležitá a záleží na spoustě aspektech, například na klimatických podmínkách, lokalitě, celkové dispozici, konstrukci, způsobu využívání domu, ale nejdůležitější je volba zdroje tepelné energie. Nabízejí se fosilní paliva, jako například uhlí, anebo lze zvolit obnovitelný zdroj energie, biomasu (dřevo, brikety, pelety). Tato volba ovlivňuje výslednou cenu za vytápění během celého roku. Při rozhodování o zdroji tepelné energie bude na jedné straně stát komfort a na druhé právě cena. Kusové dřevo či uhlí lze skladovat venku nejlépe pod přístřeškem, ale pelety a brikety musíme skladovat v suchém přístřešku a pro štěpku je potřeba sklad velkých rozměrů [15].

V kotli dochází k přeměně energie, která je uložena v palivu na energii tepelnou, která se většinou pomocí vody dále rozmísťuje. V dnešní době jsou kotle konstruovány přímo pro dané palivo, aby byla dosažena maximální účinnost při spalování. Existují i kombinované kotle, které lze využívat pro různá paliva při stejném nastavení kotle.

Účinnost kotle je definována jako poměr využití energie k dodané energii. Moderní kotle mohou dosahovat účinnost až 92 % při jmenovitém výkonu. Tepelná energie získaná z paliva je dále přemísťována pomocí radiace a konvekce. Konvekce je neuspořádaný pohyb částic a využívá se u tepelných výměníků, kde se prohřívá spodní část nádoby a teplejší částice stoupají vzhůru. Konvekci používáme u akumulčních nádob nebo u ústředního topení. Radiace neboli sálání, je děj, který nastává zejména u krbů nebo kamen.

Kotle lze rozdělit dle přísunu spalovacího vzduchu, podle druhu, způsobu dodávky spalovaného paliva a podle použité technologie.

2.1 Kotle na tuhá paliva podle způsobu přísunu spalovacího vzduchu

Každé spalování by mělo být dokonalé, a proto je potřeba přivádět dostatečné množství vzduchu do ohniště. Minimální, neboli tzv. teoretické množství vzduchu, je množství kyslíku potřebné ke spálení 1 kg paliva. Praktické spalování paliv nemůže probíhat pouze za teoretického množství spalovacího vzduchu, protože by bylo nedokonalé, nelze docílit ideálního promísení částic kyslíku s částicemi hořlavých látek. Proto přivádíme do ohniště více vzduchu než teoretické množství. Čím horší je promísení, tím více vzduchu je potřeba přivádět do ohniště. Takovéto spalování nazýváme spalování s přebytkem vzduchu [3].

Přísun spalovacího vzduchu může být buď:

- přirozený, kde závisí pouze na tahu komína, ten vytváří podtlak a tím je přiváděn vzduch do ohniště přes speciální otvory, které lze regulovat,
- nucený, kde se využívá odtahového ventilátoru, který vytváří podtlak v ohništi, popřípadě je spalovací vzduch přiváděn tlačným ventilátorem přímo do ohniště. Tento způsob samozřejmě znamená vyšší kontrolu nad spalovacím procesem [15].

2.2 Kotle na tuhá paliva podle způsobu dodávky paliva

Kotle podle způsobu přívodu paliva lze rozdělit na kotle s manuálním přikládáním anebo na kotle s automatickým přikládáním.

2.2.1 Kotle s manuálním přikládáním (ruční)

Palivo je do kotle přikládáno ručně v pravidelných intervalech v závislosti na rychlosti hoření nebo tepelném výkonu. U těchto kotlů není možné zajistit regulaci aktuálně potřebného spalovacího vzduchu, a proto budou tyto kotle vždy produkovat značné množství škodlivých látek. Kotle s manuálním přikládáním se využívá až do výkonu 50 kW. V současné době nízkoenergetických domů se ale vyrábějí kotle s výkonem nižších než 15 kW. Tepelný výkon se nedá regulovat v závislosti na dodávce paliva, a proto se reguluje pomocí množství primárního a sekundárního spalovacího vzduchu. Primární vzduch ovlivňuje uvolňování plynné složky paliva, a tím současně i výkon kotle. Sekundární vzduch se využívá pro dohoření hořlavých plynů [16].

2.2.2 Automatické kotle

Automatické kotle jsou moderní kotle na spalování pevných paliv a využívají systém kontinuálního přívodu paliva. Dopravu nám nejčastěji zajišťuje šnekový dopravník nebo otočný válcový rošt. Tím, že je palivo automaticky dopravováno, dochází ke stabilnímu spalovacímu procesu. Je dosažen stabilní požadovaný výkon, vysoká účinnost, nízká produkce škodlivin a v neposlední řadě také vysoký komfort pro uživatele. Velmi důležité je řízení kotle, jež koordinuje veškeré procesy, které se dějí v kotli. Automatické kotle nejenom regulují tepelný výkon, resp. proces spalování, ale také řídí přívod paliva. Takovéto kotle dále rozlišujeme podle konstrukce topeniště na:

- topeniště se spodním přívodem paliva,
- topeniště s příčným přívodem paliva,
- topeniště se shazováním paliva,
- topeniště pro spalování rostlinné biomasy,
- topeniště s otočným válcovým rostem [16].

Při spalování uhlí automatické kotle dosahují emisní třídy 3 a 4, při spalování pelet lze dosáhnou nejvyšší třídy a to třídy 5. Automatické kotle jsou sice dražší, ale vzhledem k regulaci, a tím i dosažení vyšší účinnosti, snížení emisí, efektivity a zvýšení komfortu, se ve většině případech vyplatí.

2.3 Typy kotlů na tuhá paliva podle použité technologie

Pro centrální kotle více jak 100 let stačilo základní dělení, a to kotle prohořivací a odhořivací. S příchodem nových emisních tříd se k této skupině ještě připojily zplyňovací kotle.

2.3.1 Prohořivací kotle

Prohořivací kotel je jednoduchý a levný systém kotlů pro domácnosti. Regulace výkonu u prohořivacího kotle je velmi omezená, protože po naložení paliva dojde k rychlému nahoření celé vrstvy, tím dojde ke spontánnímu a velmi těžko kontrolovanému procesu

uvolňování hořlaviny z paliva. Obvyklým představitelem této technologie je litinový kotel, který byl původně určen ke spalování koksu, při kterém lze u některých konstrukcích dosáhnout emisní třídy 3. Spalováním kusového dřeva či černého uhlí (hnědé nelze spalovat) nelze dosáhnout vyšší emisní třídy než 2. Některé kotle mají možnost nainstalování tzv. peletového hořáku, s kterým je možné dosáhnout 3. emisní třídy [15].

Prohořivací kotle jsou většinou vybaveny primárním a sekundárním přívodem vzduchu. Primární je veden skrz rošt a celou dávku paliva, sekundární se přivádí nad palivo, kde je využíván pro druhé spalování. Dávkování paliva je zajištěno přes horní dveře a spodní dvířka jsou určeny k odstraňování popele. Tyto kotle jsou většinou s přirozeným přívodem spalovacího vzduchu. Při naložení velké dávky paliva nelze oddělit prostor zplyňování a oxidace, v důsledku toho se snižuje účinnost a zvyšují emise [16].

Cena těchto kotlů se pohybuje v rozmezí 15–30 tis. Kč a dosahují účinnosti až 80 %. Vzhledem k nízkým hodnotám emisní třídy se tyto kotle přestávají vyrábět.

2.3.2 Odhořivací kotle

U odhořivacích kotlů je palivo naložené na roštu ve spodní části násypky a postupně odhořívá. Hoří vždy jen spodní vrstva paliva a spaliny jsou odváděny do boky nebo dospod topeniště. Závěrečné spalování a zplyňování probíhá v oddělených komorách, kde je zajištěno stabilnější spalování než u prohořivacích kotlů, což znamená, že produkují méně emisí. Skrze rošt popelníku propadá popel.

U odhořivacích kotlů se využívá jednak přirozený tah spalin, ale také velmi často odtah pomocí ventilátoru. Doba hoření je ovlivněna velikostí zásobníku. Palivo může často hořet i několik hodin. Konstrukce těchto kotlů se využívá pro kusové dřevo, pelety a uhlí [3,16].

Odhořivací kotle dříve dosahovali pouze hodnot emisní třídy 2, ale po zajištění určitých úprav dosáhly hodnot 3. emisní třídy. Cena těchto kotlů se pohybuje v rozmezí od 20–40 tis. Kč a dosahují účinnosti až 88 %.



Obr. 2-1 Funkční schéma prohořivacího kotle [17].



Obr. 2-2 Funkční schéma odhořivacího kotle [17].

2.3.3 Zplyňovací kotle

Zplyňovací neboli pyrolýzní kotle jsou jedny z nejmodernějších kotlů současnosti. Fungují na principu dvoustupňového spalování a kotle lze rozdělit na dvě základní oblasti. V první oblasti se nachází palivo a je zde přiváděn primární vzduch, následně dochází k uvolňování prchavé složky paliva a vytváří se hořlavý plyn, který je pomocí ventilátoru vháněn do druhé, tzv. spalovací oblasti, do které je přiveden sekundární spalovací vzduch. Vzniklé spaliny dosahují teplot 1000–1250 °C, následně procházejí teplovodním výměníkem, kde se ochladí a poté putují přímo do komína. Zplyňovací kotle jsou podtlakové a pro odvod spalin se využívá spalinový ventilátor [3].



Obr. 2-3 Funkční schéma zplyňovacího kotle [17].

Jednou z největších výhod je vysoká účinnost (i více než 90 %) využití energie získané z paliva, což vede ke vzniku nižších škodlivých emisí oproti klasickému spalování, protože plynné palivo se spaluje snáze než pevné [16].

Zplyňovací kotle splňují hodnoty emisní třídy 3,4 a také nejvyšší třídy 5, což je způsobeno téměř dokonalým spalováním. Cena těchto kotlů se pohybuje v rozmezí od 30–80 tis. Kč. Spalovat se dá nejen kusové dřevo a hnědé uhlí, ale někteří výrobci poskytují úpravy pro spalování pelet. Za zmínku také stojí regulace tahu (otevírání či přivírání vzduchové klapky) kotle, kterým lze řídit výkon.

2.4 Kotle na tuhá paliva podle druhu spalovaného paliva

Další důležité rozdělení je podle spalovaného paliva, protože to ovlivňuje výslednou konstrukci kotlů. Pro spalování dřeva, které uvolňuje velké množství hořlavin a hoří dlouhým plamenem, je vhodný kotel s velký spalovacím prostorem, který je vybaven vhodnou žáruvzdornou vyzdívkou. Nevýhodou dlouhoplamenných paliv je, že pokud se plameny dostanou do kontaktu s vodním výměníkem, nedochází k dokonalému spalování, a tudíž vzniká více emisí. Krátkoplamenná paliva, jako je například koks, nehoří, ale žhnou. Vhodná konstrukce kotle pro spalování koksu je bez žáruvzdorné vyzdívky, což znamená, že je zajištěn dobrý kontakt žhavé vrstvy s hořícím palivem. Kotel na spalování koksu musí být vyroben z vhodného materiálu, který odolá vysokým teplotám [19].

2.5 Emise znečišťujících látek

V České republice jsou kotle na tuhá paliva jedním z nejrozšířenějších zdrojů tepelné energie, a to z důvodu nízkých nákladů. Takovéto kotle ale produkují emise znečišťujících látek, které výrazně ovlivňují naše životní prostředí. Z toho důvodu byla zavedla norma ČSN EN 303-5, která rozděluje kotle podle emisních tříd. Emisní třídy se přiřazují podle výsledků spalovacích zkoušek, uvádějí limity jednotlivých kotlů a maximální dosaženou účinnost za ideálních podmínek na zkušebně. Nejvíce jsou sledovány emisní hodnoty prachu, CO, NO_x, SO₂, a TOC (uhlovodíky). Protože kotle se v domácnostech vždy nepoužívají na maximální výkon, tak se zavedly testy účinnosti kotlů, která se měří jak při nominálním, tak i sníženém výkonu. Emisní třída kotle musí být vždy uvedena v technické dokumentaci a na výrobním štítku kotle. Emisní třídy 1., 2. a 3. nelze v současné době už zakoupit, ale lze je stále provozovat. Na začátku roku 2020 bude možné zakoupit pouze kotle splňující Ekodesign. V září roku 2022 domácnosti budou muset prokázat, že jimi používaný kotel splňuje alespoň 3. emisní třídu podle ČSN EN 303-5:2013, což znamená, že emisní třídy 1. a 2. nebude možné dále provozovat, viz. Tab. 2-1. V opačném případě hrozí pokuta až ve výši 50 000 Kč. Pokutu lze také udělit tomu, kdo bude používat zakázaná paliva [20,21,22].

Tab. 2-1 Přehled souvisejících s prodejem a provozem kotlů na tuhá paliva pro vytápění domácností (do 500 kW) [20].

Platnost od	Popis zařízení
1. 1. 2014	Zákaz prodeje kotlů 1. a 2. emisní třídy (možnost legálně zakoupit a uvést do provozu pouze kotle 3., 4. a 5. emisní třídy)
1. 1. 2017	Povinnost na vyžádání předložit revizi kotle (včetně označení emisní třídy)
1. 1. 2018	Zákaz prodeje kotlů 3. emisní třídy (možnost legálně zakoupit a uvést do provozu pouze kotle 4. a 5. emisní třídy)
1. 1. 2020	Zákaz prodeje kotlů 4. a 5. emisní třídy (možnost legálně zakoupit a uvést do provozu pouze kotle splňující požadavky EKODESIGN) – pro celou EU
1. 9. 2022	1. 9. 2022 Zákaz používání kotlů 1. a 2. emisní třídy (bez ohledu na to, kdy byly pořízeny)

Pozn.: Emisní třídy dle ČSN EN 303-5, zjednodušeně je možné říci, že požadavky dle EKODESIGN jsou rozšířené požadavky na 5. emisní třídu.

2.5.1 Ekodesign

Kotle na tuhá paliva, aby mohla být prodávána na území Evropské unie, budou muset od 1. ledna 2020 splňovat požadavky na ekodesign, viz. Tab. 2-2. Emisní limity týkající se Ekodesignu platí pouze pro dřevní biomasu (biomasa pocházející ze stromů, křovin a keřů). Nedřevní biomasy (sláma, rákos, obiloviny, skořápky ořechů) se netýká [28].

Tab. 2-2 Hodnoty emisních limitů a účinnosti pro kotle na tuhá paliva podle směrnice o Ekodesignu [26].

Parametry pro Ekodesign	Jednotky	Kotel o výkonu	Limitní hodnoty platné od 1. 1. 2020
Účinnost kotle	[%]	≤ 20 kW	75
		> 20 kW	77
		Provoz kotle	
Tuhé emise	[mg/m ³]	Automatický	40
		Ruční	60
Uhlovodíky (OCG)	[mg/m ³]	Automatický	20
		Ruční	30
Oxid uhelnatý (CO)	[mg/m ³]	Automatický	500
		Ruční	700
		Typ paliva	
Oxid dusíku (NO _x)	[mg/m ³]	Biomasa	200
		Fosilní	350

Mnoho výrobců už nyní splňuje požadavky ekodesignu, protože většina Českých dotačních programů má splnění těchto požadavků jako podmínku pro zapsání do seznamu podporovaných kotlů [23].

2.5.2 Legislativa

Kotle prodávané v ČR musí dle naší platné legislativy prokázat splnění požadovaných parametrů, což probíhá při certifikaci (tzv. STK kotle). Touto „STK“, která probíhá pouze jednou, je kotel přidělen do některé kategorie (např. třída 3.) a dále již není nic měřeno, ani při instalaci nebo provozu. Emise, které produkuje kotel při spalování, lze z velké části ovlivnit lidským faktorem. Jsou zde 4 základní parametry: obsluha, palivo, instalace a údržba. Pokud některý parametr bude zanedbán, celý výsledek nikdy nebude dokonalý. V Německu a Rakousku je nutné splnění emisí prokazovat při pravidelných kontrolách, které provádějí kominické firmy, nestačí tím pádem jen pouhý certifikát. Tato metoda ověření má drobné nedostatky jako např.: různé nepřesnosti, složitá přístupnost v kotelně nebo cena, ale na druhou stranu to, že kotel dosáhl dané emisní třídy v laboratorních podmínkách ještě neznamená, že ji dosáhne i ve skutečném provozu [23].

3 Experiment ověření účinnosti a emisní třídy kotle na tuhá paliva

V této kapitole se budeme zabývat experimentem ověření účinnosti a emisní třídy kotle Dakon Damat Pyro 20 G. Úkolem experimentu bylo nastavit kotel na jeden druh paliva, následně ponechat stejné nastavení i pro ostatní měřená paliva a ověřit, zda bude splňovat platné normy. To má simulovat stav, kdy uživatel zakoupí kotel a odladí ho pro konkrétní palivo (např.: buk). Následně změní typ paliva (např.: dřevěné brikety) z důvodu ušetření nákladů, ale nezmění nastavení kotle. V tomto okamžiku budeme měřit, jak se změní účinnost a emise.



Obr. 3-1 Zplyňovací kotel Dakon Damat Pyro 20 G.

3.1 Dakon Damat Pyro 20 G

Jedná se o stacionární zplyňovací teplovodní kotel na dřevo určený pro vytápění a k přípravě TUV rodinných domů, provozoven a obdobných objektů. Otopný systém může být s otevřenou nebo uzavřenou tlakovou expanzní nádobou a nuceným oběhem topné vody. Konstrukce kotle je určena pro dřevěná polena do délky 280 mm. V kotli lze také spalovat dřevěné brikety, ale pouze v kombinaci s kusovým dřevem. V horní části kotle je

násypka paliva, do které je přiveden primární vzduch. Ve spodní části se nachází spalovací komora s keramickými tvarovkami. Horní a dolní část je oddělena keramickou tryskou, do které je přiveden sekundární vzduch. Pro zajištění tahu je kotel vybaven ventilátorem. Kotel je tepelně zaizolovaný minerální vatou [24].



Obr. 3-2 Dolní spalovací komora (vlevo), násypka a zplyňovací keramická tryska (vpravo).

Tab. 3-1 Technické údaje kotle Dakon Damat Pyro 20 G [24].

Technické údaje		
Jmenovitý výkon	kW	20
Rozsah výkonu	kW	15–20
Třída kotle	-	3
Účinnost	%	83-88
Teplota spalin – jmenovitý (minimální) výkon	°C	240 (150)
Objem násypné šachty	l	48
Rozměry plnicího otvoru půlkruh – šířka x výška	mm	370x230
Maximální provozní teplota	°C	95
Hmotnost	kg	300
Elektrický příkon	W	85
Spotřeba při jmenovitém výkonu dřevo, vlhkost 20 %	kg/hod	5,5

3.2 Popis experimentu

Experiment proběhl v laboratoři fakulty strojního inženýrství v budově D5 a byl proveden pod odborný dohled Ing. Otakara Štelccla. Měření emisí a účinnosti bylo provedeno dle normy ČSN EN 303-5:2013 a celkem se skládalo ze tří měření. Měření se lišila pouze spalovaným typem paliva (viz kap. 3.3 Použité palivo). Zaznamenaná hodnoty byly:

- hodnota plynných emisí,
- hodnoty tuhých emisí,

- teplota vody v chladicí smyčce před a za kotlem,
- teplota spalin.

Při měření nebyla zcela dodržena norma ČSN EN 303-5:2013, a to z několika důvodů. V průběhu roztápění se nepodařilo nastavit optimálně kotel, což se projevilo ve všech měřeních. Palivo se špatně zplyňovalo, několikrát se musel kotel otevřít a nechat palivo opět rozhořet, což znamenalo zásah do měření. Měřené hodnoty neustále kolísaly a jmenovitý tepelný výkon, který měl být 20 kW, se pohyboval v rozmezí od 10 kW až do 30 kW. Nastavení kotle ovlivňuje spousta proměnných (nastavení primárního, sekundárního vzduchu, rozměry a rozmístění polen v násypce ovlivňuje přístup vzduchu). Pro gravimetrické filtrační metody norma zavádí minimální počet měření a to čtyři měření. V poslední řadě chybí měření hodnot uhlovodíků tzv. OCG.

3.3 Použité palivo

Palivo použité pro experiment bylo dřevo – buk a dřevěné brikety dvojího typu. Jedny z nich byly dřevěné ekobrikety energo top, které jsou vyrobeny z čistých suchých smrkových hoblin a druhé byly dřevěné ekobrikety tvrdé energo hard top, které jsou vyrobeny z čistých suchých dubových hoblin. Výrobce bohužel neuvádí vlhkost briket a vlhkoměr nebyl v laboratoři k dispozici. Vzhledem k tomu, že sklad dřeva se nacházel v suché laboratoři, tak pro buk byla zvolena vlhkost 15 % a z této hodnoty je následně určena výhřevnost.

Tab. 3-2 Použité palivo.

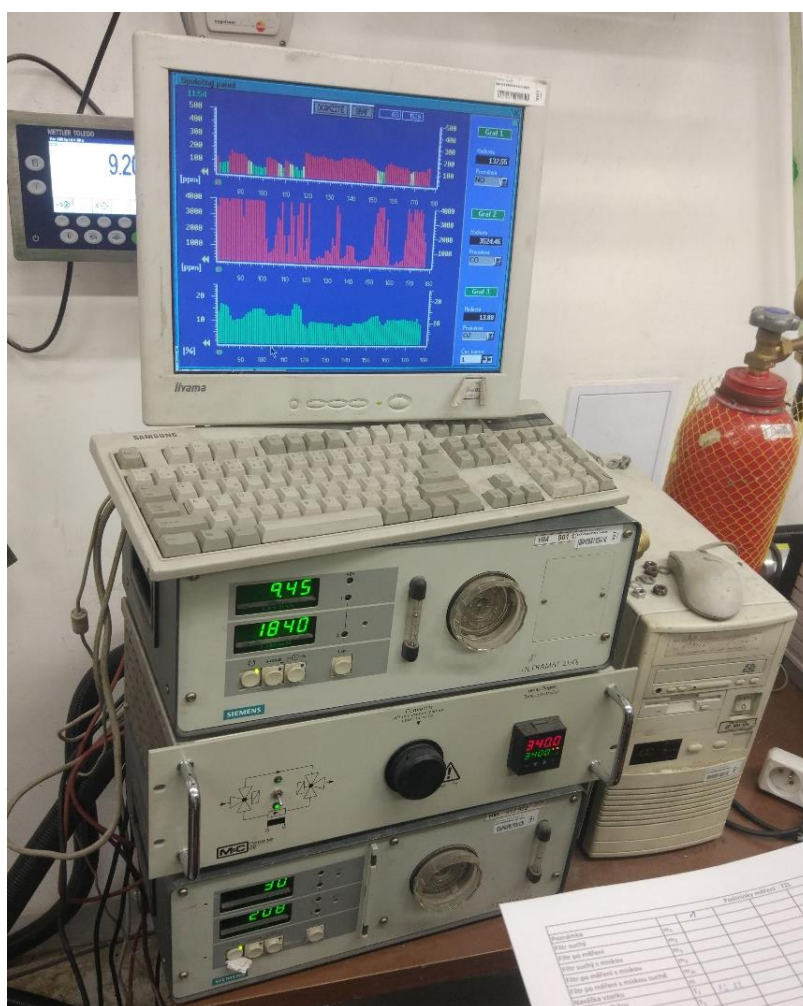
Palivo	Vlhkost [%]	Výhřevnost [MJ/kg]
Buk	15	14,94
Brikety energo top	-	18,9
Brikety energo hard top	-	18,7

3.4 Měřicí vybavení

Kotel byl připojen na mnoho měřících zařízení. Byly zkoumány zejména plynné a tuhé emise. Pro měření plynných emisí byly využity přístroje typu ULTRAMAT od firmy Siemens, konkrétně ULTRAMAT 21/O₂ a ULTRAMAT 22 (viz. Obr. 3-3). Hodnoty byly zaznamenávány přímo z kouřovodu, který byl napojen na tuto soustavu zařízení. ULTRAMAT 21/O₂ zaznamenával hodnoty kyslíku v procentech a ULTRAMAT 22 zaznamenával hodnoty oxidu uhelnatého (CO), oxidu siřičitého (SO₂) a oxidu dusnatého (NO) v jednotkách hmotnostního průtoku [mg/m³]. Následně tato soustava byla připojena na počítač, který každých 20 sekund hodnoty ukládal do mezi-paměti a každou minutu tyto hodnoty zprůměroval a uložil na disk. Takto uložená data lze vyexportovat do textového souboru a poté využít pro budoucí výpočty.

Pro měření tuhých (prachových) emisí byla využita gravimetrická filtrační metoda. Při této zkoušce je důležité, aby rychlost spalin v kouřovodu byla stejná i pro rychlost spalin, které prochází měřicí soustavou. Měřicí soustava se skládá z několika částí. V kouřovodu byla umístěna odběrová hubice, která přiváděla tuhé částice do zachycovače, kde byl umístěn

filtr. Filtr se před vsazením musel vyžít (nejméně dvě hodiny při teplotě 105 °C), poté se vložil do skleněné misky. Následně byl filtr i s miskou zvážen a hmotnost byla zapsaná do kontrolního protokolu. Po vyžítání se filtr umístil do zachycovače a na něj se v co nejkratším čase připojila hadice. Hadice byla připojena na kondenzátor, kde se srážel kondenzát a dále pokračovala do kufříku (viz. Obr. 3-4), který obsahoval ventil (pro regulaci rychlosti proudění) a plynoměr (pro zjištění průtoku). Soustava byla zakončená vývěvou (viz. Obr. 3-4). Norma stanovuje délku trvání zkoušky a to 30 minut. Průběh zkoušky spočíval ve vložení filtru, zapojení soustavy a spuštění vývěvy. Prach, který byl unášen proudem plynu se usazoval na filtru (docházelo k zacpávání), časem tedy docházelo k poklesu hmotnostního průtoku, proto bylo důležité průtok neustále upravovat. Po uplynutí 30 minut se filtr opatrně vyjmul, uložil zpět do skleněné misky, nechal opět vyžít v peci a poté zvážil. Hlavním výsledkem zkoušky byly rozdíly hmotnosti odběrového filtru, nicméně se zaznamenávaly i další hodnoty jako objemový průtok, teplota spalin a koncentrace kyslíku.



Obr. 3-3 Zařízení pro měření plynných emisí.



Obr. 3-4 Kufřík obsahující průtokoměr a plynoměr (vlevo), vývěva (vpravo).

3.5 Průběh měření

Před zahájením samotné zkoušky bylo nutné kotel vyčistit a následně uvést do provozního stavu (roztopit). Na roztápění bylo použito celkem 25,74 kg dřeva, konkrétně buku a trvalo 2:34 hod. Doba roztápění byla ovlivněna zejména špatným nastavením kotle⁸, často docházelo ke zhášení, a tudíž bylo roztápění prováděno několikrát. Při roztápění se kotel nepodařilo správně nastavit, ale z důvodu velké časové náročnosti experimentu se i přesto započalo první měření.

Tab. 3-3 Palivo pro měření.

Palivo	Měření	Hmotnost paliva [kg]
Buk	1.	11
Brikety energo top	2.	12,4
Brikety energo hard top	3.	12,44

3.6 Experiment ověření emisní třídy kotle Dakon Damat Pyro 20 G

Měření proběhlo podle normy ČSN EN 303-5:2013. Tato norma předepisuje, že zkouška musí trvat nejméně dvě hodiny. Hodnoty zaznamenané při měření (CO a O_2) je nutné pro další porovnání přepočítat tak, aby koncentrace O_2 byla dle normy 10 %, tato koncentrace se nazývá referenční koncentrace a přepočítá se pomocí vztahu:

$$CO = CO_{avg} \cdot \frac{21 - O_{2standart}}{21 - O_{2avg}} \quad (6)$$

kde CO výsledné množství CO [mg/m^3] při 10 % O_2 ,
 CO_{avg} průměrné množství CO v měření při určité koncentraci [mg/m^3],
 $O_{2standart}$ požadované množství O_2 [%],
 O_{2avg} průměrné množství O_2 během spalování [%].

⁸ Správné nastavení kotle ovlivňuje mnoho proměnných, jednak množství primárního a sekundárního vzduchu, ale také například i velikost polen, typ paliva a mnoho dalších proměnných.

3.6.1 Výsledky měření plynných emisí

Tab. 3-4 Záznam měření plynných emisí.

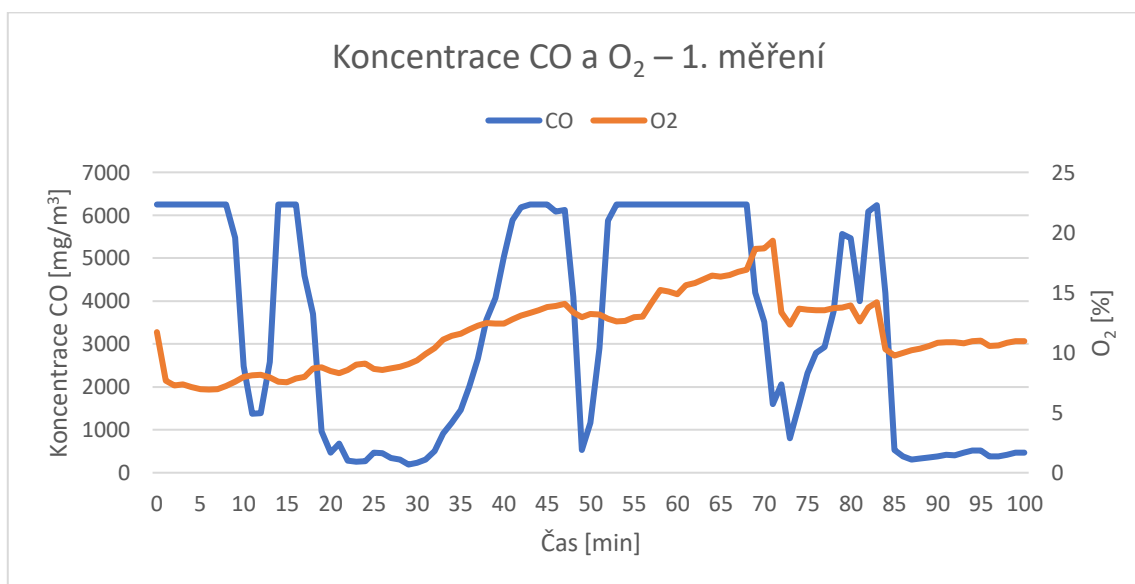
Měření	1.	2.	3.	Jednotky
Začátek měření (t ₁)	12:06	13:47	16:25	hh:mm
Konec měření (t ₂)	13:46	16:24	18:25	hh:mm
Délka měření (t)	1:40	2:37	2:00	hh:mm
Počet naměřených hodnot (x)	101	157	122	-

Výpočty průměrných hodnot oxidu uhelnatého, oxidu dusnatého a kyslíku z 1. měření:

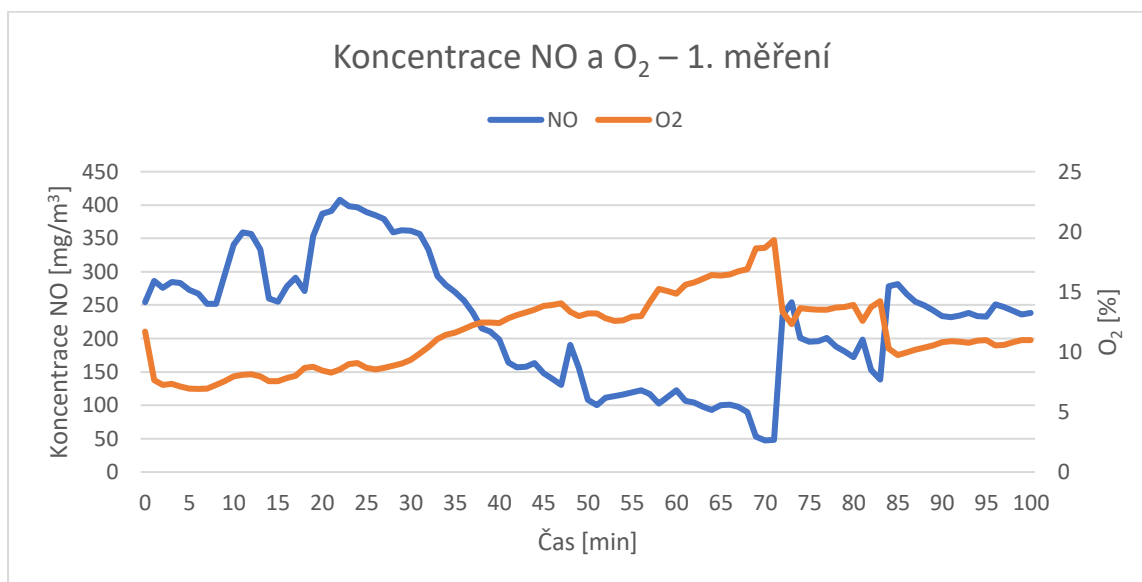
$$\overline{CO}_{avg} = \frac{\sum_1^{101} CO}{x} = 3412 \frac{mg}{m^3} \quad (7)$$

$$\overline{NO} = \frac{\sum_1^{101} NO}{x} = 225,6 \frac{mg}{m^3} \quad (8)$$

$$\overline{O_2}_{avg} = \frac{\sum_1^{101} O_2}{x} = 11,57 \% \quad (9)$$



Graf 1 Koncentrace CO a O₂ - 1. měření.

Graf 2 Koncentrace NO a O₂ - 1. měření.

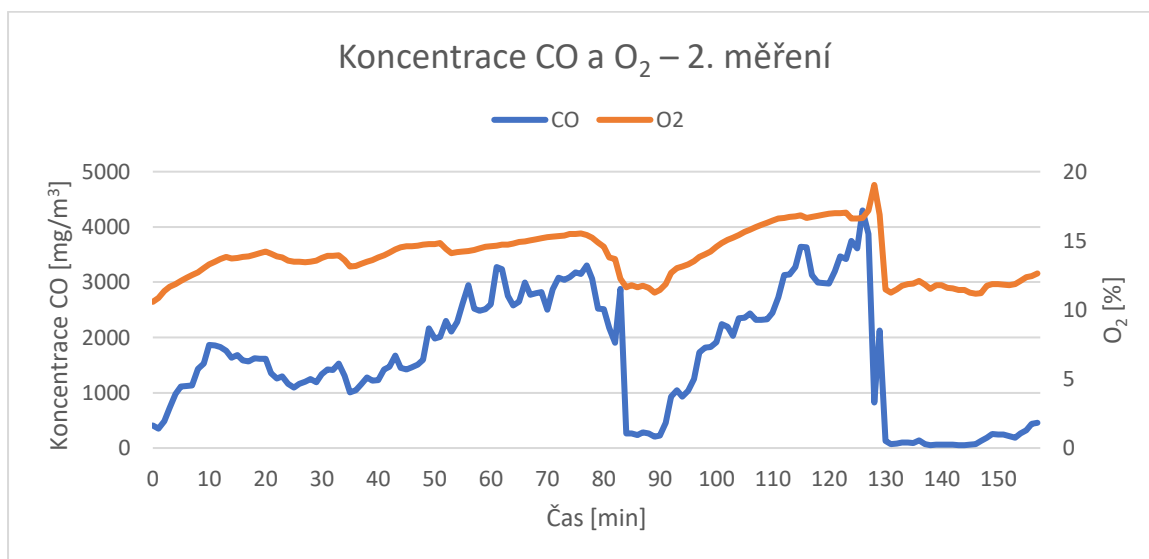
Z grafu 1 vyplývá, že 1. měření neprobíhalo nejlépe. Koncentrace CO neustále stoukala až na hodnotu 6250 mg/m³, což byla nejvyšší měřitelná hodnota přístroje. Do měření se muselo celkem 5x zasahovat a palivo nechávat opětovně rozhořet. Tyto zásahy můžeme vidět v grafu 1. Po zasažení do měření se hodnota CO radikálně snížila a postupně opět stoukala. Zásahy lze také vidět i v grafu 2, zde hodnoty NO při zásahu naopak vzrostly a poté postupně klesaly. Nejvyšší naměřené hodnoty NO se vyskytují přibližně ve dvacáté minutě měření. Takto vysoké hodnoty jsou zapříčiněny vyšší teplotou spalin. Časté vysoké hodnoty byly zapříčiněny nejspíše špatným nastavením primárního a sekundárního vzduchu, který nebylo možné ideálně odladit z důvodu velké časové náročnosti celého experimentu.

Výpočty průměrných hodnot oxidu uhelnatého, oxidu dusnatého a kyslíku z 2. měření:

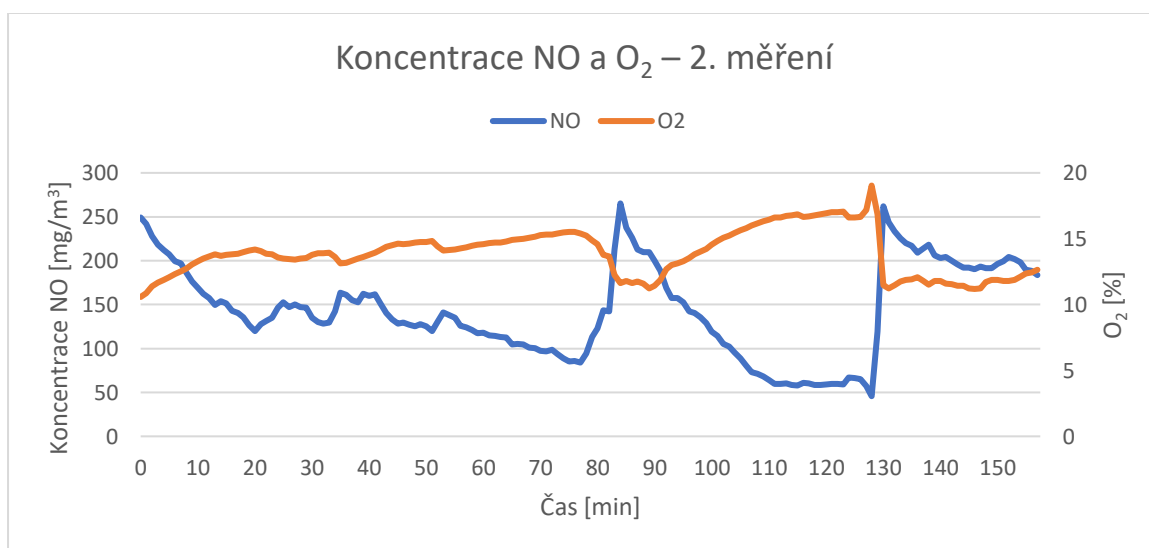
$$\overline{CO}_{avg} = \frac{\sum_1^{157} CO}{x} = 1657 \frac{mg}{m^3} \quad (10)$$

$$\overline{NO} = \frac{\sum_1^{157} NO}{x} = 143,1 \frac{mg}{m^3} \quad (11)$$

$$\overline{O_{2avg}} = \frac{\sum_1^{157} O_2}{x} = 13,91 \% \quad (12)$$



Graf 3 Koncentrace CO a O₂ - 2. měření.



Graf 4 Koncentrace NO a O₂ - 2. měření.

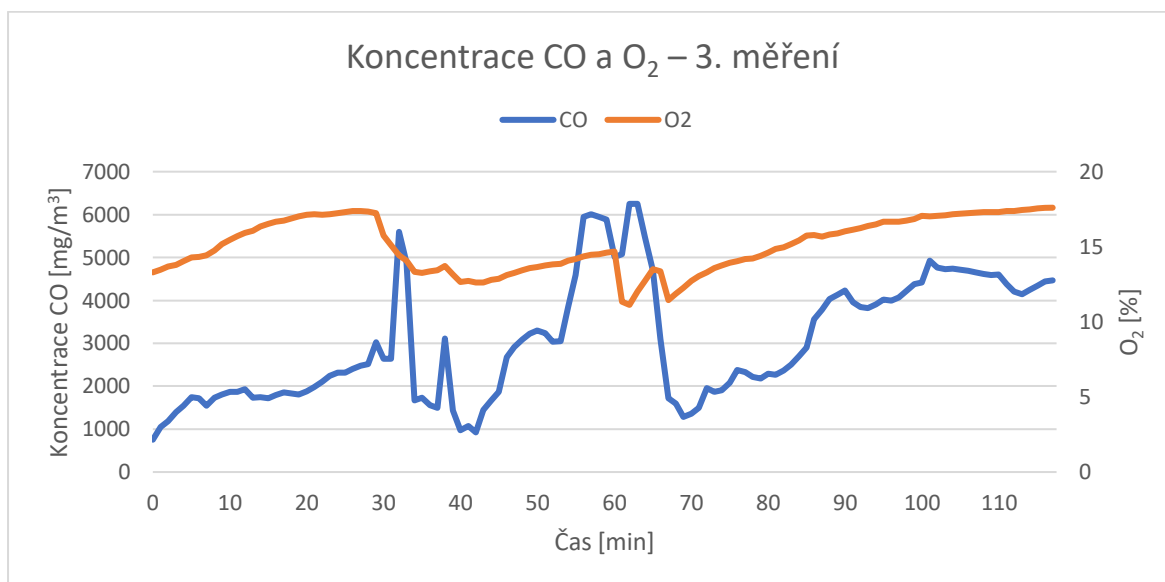
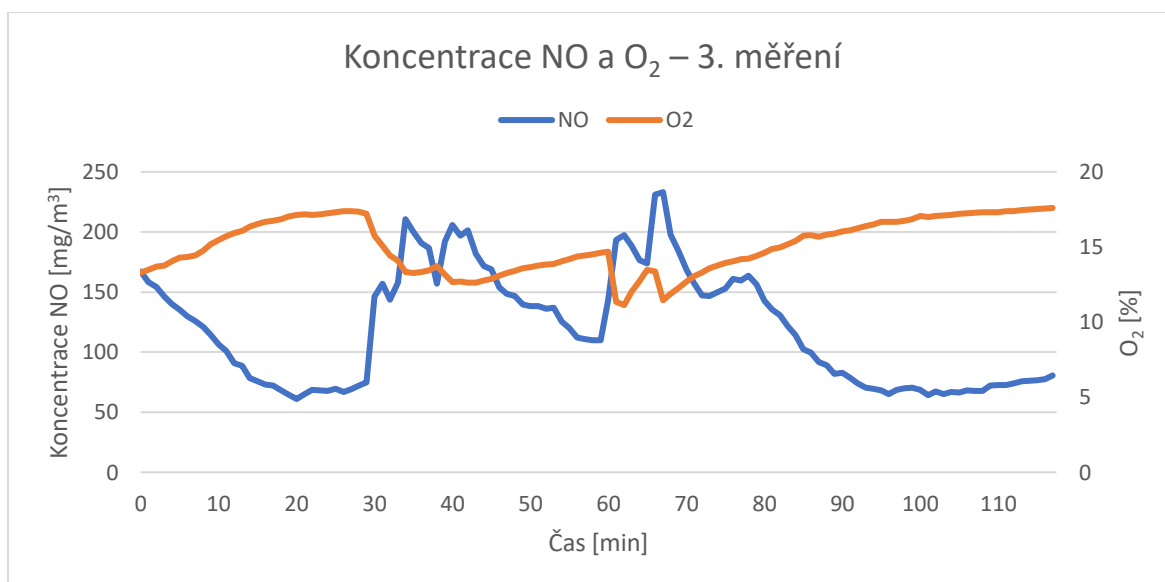
Druhé měření probíhalo o poznání lépe než první, ale kotel byl i přesto jednou otevřen, a to v 120 minutě, z důvodu rozbití briquet na menší části (lepší přísun vzduchu, lépe prohořivaly). Po tomto zásahu došlo k razantnímu poklesu hodnot CO. Koncentrace oxidu uhelnatého lehce klesají, ale při zásahu do měření vzrostou.

Výpočty průměrných hodnot oxidu uhelnatého, oxidu dusnatého a kyslíku z 3. měření:

$$\overline{CO}_{avg} = \frac{\sum_1^{122} CO}{x} = 2968 \frac{mg}{m^3} \quad (13)$$

$$\overline{NO} = \frac{\sum_1^{122} NO}{x} = 122 \frac{mg}{m^3} \quad (14)$$

$$\overline{O_{2avg}} = \frac{\sum_1^{122} O_2}{x} = 15,01 \% \quad (15)$$

Graf 5 Koncentrace CO a O₂ - 3. měření.Graf 6 Koncentrace NO a O₂ - 3. měření.

V šedesáté minutě třetího měření byl zaznamenán pokles výkonu, současně velký nárůst hodnot CO a NO. Při otevření kotle došlo k zjištění, že se brikety zasekly v násypce. Brikety se při hoření roztahují a následně rozpukávají na menší kousky. Vzhledem k tomu, že délka briket byla 270 mm a hloubka násypky 280 mm, tak k tomuto procesu nemohlo dojít. Brikety pouze obhořívaly na obvodu. Problém byl vyřešen uvolněním briket. Další zásah do měření byl v devadesáté minutě z důvodu nízkého výkonu. Brikety byly rozbity a rozprostřeny v násypce. Teplota spalin vzrostla a současně s ní klesla hodnota NO.

Měření celkem probíhalo 6 hodin a 19 minut a bylo při něm vyprodukováno přibližně 967 g oxidu uhelnatého.

Tab. 3-5 Srovnání naměřených hodnot.

Měření	CO _{avg} [mg/m ³]	CO při 10 % O ₂ [mg/m ³]	NO [mg/m ³]	O _{2avg} [%]
1.	3412	3980	225,6	11,57
2.	1657	2571	143,1	13,91
3.	2968	5450	122	15,01
Průměr	2679	4000	163,6	13,5

3.6.2 Výsledky měření tuhých emisí

Měření byla provedena gravimetrickou filtrační metodou podle normy. Z ní vyplývá, že zkouška musí trvat nejméně 30 minut, což bylo u každého měření dodrženo. Přehled naměřených hodnot je uveden v Tab. 3-4.

Výpočty hmotnostní koncentrace: [27]

$$c = \frac{\Delta m}{V_{ms}} [mg \cdot m^{-3}]. \quad (16)$$

Emisní koncentrace se uvádí jako hmotnostní koncentrace (mg/m³) přepočítaná na suché spaliny při 10 % kyslíku a normálních fyzikálních podmínkách (mg/m³) při 0 °C a 101325 Pa. Přepočet je zajištěn pomocí následujícího vztahu: [27]

$$V_{pr} = V_{ms} \cdot \frac{(p_a + p_c)}{101325} \cdot \frac{273,15}{(273,15 + t_o)} \cdot \frac{21 - O_2}{21 - O_{2ref}} [m^3]. \quad (17)$$

Výsledná koncentrace v suchém plynu za normálních fyzikálních podmínek, přepočítaná na referenční obsah kyslíku je: [27]

$$c_v = \frac{\Delta m}{V_{pr}} [mg \cdot m^{-3}]. \quad (18)$$

Tab. 3-6 Protokol měření tuhých emisí.

Název	Značka	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	Jednotky
Začátek odběru	t_1	12:22	13:05	14:00	14:35	16:40	17:14	17:46	hh:mm
Konec odběru	t_2	12:52	13:35	14:30	15:05	17:10	17:44	18:16	hh:mm
Délka odběru	t	30	30	30	30	30	30	30	min
Hmotnost usazených částic	Δm	14,2	20,7	16,2	6,6	18,7	16,3	18,4	mg
Medián koncentrace O_2	O_2	11,41	13,75	13,79	14,78	16,34	13,58	16,4	%
Referenční koncentrace O_2	O_{2ref}	10	10	10	10	10	10	10	%
Objem měřených spalin	V_{ms}	0,187	0,461	0,459	0,459	0,472	0,458	0,427	m^3
Atmosférický tlak	p_a	102180	102180	102180	102180	102180	102180	102180	Pa
Počáteční stav plynoměru	V_1	207,343	207,594	208,055	208,514	208,973	209,445	209,903	m^3
Konečný stav plynoměru	V_2	207,530	208,055	208,514	208,973	209,445	209,903	210,330	m^3
Tlak v plynoměru	p_c	0	0	0	0	0	0	0	Pa
Teplota okolí	T_o	19,5	20	19,5	19	19	19	19	$^{\circ}C$

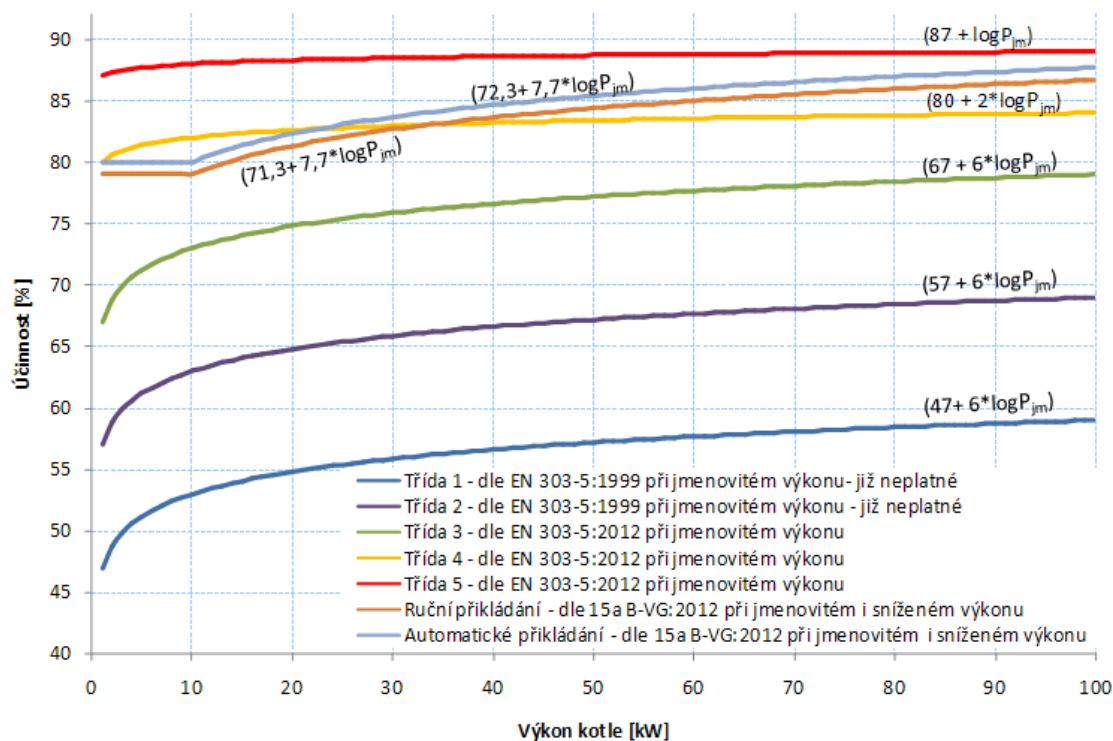
Tab. 3-7 Vypočítané hodnoty z měření TZL.

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	Jednotky
c	75,94	44,90	35,29	14,38	39,62	35,59	43,09	[mg·m ⁻³]
V_{pr}	0,16	0,31	0,30	0,26	0,20	0,31	0,18	[m ³]
c_v	86,38	67,56	53,40	25,22	92,74	52,32	102,19	[mg·m ⁻³]

Limit dle ČSN EN 303-5 pro 3. emisní třídu je 150 mg·m⁻³, tyto hodnoty splňují veškeré vypočítané hodnoty. Vypočítaná hodnota ze čtvrtého měření dokonce splňuje požadavky 4. emisní třídy, a to pod 50 mg·m⁻³ tuhých emisí.

3.7 Účinnosti kotle

Norma definuje emisní třídu kotle dle závislosti na minimální účinnosti a jmenovitém výkonu – viz Obr. 3-5. [25] Kotel, na kterém jsme provedli experiment, má jmenovitý výkon 20 kW a splňuje dle výrobce 3. emisní třídu. Z Obr. 3-5 vyplývá, že minimální účinnost pro náš kotle, aby splňoval předepsanou emisní normu, musí být nejméně 74,8 %.



Obr. 3-5 Minimální požadované účinnosti pro dané emisní třídy [25].

3.7.1 Experiment ověření účinnosti kotle Dakon Damat Pyro 20 G

Účinnost kotle spočítáme přímou metodou pomocí vztahu:

$$\eta = \frac{Q_{\text{vyrobené}}}{Q_{\text{dodané}}} = \frac{\dot{m}_v \cdot c \cdot \Delta t}{\dot{m}_p \cdot Q_i^r} \cdot 100 [\%]. \quad (19)$$

Naměřené hodnoty a vypočítané účinnosti jsou uvedeny v Tab. 3-8.

Tab. 3-8 Naměřené hodnoty a průběh zkoušky.

Název	Značka	1.	2.	3.	Jednotky
Začátek měření	t_1	12:06	13:47	16:25	hh:mm
Konec měření	t_2	13:46	16:24	18:25	hh:mm
Délka měření	t	1:40	2:37	2:00	hh:mm
Hmotnostní průtok paliva	\dot{m}_p	0,002	0,0013	0,0017	kg/s
Hmotnostní průtok vody	\dot{m}_v	0,381	0,413	0,425	kg/s
Měrná tepelná kapacita vody	c	4180	4180	4180	J/(kg·K)
Rozdíl teplot vody	Δt	16,2	10,6	9,6	K
Výhřevnost paliva	Q_i^r	14,94	18,9	18,4	MJ/kg
Vypočtená účinnost	η	86,3	74,5	54,5	%

Dle našeho experimentu kotel Dakon Damat Pyro 20 G splňuje 3. emisní třídu pouze v prvním měření. V druhém se naměřená hodnota velmi přiblížila k hodnotě 75 %, ale této účinnosti nebylo nedosaženo.

3.8 Vyhodnocení zkoušky dle normy ČSN EN 303-5

Tab. 3-9 Vyhodnocení zkoušky dle normy ČSN EN 303-5.

Typ zkoušky	Mezní limity dle ČSN EN 303-5		Měření	Naměřené hodnoty	3. Třída
	3. Třída	4. Třída			
CO [mg/m ³]	5000	1200	1.	3980	Splněna
			2.	2571	Splněna
			3.	5450	Nesplněna
Tuhé emise [mg/m ³]	150	50	1.	76,97	Splněna
			2.	39,31	Splněna
			3.	82,42	Splněna
Účinnost [%]	74,8	82,6	1.	86,3	Splněna
			2.	74,5	Nesplněna
			3.	54,5	Nesplněna

Výrobce pro zkoumaný kotel uvádí hodnoty účinnosti od 83-88 %. Tato hodnota byla dosažena pouze v prvním měření.

3.9 Vyhodnocení zkoušky podle směrnice o Ekodesignu

Kotel, na kterém jsme prováděli experiment, zkusíme porovnat se stávající směrnici o Ekodesignu. V Tab. 3-10 jsou porovnány naměřené hodnoty s mezními limity této směrnice. Oproti normě ČSN EN 303-5 se ve směrnici o Ekodesignu také porovnávají hodnoty oxidů dusíku a uhlovodíky.

Tab. 3-10 Srovnání naměřených hodnot se směrnici o Ekodesignu.

Sledovaný parametr	Mezní limity	Měření	Naměřené hodnoty	Požadavek Ekodesignu
Oxid uhelnatý [mg/m ³]	700	1.	3412	Nesplněn
		2.	1657	Nesplněn
		3.	2968	Nesplněn
Oxidy dusíku [mg/m ³]	200	1.	225,6	Nesplněn
		2.	143,1	Splněn
		3.	122	Splněn
Tuhé emise [mg/m ³]	60	1.	76,97	Nesplněn
		2.	39,31	Splněn
		3.	82,42	Nesplněn
Účinnost kotle [%]	75	1.	86,3	Splněn
		2.	74,5	Nesplněn
		3.	54,5	Nesplněn

Závěr

Cílem práce byla rešerše týkající se dostupných tuhých paliv a kotlů malých výkonů na tuhá paliva. Současně také praktická část, která spočívala v provedení experimentu ověření emisní třídy a účinnosti daného kotle na základě naměřených hodnot. Experiment proběhl v souladu s normou ČSN EN 303-5.

První polovina práce je věnována rešeršní studii dané problematiky. První kapitola se zabývá palivy. Jsou zde popsány hlavní části, z kterých se skládá palivo. Následuje popis důležitých charakteristik paliv, jako je spalné teplo nebo výhřevnost. Dále jsou zde uvedeny dostupná paliva, které lze využít pro vytápění. Jedním ze základních paliv je uhlí, které se dělí na lignit, hnědé uhlí, černé uhlí a antracit. Je zde popsán vznik a hlavní charakteristiky těchto paliv. Další důležité palivo v oblasti energetiky je biomasa. Biomasa je popsána a dále rozdělena na konkrétní paliva určená pro vytápění.

Další kapitola se zabývá problematikou kotlů malých výkonů na tuhá paliva. Zde jsou kotle rozděleny podle způsobu přísunu vzduchu, dodávky paliva, použité technologie a druhu spalovaného paliva. Velká část je věnována zejména rozdělení kotlů podle typu použité technologie. V závěru této kapitoly jsou zmíněny emise znečišťujících látek a jsou zde rozepsány současné normy. Jedná se především o normu ČSN EN 303-5, která je doplněna o směrnici Ekodesignu.

Druhá polovina práce je zaměřena na praktickou část, ve kterém bylo za cíl stanovit emisní třídu a účinnost kotle Dakon Damat Pyro 20 G. Experiment se řídil dle normy ČSN EN 303-5. Zkouška byla provedena pro tři různá paliva, přičemž nastavení primárního a sekundárního vzduchu zůstalo stejné. Zapisovaly se hodnoty CO, NO, O₂ a SO₂, dále se zaznamenávaly hodnoty potřebné pro výpočet účinnosti a také byly odebrány vzorky pro určení tuhých emisí. Dále je zde popsáno měřicí zařízení, které bylo použito pro zaznamenání zkoumaných hodnot.

Závěrečnou část práce tvoří znázornění a vyhodnocení výsledků naměřených hodnot. Jsou zde provedeny potřebné výpočty pro stanovení emisí. Kotel dle výrobce splňuje 3. emisní třídu, což se povedlo naměřit pouze v jednom ze tří měření. Experiment měření plyných emisí splňovaly pouze dvě měření. Důležité naměřené hodnoty jsou graficky znázorněny. Dále je zde popsán experiment měření tuhých částic. Celkem bylo odebráno 7 vzorků. Naměřené hodnoty jsou přepočítány a vyhodnoceny. Veškeré hodnoty splňovaly danou normu. Poslední měření se týkalo účinnosti. Zde byly opět vyhodnoceny naměřené výsledky. Paradoxně hodnoty prvního měření, které probíhalo nejhůře, po vyhodnocení dosahovaly nejlepších výsledků. Na závěr jsou naměřené výsledky srovnány se směrnici o Ekodesignu.

Na závěr lze říci, že kotel je dle výrobce primárně určen pro spalování jednoho druhu paliva (dřeva), což se prokázalo provedeným experimentem. Pro dřevo kotel splnil 3. emisní třídu ve všech provedených měřeních.

Seznam použité literatury

- [1] Palivo. *Wikipedie* [online]. [cit. 2019-02-23]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Palivo>
- [2] HORÁK, Jiří a KUBESA, Petr. O spalování tuhých paliv v lokálních topeništích (1). *TZB-info* [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2019-02-23]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/8618-o-spalovani-tuhych-paliv-v-lokalnich-topenistich-1>
- [3] BALÁŠ, Marek. Kotle a výměníky tepla. Vydání druhé. Brno: Akademické nakladatelství CERM®, s.r.o. Brno, 2013, 119 s. ISBN 978-80-214-4770-7.
- [4] KÓL, Přemysl. Spalování tuhých paliv. *Spalovací procesy* [online]. 2011 [cit. 2019-03-09]. Dostupné z: <http://spalovaci-procesy.wz.cz/TP.html>
- [5] Uhlí. *Vítejte na Zemi* [online]. [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=uhli&site=energie>
- [6] JAK UHLÍ VZNIKLO. *OKD* [online]. Stonavská 2179, 735 06 Karviná [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <https://www.okd.cz/cs/tezime-uhli/jak-uhli-vzniklo>
- [7] DOSKOČIL, Leoš. Neenergetické aplikace lignitu. *ChemPoint* [online]. [cit. 2019-03-22]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/neenergeticke-aplikace-lignitu>
- [8] Těžba a využití černého uhlí: Rozdělení [online]. 2011 [cit. 2019-03-22]. Dostupné z: <https://tezba-a-vyuziti-cerneho-uhli.webnode.cz/uhli/rozdeleni/>
- [9] Černé uhlí. *Černé uhlí* [online]. [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: <http://www.cerneuhli.cz/>
- [10] Biomasa. *Skupina ČEZ* [online]. 2019 [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/biomasa.html>
- [11] Jak funguje výroba energie z biomasy. *Skupina ČEZ* [online]. 2019 [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/biomasa/flash-model-jak-funguje-vyroba-energie-z-biomasy.html>
- [12] VOBOŘIL, David. Biomasa – využití, zpracování, výhody a nevýhody, energetické využití v ČR. *O energetice* [online]. 2017 [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/biomasa-vyuziti-zpracovani-vyhody-a-nevyhody/>
- [13] QUASCHNING, Volker. Obnovitelné zdroje energií. Praha: Grada, 2010. Stavitel. ISBN 978-80-247-3250-3.
- [14] Porovnání nákladů na vytápění, teplou vodu a elektrickou energii. *TZB-info* [online]. [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/138-porovnani-nakladu-na-vytapeni-teplou-vodu-a-elektrickou-energii-tzb-info>

- [15] LYČKA, Zdeněk. Jak vybírat nový kotel na pevná paliva (1). *TZB-info* [online]. 2013 [cit. 2019-04-17]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/9798-jak-vybirat-novy-kotel-na-pevna-paliva-1>
- [16] KOLONIČNÝ, Jan, HORÁK, Jiří a ŠEVČÍKOVÁ PETRÁNKOVÁ, Silvie. Kotle malých výkonů na pevné paliva. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2542-7.
- [17] RYŠAVÝ, Jiří, HORÁK, Jiří, HOPAN, František, KRPEC, Kamil, KUBESA, Petr a KREMER, Jiří. Komfort kotlů na tuhá/pevná paliva – část I. *TZB-info* [online]. VŠB-TU Ostrava, 2018 [cit. 2019-04-17]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/17137-komfort-kotlu-na-tuha-pevna-paliva-cast-i>
- [18] KDY DOJDE ROPA A CO SE STANE? V OPTIMISTICKÉ VERZI ZA 60 LET. A V PESIMISTICKÉ...*National Geographic* [online]. 2018 [cit. 2019-04-17]. Dostupné z: <https://www.national-geographic.cz/clanky/kdy-dojde-ropa-v-optimisticke-verzi-za-60-let-a-v-pesimisticke.html>
- [19] LYČKA, Zdeněk. Ocelový nebo litinový automatický kotel. *TZB-info* [online]. 2014 [cit. 2019-04-26]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/10844-ocelovy-nebo-litinovy-automaticky-kotel>
- [20] HORÁK, Jiří, HOPAN, František, KRPEC, Kamil a KUBESA, Petr. Co musí splnit nový kotel na tuhá paliva po roce 2020? *TZB-info* [online]. VŠB-TU Ostrava, 2018 [cit. 2019-04-26]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/12909-co-musi-splnit-novy-kotel-na-tuha-paliva-po-roce-2020>
- [21] Kotle emisní třída 5. *GAS KOMPLET s.r.o.* [online]. Slezská 1288, 735 14 Orlová Poruba [cit. 2019-04-26]. Dostupné z: <http://www.mujkotel.cz/kotle-emisni-trida-5/>
- [22] JAK DLOUHO MOHU POUŽÍVAT KOTEL 3. EMISNÍ TŘÍDY? *TOPME UHLÍM* [online]. [cit. 2019-04-26]. Dostupné z: <http://www.topmeuhlim.cz/1980-2/>
- [23] HORÁK, Jiří, et al. Jaké parametry musí splnit kotle na tuhá paliva? *TZB-info* [online]. VŠB-TU Ostrava, 2017 [cit. 2019-04-26]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/15865-jake-parametry-musi-splnit-kotle-na-tuha-paliva>
- [24] Stacionární kotel na pyrolýzu DAKON DAMAT PYRO G [online]. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://www.dakon.cz/wp-content/uploads/2014/06/DAMAT-PYRO-G-navod-k-instalaci-obsluze-a-udrzbe.pdf>
- [25] HORÁK, Jiří, et al. Jaké parametry musí splnit kotle na tuhá paliva? Legislativa v ČR a Evropě. *TZB-info* [online]. VŠB-TU Ostrava, 2013 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/9665-jake-parametry-musi-splnit-kotle-na-tuha-paliva-legislativa-v-cr-a-evrope>

- [26] STUPAVSKÝ, Vladimír. Směrnice o Ekodesignu pro kotle a kamna na tuhá paliva. *TZB-info* [online]. 2014 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/kotlikove-dotace/11937-smernice-o-ekodesignu-pro-kotle-a-kamna-na-tuha-paliva>
- [27] VOTOUPAL, Adam. Zplyňovací kotle [online]. Brno, 2017 [cit. 2019-05-16]. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Energetický ústav.
- [28] NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2015/ 1189, Úřední věstník Evropské unie [online]. cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015R1189&from=CS>
- [29] Jak vzniklo uhlí. *Severočeské doly a.s.* [online]. Boženy Němcové 5359, 430 01 Chomutov [2019-05-17]. Dostupné z: <https://www.sd-infocentrum.cz/pribeh/brezensky-drak/interaktivni-program.aspx#>

Seznam použitých symbolů a zkratk

Zkratky	Popis	Jednotka
plm	plnometr, pevný metr	[-]
rm	prostorový skládaný metr	[-]
TUV	teplá užitková voda	[-]
TZL	emise tuhých částic	[-]
Symbole	Popis	Jednotka
A	popelovina	[-]
Al ₂ O ₃	oxid hlinitý	[-]
C	uhlík	[-]
CaO	oxid vápenatý	[-]
CO ₂	oxid uhličitý	[-]
Fe ₂ O ₃	oxid železitý	[-]
h	hořlavina	[-]
H ₂	vodík	[-]
MgO	oxid hořečnatý	[-]
N	dusík	[-]
NO _x	oxidy dusíku	[-]
O ₂	kyslík	[-]
Q_i^r	výhřevnost	[kJ·kg ⁻¹]
Q _s	spalné teplo	[kJ·kg ⁻¹]
r	výparné/kondenzační teplo vody	[kJ·kg ⁻¹]
S	síra	[-]
\bar{S}	měrná sirnatost	[kJ·kg ⁻¹]
SiO ₂	oxid křemičitý	[-]
SO ₂	oxid siřičitý	[-]
t _a	teplota měknutí	[°C]
t _b	teplota tavení	[°C]
t _c	teplota tečení	[°C]
W	voda v palivu	[-]
W ^r	obsah vody v palivu	[-]

Seznam obrázků

Obr. 1-1 Srovnání prvkového složení hořlaviny různých paliv včetně výhřevností.....	18
Obr. 1-2 Závislost výhřevnosti a spalného tepla dřeva na jeho vlhkosti.....	18
Obr. 1-3 Mechanismus tvorby uhlí z rostlinného materiálu	21
Obr. 1-4 Jak vzniklo uhlí.....	22
Obr. 1-5 Schématické zobrazení dějů při vysoušení	27
Obr. 2-1 Funkční schéma prohořivacího kotle.....	31
Obr. 2-2 Funkční schéma odhořivacího kotle	31
Obr. 2-3 Funkční schéma zplyňovacího kotle.....	32
Obr. 3-1 Zplyňovací kotel Dakon Damat Pyro 20 G.	35
Obr. 3-2 Dolní spalovací komora (vlevo), násypka a zplyňovací keramická tryska (vpravo).....	36
Obr. 3-3 Zařízení pro měření plynných emisí.....	38
Obr. 3-4 Kufřík obsahující průtokoměr a plynoměr (vlevo), vývěva (vpravo).....	39
Obr. 3-5 Minimální požadované účinnosti pro dané emisní třídy	46

Seznam tabulek

Tab. 1-1 Obsah síry a měrná sirnatost fosilních paliv	21
Tab. 1-2 Hrubý a prvkový rozbor různých druhů paliv	24
Tab. 1-3 Vlastnosti různých druhů palivového dřeva	26
Tab. 1-4 Porovnání nákladů na vytápění.....	28
Tab. 2-1 Přehled souvisejících s prodejem a provozem kotlů na tuhá paliva pro vytápění domácností (do 500 kW).....	33
Tab. 2-2 Hodnoty emisních limitů a účinnosti pro kotle na tuhá paliva podle směrnice o Ekodesignu	34
Tab. 3-1 Technické údaje kotle Dakon Damat Pyro 20 G	36
Tab. 3-2 Použité palivo	37
Tab. 3-3 Palivo pro měření.....	39
Tab. 3-4 Záznam měření plynných emisí.....	40
Tab. 3-5 Srovnání naměřených hodnot	44
Tab. 3-6 Protokol měření tuhých emisí.....	45
Tab. 3-7 Vypočítané hodnoty z měření TZL.....	46
Tab. 3-8 Naměřené hodnoty a průběh zkoušky.....	47
Tab. 3-9 Vyhodnocení zkoušky dle normy ČSN EN 303-5.....	47
Tab. 3-10 Srovnání naměřených hodnot se směrnicí o Ekodesignu	48

Seznam grafů

Graf 1 Koncentrace CO a O ₂ - 1. měření	40
Graf 2 Koncentrace NO a O ₂ - 1. měření	41
Graf 3 Koncentrace CO a O ₂ - 2. měření	42
Graf 4 Koncentrace NO a O ₂ - 2. měření	42
Graf 5 Koncentrace CO a O ₂ - 3. měření	43
Graf 6 Koncentrace NO a O ₂ - 3. měření	43