



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

AUTOMATICKÉ KOTLE NA PELETY

AUTOMATIC PELLETS BOILERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ladislav Albrecht

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Ladislav Albrecht**
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:

Automatické kotle na pelety

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Náplní práce je porovnání automatických kotlů na dřevní i nedřevní pelety vhodných pro vytápění rodinných domů. Student se bude věnovat peletám a jejich vlastnostem, dále provede průzkum trhu s peletkovými kotli a v závěru práce provede základní měření a posouzení účinnosti a emisí kotle pro různá paliva.

Cíle bakalářské práce:

- Biomasoné pelety a jejich vlastnosti.
- Technologie peletovacích kotlů.
- Porovnání různých druhů pelet z hlediska účinnosti a emisí kotlů.

Seznam doporučené literatury:

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

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

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

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

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

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

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

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá biomasovými peletami a spalováním různých druhů těchto pelet v automatickém kotli na pelety. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V první části je zpracována rešerše o vlastnostech tuhých paliv, dále se práce zabývá biomasou a v poslední části dřevními a alternativními peletami. Také popisuje technologie automatických kotlů na pelety. Druhá část popisuje provedené palivové rozbory, nepřímou metodu výpočtu účinnosti kotle, spalovací zkoušku a vyhodnocení.

Klíčová slova

Automatický kotel na pelety, biomasa, emise, pelety, spalovací zkouška, účinnost, vlastnosti dřevních pelet

Abstract

Bachelor thesis deals with biomass pellets and combustion of various types of these pellets in an automatic pellet boiler. The thesis is divided into the theoretical and practical part. The first part deals with the research on the properties of solid fuels, next with biomass and finally with wood and alternative pellets. It also describes the technology of automatic pellet boilers. The second part describes the fuel analysis, the indirect method of calculating the efficiency of the boiler, the combustion test and the evaluation.

Keywords

Automatic pellet boiler, biomass, combustion test, efficiency, emission, pellets, properties of wood pellets

Bibliografická citace

ALBRECHT, L. *Automatické kotle na pelety*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 76 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D..

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Automatické kotle na pelety vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s užitím uvedených podkladů a odborné literatury.

V Brně dne 25.5.2018

.....
Ladislav Albrecht

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval doc. Ing. Markovi Balášovi, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování bakalářské práce věnoval. Rovněž bych chtěl poděkovat Ing. Haně Lisé, Ph.D. a Ing. Otakaru Štelcovi za vstřícnost a pomoc při měření.

Obsah

Úvod	15
1. Paliva	16
1.1. Rozdělení paliv	16
1.1.1. Rozdělení podle skupenství	16
1.1.2. Rozdělení podle původu	16
1.2. Požadavky na paliva	16
2. Tuhá Paliva	17
2.1. Vlastnosti tuhých paliv	17
2.1.1. Hrubý rozbor	17
2.1.2. Spalné teplo paliva	18
2.1.3. Výhřevnost paliva.....	19
3. Biomasa	20
3.1. Získávání energie z biomasy.....	20
3.2. Rozdělení biomasy.....	20
3.3. Mechanická úprava dřevní biomasy	22
3.4. Pelety z biomasy	22
3.5. Dřevní pelety a jejich vlastnosti.....	24
3.5.1. Norma pro pelety	26
3.5.2. Porovnání pelet z tvrdého a měkkého dřeva.....	28
3.6. Alternativní pelety	29
3.6.1. Porovnání parametrů dřevních a alternativních pelet	29
4. Automatické kotle na pelety	30
4.1. Peletový hořák	30
4.2. Konstrukce a principy peletových hořáků	32
4.2.1. Miskový hořák	32
4.2.2. Retortový hořák	33
4.2.3. Trubicový hořák	33
5. Měření vlastností zkoušených paliv	34
5.1. Měření vlhkosti	34
5.2. Měření popeloviny	35
5.3. Měření výhřevnosti	36
5.4. Shrnutí.....	37
6. Výpočet účinnosti kotle	38
6.1. Výpočet minimálního množství vzduchu	38
6.2. Výpočet minimálního množství spalín	39
6.2.1. Koncentrace CO	40
6.3. Tepelné ztráty a účinnost	40
7. Spalovací zkouška	43
7.1. Použité přístroje	43
7.2. Postup měření	45
7.3. Vstupní hodnoty a výpočet účinnosti kotle.....	59
7.3.1. Prvkový rozbor	59
7.3.2. Vzorový výpočet účinnosti	60
7.3.3. Účinnost kotle.....	66
Závěr	68
Seznam použitých zdrojů	69
Seznam použitých zkratk a symbolů	71
Seznam obrázků	74
Seznam tabulek	76

Úvod

V dnešní době spotřeba energií každým rokem roste. Je to způsobeno především moderními technologiemi a nárůstem počtu spotřebičů. Lidé si dopřávají komfort. Způsobů jak získávat energii je mnoho, zejména z fosilních paliv (ropa, uhlí, zemní plyn). Jednoho dne se zdroje fosilních paliv vyčerpají, nebo se dostanou na minimum, kdy už nebudou schopny pokrýt lidský komfort. Mimo toho, si lidstvo pomalu začíná uvědomovat své činy a jejich dopad na životní prostředí, a díky tomu se do popředí dostává energie z obnovitelných zdrojů. Procento podílu obnovitelných zdrojů na světové produkci energie díky tomu postupně roste. Ve spojitosti s obnovitelnými zdroji energie se velmi často setkáváme s pojmem biomasa. Pod pojmem biomasa si někteří lidé představí dřevní zbytky, rostliny, zbytky z rostlin z domácností. Mají tak jen částečnou pravdu jestliže považují biomasu pouze za odpad. Je to odpad, který navíc lze měnit na elektrickou i tepelnou energii.

Ve většině případů, než se z biomasy získá energie, je nutno ji vhodně mechanicky zpracovat. Po mechanickém zpracování se z biomasy stává plně hodnotné palivo, zejména pelety (brikety), které jsou hlavní náplní této práce. Práce si klade za cíl pojednávat o dřevních i nedřevních peletách (alternativní pelety nebo rostlinné), bude se věnovat jejich specifickým vlastnostem. V rámci této bakalářské práce se budeme věnovat pouze peletám pro maloodběratele neboli domácnosti. Pelety pro maloodběratele jsou pod dohledem normy, která stanovuje limitní hodnoty daných tříd pelet. Výňatkům z normy a třídami pelet je věnována kapitola.

Způsob jak získat energii již z mechanicky upravené biomasy, je její spálení. K tomu jsou určeny speciální kotle na biomasu. Práce se bude věnovat technologiím automatických kotlů na pelety. Jsou zde podrobně popsány typy spalovacích prostorů (hořáků) takového kotle a způsoby, jakými si kotel bere palivo ze zásobníku. Většina těchto kotlů jsou automatizovány tak, aby člověku ubíraly na komfortu minimálně, a to když kotel čistí nebo jen plní zásobník, ze kterého si kotel sám bere požadovanou dávku paliva.

Poslední část práce se bude zabývat měřením vlastností zkoušených pelet a švestkových pecek a bude zakončena spalovací zkouškou. Výsledkem bude porovnání paliv z hlediska uvolněných emisí a účinnosti kotle.

1. Paliva

„Palivo je obecně každá látka, jejímž spalováním se za hospodářsky a hygienicky přijatelných podmínek uvolňuje teplo. Síru, hořčík, hliník a jiné podobné látky za paliva nepovažujeme, ačkoliv jejich spalováním vzniká teplo, neboť nevyhovují uvedené definici.“ [1]

Z definice vyplývá, že se jedná o látku, která je schopna za určitých podmínek udržovat chemickou reakci uvolňující teplo. Takových látek je velké množství, proto je nutné je správně rozlišit do jednotlivých skupin, což je umožněno normou[2].

1.1. Rozdělení paliv

1.1.1. Rozdělení podle skupenství

Paliva jsou dělena podle tří základních skupenství[3]:

- tuhá (dřevo, uhlí, koks, pelety)
- kapalná (benzín, nafta)
- plynná (zemní plyn, vodík, koksárenský plyn)

1.1.2. Rozdělení podle původu

Paliva dělíme podle původu[3]:

- fosilní – těžené palivo, nelze jej obnovit (uhlí, ropa, zemní plyn)
- obnovitelné – biomasa
- odpadní – vedlejší produkt lidské činnosti (odpadní plyny, komunální a průmyslové odpady, kaly z čistíren odpadních vod)

1.2. Požadavky na paliva

Mezi základní požadavky patří[1,4]:

- nízká cena, dostupnost, bezpečná doprava, skladovatelnost
- vytvoření se vzduchem ideální zápalné směsi, která zanechá po shoření co nejméně mechanicky nebo chemicky škodlivých látek
- maximální obsah aktivních látek, které hořením uvolňují teplo
- minimální obsah pasivních látek nebo látek, které spalování ztěžují

2. Tuhá paliva

Složení tuhých paliv se určuje[3]:

- **hrubým rozbořem** – při němž se stanoví poměrný obsah vody (W^r) a popelovin (A^r) a určí se výhřevnost paliva a prchavá a neprchavá hořlavina
- **elementárním obsahem hořlaviny** – v němž se navíc ještě určují poměrné obsahy prvků hořlaviny

2.1. Vlastnosti tuhých paliv

2.1.1. Hrubý rozbor

Hrubý rozbor určuje poměr mezi hořlavinou (h), popelovinou (A^r) a vodou (W^r) obsažených v palivu. Platí následující vztah[3]:

$$h + A^r + W^r = 100 \% \quad (1)$$

kde index r značí, že se jedná o hmotnostní obsahy v surovém palivu.

Hrubý rozbor paliva je možné zakreslit do tabulky:

Přimísená voda	Surové palivo				
	Voda (W^r)		Popeloviny (A^r)	Hořlavina (h)	
Přítěž (balast)			Prehavý podíl		Tuhý podíl
Voda odstraněná z paliva		Bezvodé palivo (sušina)			
Produkty vzniklé spálením paliva:					
Vodní pára		Tuhé zbytky – škvára, struska, popílek		Spaliny (bez vodní páry)	

Tab. 2-1 Hrubý rozbor tuhých paliv[3]

- **voda v palivu**

Voda je obsažena ve většině tuhých paliv. Je nežádoucí - snižuje výhřevnost paliva a je zdrojem řady potíží při dopravě paliva i při samotném spalování. Voda zvětšuje objem spalin (odchází ve formě vodní páry). Při spalování pohlcuje část uvolněného tepla a snižuje spalovací teplotu, dále zvyšuje komínovou ztrátu. Při poklesu teploty spalin pod hranici rosného bodu podporuje korozi kotle. Čím je palivo geologicky starší, tím méně vázané vody obsahuje[3].

Voda je v palivu vázána různými způsoby[3]:

- **voda přimísená** – dostává se do paliva po těžbě
- **povrchová voda** – voda ulpívající na povrchu zrn paliva
- **hrubá voda** – je součástí paliva, která se odpaří volným sušením
- **hydrátová** – malá část vázaná na popeloviny
- **odkludovaná** – voda chemicky vázaná na hořlavinu
- **zbytková voda** – zůstává po odstranění hrubé vody, tzn. neodstranitelná sušením
- **veškerá voda** – celkový obsah vody povrchové, hrubé a zbytkové

Vlhkost paliva se vyjadřuje vztahem[3]:

$$W = \frac{m_v}{m_{SD} + m_v} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2)$$

kde m_{SD} [kg] hmotnost suchého dřeva
 m_v [kg] hmotnost vody

- **popelovina v palivu**

Jedná se o minerální látky (křemičitany, uhličitany, sírany a další) obsažené v tuhém palivu před jeho spálením. Spálením vzniká tuhý zbytek (popel). Dalším zdrojem mohou být nečistoty přimísené během těžby, transportu a skládkování paliva (písek, hlína, kamení)[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 měknutí (t_a), tavení (t_b) a tečení (t_c). Metoda určení těchto teplot je založená na sledování deformace volného zkušebního tělíska (dle ČSN ISO 540). Princip spočívá v ohřívání válečku nebo jehlanu o hraně 3 mm, vylisovaného 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].

Na charakteristické teploty popele má přímý vliv jeho složení:

Prvky zvyšující charakteristické teploty popele	Prvky snižující charakteristické teploty popele
oxid křemičitý SiO_2	oxid železitý Fe_2O_3
oxid hlinitý Al_2O_3	oxid hořečnatý MgO
	oxid vápenatý CaO
	oxid sodný Na_2O

Tab. 2-2 Vliv prvků na charakteristické teploty[5]

- **hořlavina v palivu**

Hořlavina je část paliva, která je nositelem tepla uvolněného spalováním. U tuhých a kapalných paliv sestává hořlavina z pěti prvků: uhlíku, vodíku, síry, dusíku a kyslíku. Uhlík, vodík a síra jsou aktivní prvky hořlaviny, neboť jejich oxidací se uvolňuje teplo.[3]

Nežádoucí je obsah síry v palivu, protože zvyšuje obsah SO_2 ve spalinách, výrazně zvyšuje rosný bod spalin a snižuje charakteristické teploty popele.[5]

Důležitou vlastností paliv je prchavá hořlavina. Je to část hořlaviny, která se uvolňuje při začátku spalování a v podstatě napomáhá vznícování paliva v ohništi a stabilizuje spalovací proces[3].

2.1.2. Spalné teplo paliva

Spalné teplo Q_s [kJ/kg] je teplo uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na 20 °C, přičemž voda ve spalinách zkondenzuje, tj. je v kapalně fázi. Spalné teplo se určuje laboratorně za použití kalorimetru, kde se 1 kg paliva spálí v kyslíkové atmosféře o tlaku asi 2,5 MPa v kalorimetrické bombě ponořené ve vodní lázni[3].

Měření spalného tepla bude dále popsáno v kapitole 5.

2.1.3. Výhřevnost paliva

Výhřevnost Q_i [$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$] je teplo uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na $20\text{ }^\circ\text{C}$, přičemž voda ve spalinách na rozdíl od spalného tepla zůstane v plynné fázi[3].

Výhřevnost se určuje ze změřeného spalného tepla výpočtem[3]:

$$Q_i^r = Q_s - r \cdot (W^r + 8,94 \cdot H_2) \quad [\text{kJ/kg}] \quad (3)$$

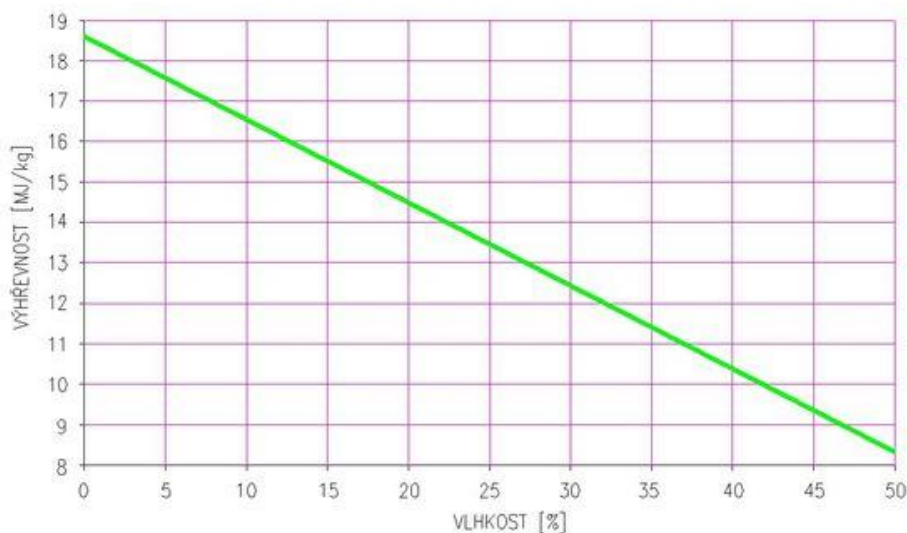
kde W^r [-] obsah vody v palivu
 r [kJ/kg] výparné teplo vody, $r = 2454\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
 H_2 [-] obsah vodíku v surovém palivu

Pro směsi různých paliv (tuhých nebo tuhých a kapalných paliv), v praxi často spalovaných, je výhřevnost celé směsi[3]:

$$Q_i^r = Q_{i1}^r m_1 + Q_{i2}^r m_2 + \dots + Q_{in}^r m_n \quad [\text{kJ/kg}] \quad (4)$$

kde m_n [-] hmotnostní podíl n-tého paliva $\sum m_n = 1$
 Q_{in}^r [kJ/kg] výhřevnost dílčího paliva

Výhřevnost paliva silně závisí na obsahu vlhkosti. Znázornění závislosti výhřevnosti na obsahu vody zobrazuje obr. 2-1:



Obr. 2-1 Závislost výhřevnosti paliva na vlhkosti[6]

3. Biomasa

Pod pojmem biomasa si představujeme veškerý organický materiál na Zemi, který se účastní koloběhu živin v biosféře. Jsou to především těla všech organismů, živých i mrtvých, od největších druhů až po mikroskopické (živočichů, rostlin, hub, bakterií a sinic)[7].

Z hlediska energetického je důležitá pouze biomasa, která je energeticky využitelná (dřevní odpad, zemědělský odpad, sláma). Teoreticky je možné získávat energii ze všech forem biomasy, jelikož základem veškeré živé hmoty je uhlík a jeho chemické vazby obsahující energii[8].

Za energetickou biomasu jsou však většinou považovány rostliny. Ty využívají slunečního záření k fotosyntéze, při které je využito jednoduchých anorganických látek (oxid uhličitý) a vody k tvorbě energeticky bohatých sloučenin (cukry). Jinak řečeno, v rostlinách je akumulována energie slunečního záření. Tato akumulace se vyznačuje poměrně nízkou účinností, na druhou stranu je dlouhodobá a disponuje v podstatě nulovými ztrátami[8].

Výhody	Nevýhody
využití odpadu	účinnost při výrobě elektřiny
dostupnost technologií pro spalování	v některých případech nutná úprava paliva
vyrovnaná bilance oxidu uhličitého	náklady na některé typy úpravy
energie je stále dostupná	náklady na dopravu
možnosti úpravy paliva	nutnost skladovacích prostor
možnost využití v domácnostech	výroba není bez emisí

Tab. 3-1 Výhody a nevýhody biomasy[8]

3.1. Získávání energie z biomasy

Spalování biomasy je nejstarší formou získávání energie. Jedná se o termochemický proces, při kterém dochází k rozkladu organického materiálu na hořlavé plyny a další látky, a následně za přítomnosti vzduchu k oxidaci, při které se uvolňuje oxid uhličitý, voda a teplo (jehož množství závisí na výhřevnosti použitého paliva). Na rozdíl od fosilních paliv má spalování biomasy v podstatě nulovou bilanci oxidu uhličitého, který patří mezi skleníkové plyny. Množství uvolněného plynu do ovzduší je přibližně stejné jako množství, které rostliny během svého života spotřebují při fotosyntéze[8].

Jedná se o poměrně složité palivo, jelikož podíl těkavé látky je velmi vysoký a vzniklé plyny jsou charakteristické různými spalovacími teplotami, často se stává, že hoří pouze část paliva. Podmínkou pro dokonalé spalování je vysoká teplota a účinné promísení se vzduchem a dostatečný prostor.[8].

Pro energetické využití biomasy se dřevo štěpkuje, piliny se lisují do briket či pelet. Sláma se používá jak obilná, tak z olejnin. Lze využít i rychle rostoucí topoly, vrby, olše, akát apod. Převážně je biomasa používána jako zdroj tepelné energie v domácnostech jako dřevo nebo ve formě pelet či briket[9].

3.2. Rozdělení biomasy

Podle normy ČSN EN ISO 17225-1 dělíme biomasu na dřevní, bylinnou, ovocnou, vodní, směsnou biomasu[10]:

- **Dřevní biomasa**

Patří sem dřevo z lesů, parků, zahrad a plantáží s rychle rostoucími dřevinami a rychle rostoucí dřeviny.

V další skupině dřevní biomasy jsou klasifikovány vedlejší produkty a dřevní zbytky z dřevozpracujícího průmyslu. Těmito biopalivy mohou být chemicky neupravené dřevní zbytky (zbytky z odkornění, řezání nebo zmenšení velikosti, tvarování stromů, lisování) nebo chemicky upravené dřevní zbytky ze zpracování dřeva a výroby desek a nábytku (upravené lepidlem, barvou, lakem nebo jinak upravené dřevo), pokud neobsahují těžké kovy nebo halogenované organické sloučeniny.

Dále sem patří použité dřevo, které zahrnuje dřevní odpad od zákazníků/společností (například palety, transportní bedny, krabice, dřevěné obaly, stavební dřevo).

- **Bylinná biomasa**

Materiál, který pochází přímo z pole i po skladování a může být upraven pouze zmenšením velikosti částic, včetně sušení. Zahrnuje bylinný materiál ze zemědělských a zahradních polí a ze zahrad a parků.

Patří sem i jakýkoliv materiál bylinné biomasy, který zůstal po průmyslové manipulaci a úpravě. Příkladem jsou zbytky z výroby cukru z cukrové řepy a zbytky z ječného skladu z výroby piva a surové zeleninové zbytky z potravinářského průmyslu.



Obr. 3-1 Ječmen[11]



Obr. 3-2 Cukrová řepa[12]

- **Ovocná biomasa**

Ovoce ze sadů a zahradnictví - v této skupině je klasifikováno ovoce ze stromů a křovin a plody z bylin (např. rajčata a hrozny)

V další skupině je zahrnut materiál ovocné biomasy, který zůstane po průmyslové manipulaci a úpravě. Příkladem jsou vylisované zbytky z výroby olivového oleje nebo jablečného džusu a zpracované (např. zahřáté, sterilizované, vařené atd.) zeleninové zbytky z potravinářského průmyslu.

- **Vodní biomasa**

Vodní biomasa je rozdělena na následující hlavní druhy: řasa, vodní hyacint, jezerní a mořská řasa.

- **Směsná biomasa**

Zahrnují homogenní směsi a směsi z různých druhů biomasy uvedených výše. Mísení může být buď úmyslné (homogenní směsi), nebo neúmyslné (směsi).

3.3. Mechanická úprava dřevní biomasy

Mechanickými procesy se biomasa upravuje do před finální nebo finální podoby. Usnadněna je především přeprava biomasy i její následné využití na získání energie. Je ovšem nutno podotknout, že přeprava biomasy na delší vzdálenosti je ekonomicky neefektivní. Mezi mechanické úpravy patří řezání pro zpracování dřeva na řezivo a palivo, drcení, které slouží především jako předstupeň výroby briket a pelet. Štěpkování a lisování briket, resp. pelet, kdy jsou následně tyto produkty využívány především pro výrobu tepla a elektřiny. Poslední možností mechanické úpravy je lisování oleje, který je následně proměněn na metylester[8].



Obr. 3-3 Dřevní brikety válcové[13]



Obr. 3-4 Dřevní štěpka[14]

3.4. Pelety z biomasy

Pelety patří mezi nejušlechtlejší dřevní palivo. Mají nízký obsah vody (okolo 10 %), vysokou výhřevnost (do 18,5 MJ/kg), nízký obsah popelovin, snadno se s nimi manipuluje a jejich spalování probíhá s minimálními negativními účinky na životní prostředí. S jednoduchou distribucí ke konečným uživatelům a s moderními technologickými zařízeními pelety úspěšně konkurují fosilním palivům a ostatním formám biomasy[15].

Tedy mezi výhody patří[15]:

- na rozdíl od fosilních paliv se jedná o obnovitelný zdroj energie pro vytápění
- vysoká výhřevnost (do 18,5 MJ/kg)
- nízký obsah popelovin (0,5 až 1 %)
- nízký obsah vody (kolem 10 %)
- nízké nároky na skladovací prostory dané vysokou objemovou hmotností)
- přijatelná cena za vyrobenou jednotku tepla v důsledku vysoké účinnosti
- možnost automatizace procesů spalování
- nízký obsah emisí
- perspektivní standardní ekologické palivo
- vedle kvalitních dřevních pelet, které jsou nejrozšířenější, se mohou vyrábět i ze slámy, sena, energetických rostlin a zemědělských zbytků
- jejich popel lze využít jako ekologické zahradní hnojivo
- k vytápění průměrného domu je ročně zapotřebí pouze 4-5 tun pelet

Pelety můžeme rozdělovat v zásadě podle použitých materiálů na jejich výrobu a lze je vyrábět z následujících materiálů[15]:

- z měkkého dřeva z čistých suchých hoblovaček
- z čisté směsi vlhkých katrových pilin z měkkého i tvrdého dřeva
- z kůry stromů
- z lesní štěpky
- z rychle rostoucích dřevin (například topol)
- ze stébelnin (například šťovík, křídlatka, chrastice, len, konopí)
- ze slámy
- z chemicky ošetřených dřevních zbytků
- z chemicky neošetřených dřevních zbytků
- ze směsí výše uvedených

Nejčastěji používaným materiálem na výrobu pelet jsou dřevěné piliny, které se za vysokého tlaku lisují na protlačovacích matricových lisech. Vlivem tlaku se piliny zahřejí, přičemž se uvolňuje lignin, který tvoří spolu s přídatným organickým pojivem (např. do 2 % melasy, kukuřičné mouky) pojivo udržující peletu po vychladnutí v požadovaném tvaru a zároveň zabraňuje jejímu rozdrolení při manipulaci. Lignin dále na povrchu vytvoří tvrdý průsvitný povlak, který zabraňuje vnikání vlhkosti do pelet při jejich skladování[15].



Obr. 3-5 Pelety z řepkové slámy[16]



Obr. 3-6 Pelety ze slunečnice[16]



Obr. 3-7 Pelety ze šťovíku[16]



Obr. 3-8 Pelety ze sena[16]

3.5. Dřevní pelety a jejich vlastnosti

Dřevní peleta je slisované biopalivo vyrobené z práškové dřevní biomasy s přísadami nebo bez přísad, obvykle válcovitého tvaru, průměrné délky běžně 5 mm až 40 mm a průměru do 25 mm a s ulámanými konci[10]. Tolik o dřevní peletě říká norma, dále budou popsány vybrané vlastnosti.



Obr. 3-9 Dřevěné pelety bez kůry[16]



Obr. 3-10 Dřevěné pelety s kůrou[16]

- **Zdroj**

Zdroj je parametr, který předurčuje kvalitu pelety. Materiály na výrobu pelet jsou popsány v kapitole 3.4. U pelet je podstatný obsah ligninu, který je důležitým stavebním prvkem dřevní hmoty. Vyznačuje se vysokou výhřevností (až 27 MJ/kg), je termoplastický a není nasákový. K jeho plastizaci dojde, jak již bylo řečeno, při prudkém stlačení a zahřátí pilin (peletizace). Lignin se uvolňuje z dřevní hmoty a po zchlazení zatuhne a vytvoří na povrchu lesklou ochrannou slupku, která propůjčuje peletě pevnost, a chrání ji před atmosférickou vlhkostí. Rozklad ligninu se děje nad 150 °C, projevuje se to zhnědnutím dřevní hmoty. Proto mají některé pelety tmavou barvu, která nemusí znamenat příměs kůry, ale může být způsobena právě přehřátím piliny při sušení nebo zapečením v matici v případě, že dochází při lisování k extrémnímu tření. Tvrdé dřevo listnatých stromů obsahuje asi 20 % ligninu, zatímco jehličnaté měkké dřevo kolem 30 %. Kromě ligninu jehličnaté dřevo obsahuje také více výhřevných pryskyřic (až 36 MJ/kg), a proto je i toto dřevo výhřevnější. Vedle toho je méně náročné na zpracování a slisování[17].

Pokud se jedná o čistou dřevní hmotu bez kůry, mají tyto pelety nízký obsah popela, který má vysokou teplotu tavení, a proto jsou ideálním palivem pro většinu peletových kotlů. Takovým peletám se říká *čisté* nebo *premium*[17].

Přidáváním kůry, jehličí, listí, vznikne peleta tzv. katrová, která je na pohled tmavší. Taková peleta má větší popelnatost a v hořácích se spéká díky její nižší teplotě tavení popela. Většina malých peletových hořáků má s takou peletou problém, protože se může zapéct (ucpat napečenci). Na následující obrázku lze vidět ucpaný rošt malého peletového hořáku napečenci po spalování pelet s příměsí jehličí. Škvára vyjmutá ze zmíněného roštu je viditelná na obrázku 3-12[17].



Obr. 3-11 Ucpaný rošt



Obr. 3-12 Škvára

- **Rozměry**

Rozeř je nejvíce viditelná vlastnost pelet. Bavíme-li se o hodnotě průměru, 25 mm je hranice, kdy se z pelety stává briketa. Průměr pelet je tedy definován mezi 6 až 25 mm, s tolerancí jednoho milimetru, a je dán průměrem kanálku v matrici lisu[17].

Délka pelet už není tak jednoznačná. Maximální délka pelet závisí na nastavení odřezávacích nožů na výstupu z matrice. Velká část pelet se ale dále rozlomí na několik kousků. Důvodem může být například: množství pojiva, vhodná volba dimenze kanálků pro danou surovinu, kvalita zchlazení čerstvě vyliisovaných pelet. Proto se bavíme o maximálním a minimálním rozměru délky. Minimální rozměr pelet se stanovuje na 3,15 mm. Pelety pod zmíněnou hranicí délky rozumíme jako jemné částice. Pelet delších než maximální rozměr (40 resp. 50 mm) může být do 5 % [17].

Průměr i délka pelety jsou důležité především pro volbu vhodného spalovacího zdroje i způsobu dopravy a skladování. Čím je menší zdroj (kotel), tím menší jsou rozměry pelety. Také je důležité, aby kvůli délce pelet nevznikaly komplikace při dopravě paliva ze zásobníku do hořáků[17].

- **Obsah vody**

Vlhkost pelety je dána technologií její výroby. Vstupní surovina je před lisováním vysušena na vlhkost 12 až 14 %. Před samotným dávkováním do peletovacího lisu je surovina povrchově lehce navlhčena, ale při samotném lisování přes matrici se značně zahřeje, takže obsah vody se opět sníží a neměl by přesahovat 10 %. Peleta, která je vyrobena při nedodržení těchto podmínek (někdy se šetří na sušení a vlhčí pilina se lépe lisuje), je považována za nekvalitní peletu. Ztrácí svou pevnost a reaguje na vlhkost z okolního vzduchu. Existuje možnost provést kontrolu kvality pelety. Princip spočívá v tom, že kvalitní peleta, o hustotě vyšší jak 1100 kg/m^3 , by měla po vhození do sklenice s vodou klesnout na dno a až po určité době se začít rozpadat. Nekvalitní peleta začíná okamžitě bobtnat a rozpadat se již při klesání na dno[17].

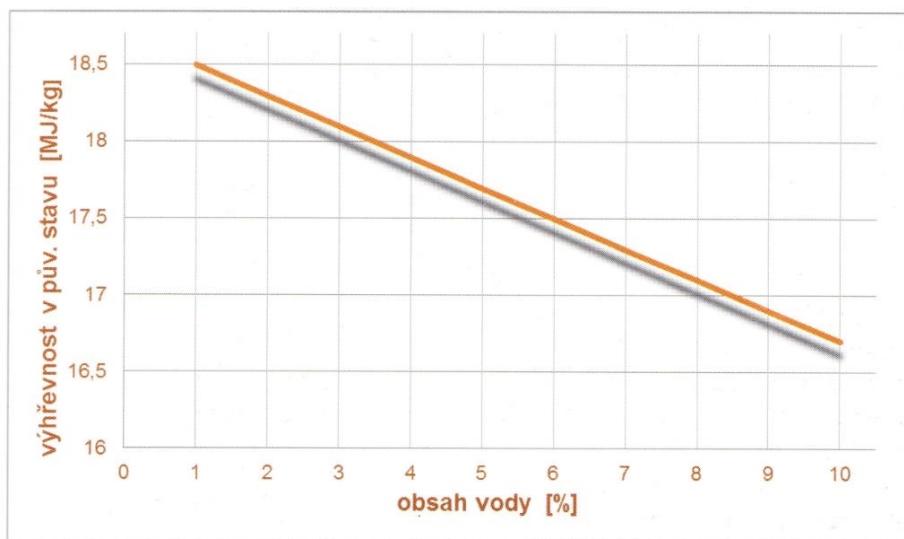
- **Obsah popela**

Dřevní biomasa má oproti ostatní biomase nízký obsah popelovin. U čisté dřevní hmoty se pohybuje mezi 0,3 až 0,5 %, u kůry okolo 3 % a u zbytků po těžbě dřeva i 5 %. Vyšší hodnoty mohou u dřevní hmoty signalizovat větší znečištění např. barvou, lepidly, hlinou a pískem. Výsledný popel u pelety je tedy dán zdrojem vstupní suroviny[17].

Jestliže je u pelet obsah popelovin vyšší než 1,5 %, může to již znamenat problémy při spalování v malých topeništích. Relativně malé rošty se mohou rychle zanést popelem, čímž se omezí přístup primárního spalovacího vzduchu. Následkem je pak zhoršení kvality spalování, přinejhorším dojde k zastavení samotného spalovacího procesu. Metoda stanovení popeloviny je popsána v kapitole 5[17].

- **Výhřevnost**

Reálná výhřevnost dřevní hmoty je závislá vedle kvality zdroje suroviny především na obsahu vody v ní. Obecně platí, že se vzrůstající vlhkostí reálná výhřevnost klesá. V grafu je znázorněna závislost výhřevnosti běžných dřevních pelet na obsahu vody[17].



Obr. 3-13 Závislost výhřevnosti běžných dřevních pelet na obsahu vody[17]

Každé palivo obsahuje hořlavé a nehořlavé složky. Mezi hořlavé složky řadíme u dřevní biomasy uhlík, vodík a síru[17].

3.5.1. Norma pro pelety

Pro specifikaci vlastností tuhých paliv bylo vydáno šest klasifikačních norem řady ČSN EN ISO 17225. Norma ISO 17225-2 klasifikuje vlastnosti dřevních pelet. Vztahuje se na veškeré pelety ze dřeva. Norma obsahuje následující tabulku, kde[10]:

- **Třída A1 – Pelety nejvyšší kvality, používané výhradně v domácnostech**

Pelety třídy A1 mohou být vyrobeny pouze z čistého kmenového dříví nebo chemicky neošetřených dřevních zbytků. Přítomnost kůry je limitována maximálním objemem popela do 0,7 % a obsahem dusíku do 0,3%. Spadají sem primárně čisté světlé pelety, vyrobené především z měkkých pilin. Jsou charakteristické tím, že při jejich spalování vzniká minimum jemného popela, který se vůbec nespéká. Většina kamen a kotlů vyžaduje pelety této kvality. Cenově jsou náročnější.

- **Třída A2 – Pelety spalované ve větších kotlích, již může být přítomna kůra**

Pelety třídy A2 mohou být vyrobeny z kmenového dříví, z celých stromů bez kořenů, chemicky neošetřených zbytků a zbytků po těžbě dřeva. Množství méně kvalitních přísad je

omezeno maximálním objemem popela do 1,2 % a obsahem dusíku do 0,5 %. Při spalování vzniká znatelně větší množství popela, který se na roštu již zapéká.

- **Třída B – pelety pro průmyslové využití**

Pelety kategorie B mohou být vyrobeny z jakékoliv dřevní biomasy. Jako suroviny mohou být použity také chemicky ošetřené dřevní zbytky (pilina z nábytkářského průmyslu, dřevotřísky...) nebo stavební dřevo. Nesmí obsahovat těžké kovy nebo halogenované organické sloučeniny. Pelety z dřevotřísky mají menší mechanickou odolnost a velké množství popela, který se dosti spéká.

	Třída vlastností Zkušební metoda	Jednotka	A1	A2	B
Normativní	Původ a zdroj ISO 17225-1		1.1.3 Kmenové dřevo 1.2.1 Chemicky neupravené dřevní zbytky	1.1.1 Celé stromy bez kořenů 1.1.3 Kmenové dřevo 1.1.4 Zbytky po těžbě dřeva 1.2.1 Chemicky neupravené dřevní zbytky	1.1 Lesní, plantážové a jiné původní dřevo 1.2 Vedlejší produkty a zbytky z dřevozpracuj ícího průmyslu 1.3.1 Chemicky neupravené použité dřevo
	Průměr, D a délka, L	mm	D06, 6 ± 1; 3,15 < L ≤ 40 D08, 8 ± 1; 3,15 ≤ L ≤ 40	D06, 6 ± 1; 3,15 < L ≤ 40 D08, 8 ± 1; 3,15 ≤ L ≤ 40	D06, 6 ± 1; 3,15 < L ≤ 40 D08, 8 ± 1; 3,15 ≤ L ≤ 40
	Voda, M ISO 18134-1 ISO 18134-1	w-%, původní	M10 ≤ 10	M10 ≤ 10	M10 ≤ 10
	Popel, A, ISO 181122	w-%, bezvodý	A0.7 ≤ 0,7	A1.2 ≤ 1,2	A2.0 ≤ 2,0
	Mechanická odolnost, DU ISO 17831-1	w-%, původní	DU97.5 ≥ 97,5	DU97.5 ≥ 97,5	DU96.5 ≥ 96,5
	Jemné částice, F ISO 18846	w-%, původní	F1.0 ≤ 1,0	F1.0 ≤ 1,0	F1.0 ≤ 1,0
	Prísady	w-%, bezvodý	≤ 2 w-% Uvede se typ a množství	≤ 2 w-% Uvede se typ a množství	≤ 2 w-% Uvede se typ a množství
	Výhřevnost, Q ISO 18125	MJ/kg nebo kWh/kg, původní	Q16.5 ≥ 16,5 nebo Q4.6 ≥ 4,6	Q16.5 ≥ 16,5 nebo Q4.6 ≥ 4,6	Q16.5 ≥ 16,5 nebo Q4.6 ≥ 4,6

	Sypná hmotnost, BD ISO 17828	kg/m ³	BD600 ≥ 600	BD600 ≥ 600	BD600 ≥ 600
	Dusík, N, ISO 16946	w-%, bezvodý	N0.3 ≤ 0,3	N0.5 ≤ 0,5	N1.0 ≤ 1,0
	Síra, S, ISO 16994	w-%, bezvodý	S0.04 ≤ 0,04	S0.05 ≤ 0,05	S0.05 ≤ 0,05
	Chlor, Cl, ISO 16994	w-%, bezvodý	Cl0.02 ≤ 0,02	Cl0.02 ≤ 0,02	Cl0.03 ≤ 0,03
	Arsen, As, ISO 16968	mg/kg, bezvodý	≤ 1	≤ 1	≤ 1
	Kadmium, Cd, ISO 16968	mg/kg, bezvodý	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5
	Chrom, Cr, ISO 16968	mg/kg, bezvodý	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	Měď, Cu, ISO 16968	mg/kg, bezvodý	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	Olovo, Pb, ISO 16968	mg/kg, bezvodý	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	Rtuť, Hg, ISO 16968	mg/kg, bezvodý	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1
	Nikl, Ni, ISO 16968	mg/kg, bezvodý	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	Zinek, Zn, ISO 16968	mg/kg, bezvodý	≤ 100	≤ 100	≤ 100
	Informativní	Teplota tavitelnosti popela CEN/TS 15370-1	°C	Měla by se uvést.	Měla by se uvést.

Tab. 3-2 Specifikace tříděných dřevních pelet pro maloodběratele[10]

3.5.2. Porovnání pelet z tvrdého a měkkého dřeva

Výhřevnost všech druhů dřevní biomasy je přibližně stejná, protože její prvkové složení je přibližně stejné a závisí především na vlhkosti suroviny. Jestliže mluvíme o surovém dřevu, porovnáme buk a smrk. Všeobecně rozšířený názor, že bukové dřevo má větší výhřevnost než smrkové, je dán rozdílnou hustotou těchto dřevin. Ve skutečnosti je ale smrkové dřevo díky vyššímu obsahu pryskyřic výhřevnější. Vzhledem k hustotě smrkového dřeva, která je až o třetinu nižší, bude prostorový metr bukového dřeva výhřevnější než stejný objem dřeva smrkového. V porovnání na váhu však budou mít přibližně stejné množství energie (tepla/J) na kilogram. U pelety to ale neplatí, protože ta představuje vysoce komprimovanou dřevní hmotu a zde se již projevuje vyšší výhřevnost smrkového dřeva, které se i díky vyššímu obsahu ligninu lépe lisuje.[18].

Výroba dřevních pelet začíná z pilin a bez ohledu na to, či jsou piliny z tvrdého dřeva, měkkého dřeva nebo ze směsi těchto dvou druhů, budou všechny po kompresi na stejné velké hustotě. A právě tam mizí rozdíl hustot, o kterém bylo pojednááno.

3.6. Alternativní pelety

Vyrábí se lisováním rostlin nebo jejich částí a dále se dělí na[19]:

- **Agropelety**

vyrábí se lisováním zemědělských zbytků (energetických rostlin, řepkové slámy, obilné slámy, odpadů po čištění obilnin a olejnin, sena apod.). Mezi agropelety řadíme i pokrutiny, které vznikají při lisování řepkového a slunečnicového oleje

- **Ostatní**

vyrábí se lisováním různých druhů materiálů, jinak obtížně využitelných (např. starý drcený papír, uhelný prach), tyto materiály lze případně smíchat s uvedenými zemědělskými komoditami.

Spalování alternativních pelet vyžaduje kotel k tomu určený. Není možné je spalovat v kotlích určených pouze pro dřevní pelety. Při spalování alternativních pelet v kotlích na dřevní pelety dochází po pár hodinách provozu k zapékání hořáku. Je třeba ale zdůraznit, že ani speciální kotel na alternativní pelety někdy nedokáže zaručit plně automatický provoz za použití nekvalitních alternativních pelet. Takové pelety nižší kvality, vyráběné za účelem spalování v elektrárnách a velkých kotelnách, mohou zákazníkům způsobit značné potíže[19].

Hlavní výhodou alternativních pelet je, že surovina pro jejich výrobu nemá skoro žádné využití, maximálně do kompostu.

3.6.1. Porovnání parametrů dřevních a alternativních pelet

Pro názornost byla sestavena tabulka:

Druh	Dřevní pelety	Alternativní pelety
Výhřevnost	17,5 až 19,5 MJ/kg	15 až 18 MJ/kg
Měrná hmotnost	1,0 až 1,4 t/m ³	0,9 až 1,2 t/m ³
Sypná hmotnost	0,6 až 0,8 t/m ³	0,55 až 0,75 t/m ³
Popelnatost	0,5 až 2,5 %	1,0 až 9,0 %

Tab. 3-3 Parametry dřevních a alternativních pelet[19]

4. Automatické kotle na pelety

V dnešní době jsou automatické kotle na pelety stále zdokonalovány. Svou oblíbenost získaly především díky snadné obsluze, která je moderními technologiemi stále vylepšována. S jednoduchou obsluhou lze díky těmto technologiím spojit i vysokou účinnost. Na provoz takového kotle tak pouze dohlížíme a prakticky vůbec nemusíme zasahovat.[20]

Moderní kotle na spalování pelet používají systém kontinuálního přívodu paliva do ohniště. Ve většině případů se jedná o dopravu pomocí šnekových dopravníků. Automatická doprava paliva do kotle zajišťuje stabilitu spalovacího procesu, stabilitu požadovaného výkonu, vysokou účinnost spalování, nízkou produkci škodlivin a komfort pro uživatele. Automatické kotle na pelety pro ústřední vytápění mohou využívat jak spalování na roštu, tak speciálních hořáků či hořákového provedení spalovací komory, dále spodního přívodu paliva nebo zplyňování.[21]

Dřevní pelety se odebírají automatickým dopravníkem podle potřeby ze zásobníku. Objem zásobníku výrobci kotlů dimenzují tak, aby na jedno naplnění pojmul množství pelet k vytápění na určitou dobu, která se pohybuje od jednoho dne až do jednoho týdne i více. Do tohoto zásobníku se pelety naplňují buď ručně, nebo automaticky, např. pomocí šnekového dopravníku ze skladu pelet.[21]

4.1. Peletový hořák

Je jedna z nejdůležitějších součástí kotle na pelety, jeho konstrukce ovlivňuje spotřebu paliva, účinnost zařízení, trvanlivost, tvorbu emisí a také se od něj obvykle odvíjí celková cena zařízení. Pro snadnější údržbu a servis lze obecně doporučit peletové kotle se snadnou výměnou a přístupem k hořáku. Moderní automatické peletové kotle a hořáky nabízejí standardně kontinuální spalování pelet.[22]

Podle normy ČSN EN 15270 je hořák zařízení spalující pelety, jehož řízení může být různého typu: dvoupolohové, mechanické, spojité nebo víceúrovňové, pelety mohou být dávkovány vodorovně, shora nebo zdola[23].

Rozhodujícím kritériem odlišnosti peletových hořáků je způsob, jakým je v nich vytvářena základní vrstva paliva, a jak je k ní přiváděn primární spalovací vzduch. Základní vrstva paliva je množství nahořelého paliva, které umožní bezpečné zapálení paliva nově přivedeného. Mluvíme-li o spalování pelet, základní vrstvu tvoří na roštu nahořelé pelety, které mají v sobě ještě tolik hořlaviny, že jejich dohořením se uvolní dostatek tepla potřebného pro bezpečné zapálení nově přiložených pelet. Nové pelety se tak samy stávají základní vrstvou. Pro dohoření tuhého podílu je však nutné přivést k povrchu žhavých uhlíků ještě kyslík. Ten je dodán primárním spalovacím vzduchem. Původní základní vrstva postupně dohořívá na popel, v případě kvalitních dřevních pelet přesněji na jemný prášek. Právě způsoby přikládání nového paliva, přivedení primárního vzduchu a odvedení tuhých zbytků spalování určují limity pro využití jednotlivých konstrukcí hořáků. Je obtížné provést konkrétní přesné členění peletových hořáků, protože existuje mnoho možností, jak tyto jednotlivé „technologické uzly“ řešit a neustále se objevují způsoby nové. Navíc každý hořák představuje individuální kombinaci jednotlivých řešení[18].

Podle systému přívodu paliva rozlišujeme tři různé typy hořáků:

- **Hořák se spodním přívodem paliva**

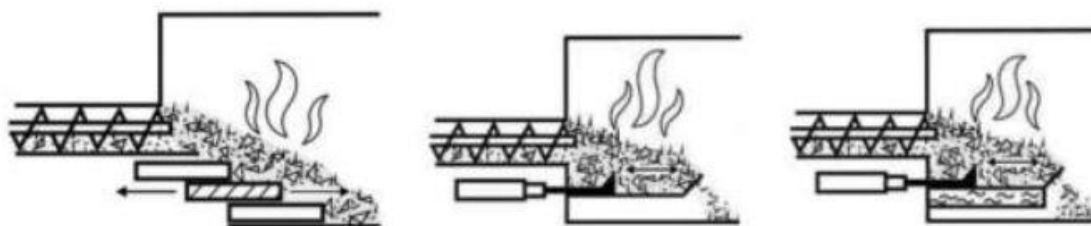
V topeništích se spodním přívodem paliva se palivo dopravuje do spalovací pánve pomocí šnekového dopravníku, který je zakončen kolenem. Primární spalovací vzduch se přivádí do spalovací pánve pomocí otvorů a postupně dochází k vysušování paliva, pyrolytickému rozkladu a zplyňování paliva. Odchozí spaliny na cestě do komína předávají teplo ve výměníku, kde se ohřívá teplotnosné médium.[21]



Obr. 4-1 Spalování se spodním přívodem paliva[21]

- **Hořák s vodorovným přívodem paliva**

Palivo je zde dodáváno ze strany. Při tomto typu topeniště se používá spalování roštové nebo bez roštové. Doprava paliva do topeniště se převážně realizuje pomocí šnekového dopravníku. Při roštových topeništích převažují systémy s pevným roštem. Při vyšších výkonech lze použít topeniště s posuvným roštem, kde se palivo posouvá pohybem roštnic vpřed a vzad. Topeniště s posuvem paliva po pevném roštu mohou být realizována jako nechlazená či chlazená vodou. Konstrukce s vodou chlazeným topeništěm jsou vhodné kromě spalování štěpky a pelet i pro spalování paliva s vysokým obsahem popela a paliva se sklonem k tvorbě škváry (obilí, zrna). Primární spalovací vzduch je vhodným způsobem přiváděn do prostoru primární zóny spalování paliva, a to buď přes rošt přírodními vzduchovými kanály, nebo tryskami. Při roštových konstrukcích splňuje primární vzduch také funkce roštové chlazení, což zmenšuje riziko tvorby škváry a přehřívání materiálu. Sekundární vzduch se přivádí do prostoru před vstupem do dohořovací komory.[21]



Obr. 4-2 Spalování s vodorovným přívodem paliva[21]

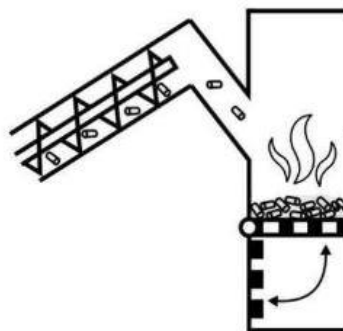
- **Hořák s horním přívodem paliva**

Topeniště se shazováním paliva byla speciálně vyvinuta pro spalování dřevních pelet. Tato konstrukce topeniště není vhodná pro spalování dřevní štěpky. Pelety se dopravují šnekovým dopravníkem do horní polohy tak, aby pelety padaly troubou nebo šachtou shora přímo do ohně. Ten se může nacházet ve vyměnitelné pánvi ohniště, na překlápěcím roštu nebo ve spalovacím tunelu. Přívod primárního a sekundárního spalovacího vzduchu je zajišťován odspodu nebo přes boční vzduchové trysky. Tento typ topeniště se používá pro malé tepelné výkony, přibližně do 30 kW. Topeniště s válcovým roštem se oproti klasickým

roštům liší v konstrukci otáčivého roštu, na kterém probíhá hoření. Palivo se automaticky sesouvá z násypky na rošt nebo je podáváno dávkovacím šnekem. Na roštu tedy hoří jen optimální množství paliva. Otáčivý pohyb roštu zajišťuje přísun paliva ze zásobníku a odvod popela. U správně nastaveného krokování roštu musí být popel odcházející do popelníku do šeda vyhořelý. Z komína by neměl vycházet tmavý kouř.[21]



Obr. 4-3 Páněvní ohniště[21]



Obr. 4-4 Překlápěcí rošt[21]

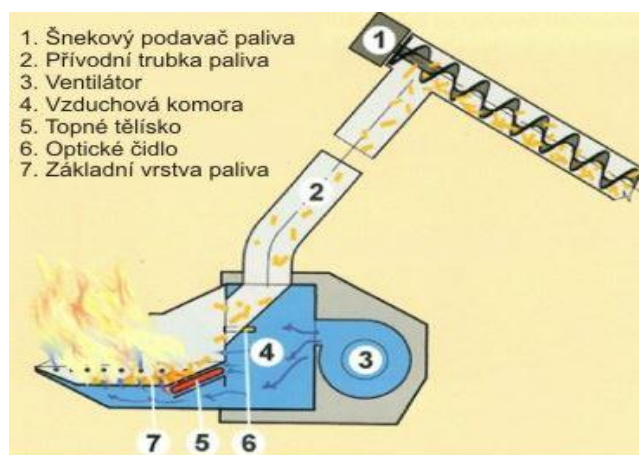
Doplňování paliva je ruční či mechanické, šnekovými popř. pásovými dopravníky. Účinnost kotlů přesahuje 80 % a svědčí o velmi dobré konstrukci a kvalitním spalování.[21]

4.2. Konstrukce a principy peletových hořáků

V této kapitole budou popsány jedny z nejpoužívanějších peletových hořáků.

4.2.1. Miskový hořák

Pravděpodobně nejrozšířenější typ hořáku. Jedna z jeho možných variant je vyobrazena níže na barevném schématu. Spalovací komora má tvar misky, do které přepadávají pelety ze šnekového dávkovače. Dno „misky“ tvoří rošt, ve kterém jsou otvory pro přívod primárního vzduchu, v bočních stěnách je několik otvorů pro přívod primárního vzduchu. Pod roštem je umístěn elektrický zapalovač, který ve fázi zapalování ohřívá obtékající vzduch. U tohoto typu hořáku se předpokládá, že vzniklý popel je primárním vzduchem „odfouknut“ ze spalovací komory. Pro jejich správnou funkci je nutné, aby jako palivo byly použity pelety kategorie A1. Tedy čisté pelety bez příměsi kůry s nízkým obsahem popelovin a vysokou teplotou popela. Pokud jsou použity pelety nižších tříd, množství popela zaplní dno komory a časem zcela zabrání přístupu primárního spalovacího vzduchu[18].



Obr. 4-5 Miskový hořák[18]

4.2.2. Retortový hořák

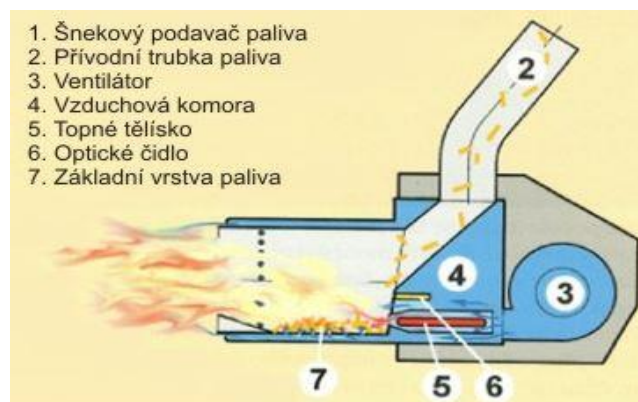
Palivo je v nich dodáváno zpočátku horizontálně šnekovým podavačem a v části hořáku zvaném retorta (má tvar kolena) mění palivo směr pohybu a je vytlačováno vertikálně vzhůru do spalovací části hořáku. S přibližováním vrstvy nového paliva k zóně spalování se postupně palivo zahřívá a začíná uvolňovat prchavou hořlavinu. Hořlavina prochází základní vrstvou paliva a po smísení se spalovacím vzduchem se nad roštem v dohořivací zóně zapálí. Vyhořelé zbytky jsou odfouknuty spalovacím vzduchem nebo vytlačeny novým palivem na kruhový rošt, který je nad retortou. Spalovací vzduch je vháněn do základní vrstvy paliva po stranách v horní části retorty a prochází jí. Kyslík nevyužitý pro vyhoření pevného podílu je již na tolik přehřátý, že se bez problémů "zapojí" do oxidace prchavého podílu hořlaviny v dohořivacím prostoru spalovací komory. Tento typ hořáku je vhodný pro spalování méně kvalitních pelet s velkým podílem popelovin a vysokou nákloností ke spékání. Popel a případná struska jsou novým palivem vytlačovány ze zóny hoření. Lze v nich proto spalovat pelety třídy A2 a B, popřípadě i pelety rostlinné[18].



Obr. 4-6 Retortový hořák[18]

4.2.3. Trubicový hořák

Podobná konstrukce jako hořák miskový, ale spalovací komora má tvar válce. Ve spodní části válce jsou opět umístěny otvory pro přívod primárního vzduchu, sekundární vzduch je pak přimícháván do plamene v ústí hořáku. V komoře pro rozdělení vzduchu je opět umístěno žhavicí tělísko, které ve fázi zapalování ohřívá vzduch, jež kolem něj obtéká a je v úzkém paprsku vháněn na přiložené pelety a vše kontroluje fotocela. U tohoto typu hořáku se opět předpokládá, že vzniklý popel je primárním vzduchem odfouknut ze spalovací komory. Nutné použít palivo třídy A1[18].



Obr. 4-7 Trubicový hořák[18]

5. Měření vlastností zkoušených paliv

K vyřešení účinnosti zkoušených paliv bylo třeba experimentálně změřit vlhkost paliva, popelovinu a výhřevnost. Na prvkový rozbor paliv posloužila databáze Phyllis2.



Obr. 5-1 Zkoušené paliva, zleva: smrkové pelety, bukové pelety, švestkové pecky

5.1. Měření vlhkosti

Vlhkost paliva má velký vliv na charakter spalování. Obecně je výhodné spalovat co nejsušší palivo díky nejlepším výsledkům účinnosti.

K měření byly použity halogenové sušící váhy KERN MLS. Tento přístroj využívá metodu termogravimetrie. Vzorek paliva je za chodu váhy vystaven záření, které proniká dovnitř vzorku a tam se transformuje na tepelnou energii. K ohřevu materiálu dochází zevnitř ven. Při této metodě se vzorek váží před zahřátím a po něm, aby se z rozdílu hmotností stanovila vlhkost zkoušeného vzorku. Teplota zahřívání byla kolem 120 °C.

Tedy přístroj pracuje podle následujícího vztahu:

$$W = \frac{m_v}{m} \cdot 100 \quad [\%] \quad (5)$$

kde m_v [g] úbytek hmotnosti při sušení navážky paliva (hmotnost vody)
 m [g] hmotnost navážky vzorku paliva



Obr. 5-2 KERN MLS

Výsledky měření jsou zaznamenány v tabulce:

Palivo	Hmotnost vzorku před sušením [g]	Hmotnost vzorku po sušení [g]	Doba měření [hh:mm:ss]	Vlhkost [%]
Smrkové pelety	28,909	26,696	0:40:20	7,652
	20,593	18,997	0:29:30	7,746
Bukové pelety	26,531	24,803	0:42:21	6,513
	24,583	22,987	0:38:24	6,492
Švestkové pecky	22,828	21,783	0:46:50	4,574
	20,262	19,431	0:38:20	4,101
	16,932	16,310	0:35:20	3,674
	21,390	20,733	0:37:55	3,081

Tab. 5-1 Výsledky měření vlhkosti

5.2. Měření popeloviny

Na začátku se čistá prázdná miska nechá vyžít v peci pod 550 °C po dobu přibližně 60 minut. Miska se vyjme a ochladí se pokojovou teplotou, poté je vložena do exsikátoru bez vysoušedla a tam se dochládí. Konečně se ochlazená miska zváží s přesností na 0,1 mg. Dalším krokem je navážení přibližně 5 g vzorku pro obecné zkoušení, který se vloží do misky a rovnoměrně rozloží a umístí do chladné pece. Vzorek se pak postupně začne pomalu nahřívat na 550 °C a je žhán na dané teplotě po dobu 6 hodin. Po uplynutí doby se miska vyjme z pece, nechá se ochladit stejným způsobem, jak bylo popsáno výše. Poté se provede zvážení misky se zbytkem vzorku s přesností 0,1 mg.



Obr. 5-3 Pec VEB ELEKTRO

Na výpočet popeloviny v původním stavu A^r [%], nám slouží vztah:

$$A^r = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \cdot 100 \quad [\%] \quad (6)$$

kde A^r [%] popelovina v původním stavu
 m_1 [g] hmotnost prázdné misky
 m_2 [g] hmotnost misky se vzorkem
 m_3 [g] hmotnost misky s popelem

Výsledky měření jsou zaznamenány v tabulce.

Vzorek	Hmotnost vzorku [g]	Hmotnost popela [g]	Popelovina [%]
Smrkové pelety	5,1812	0,0365	0,7045
	5,0451	0,0348	0,6898
	5,0450	0,0359	0,7116
Bukové pelety	4,9713	0,0191	0,3842
	5,3087	0,0195	0,3673
	5,1614	0,0172	0,3332
Švestkové pecky	5,2389	0,0270	0,5154
	5,3160	0,0329	0,6189
	5,0680	0,0333	0,6571

Tab. 5-2 Výsledky měření popeloviny

5.3. Měření výhřevnosti

Měření výhřevnosti bylo provedeno na kalorimetru IKA C 200. Kalorimetr určil hodnotu spalného tepla, která byla následně převedena na hodnotu výhřevnosti daného vzorku pomocí jednoduchého výpočtu[3]:

$$Q_i^r = Q_s - r \cdot (W + 8,94 \cdot H_2) \quad [\text{kJ/kg}] \quad (7)$$

kde	Q_i^r	[kJ/kg]	výhřevnost paliva
	Q_s	[kJ/kg]	spalné teplo paliva
	W	[-]	obsah vody v palivu
	r	[kJ/kg]	výparné teplo vody, $r = 2454$ kJ/kg
	H_2	[-]	obsah vodíku v surovém palivu

Nejprve bylo na laboratorních vahách naváženo 0,6 – 0,8 g zkoušeného vzorku. Vzorek byl pak naložen do nerezového kelímku. Kelímek byl poté umístěn na držák rozkladné nádoby. Nad držákem se nacházejí dvě elektrody, mezi nimi je žhavicí drát. Kolem žhavicího drátu bylo uvázáno suché bavlněné vlákno, které dále pokračovalo na dno nerezového kelímku. Pro zapálení vzorku je nezbytné, aby se vlákno dotýkalo vzorku. Do rozkladné nádoby bylo nalito 20 ml vody o teplotě 21 °C, následně byla sestavena a natlakovaná kyslíkem na 3 MPa. Na uzavřenou rozkladnou nádobu byl nasazen zapalovací adaptér. Bylo třeba nejdříve očistit kontakty adaptéru a rozkladné nádoby. Následně byla nádoba usazena dovnitř kalorimetru. Vnitřní nádrž kalorimetru byla naplněna 2 l vody o teplotě 21 °C, uzavřelo se velké víko kalorimetru, a konečně byl nastaven přístroj a bylo provedeno měření. Přehled měření je znázorněn v tabulce:

Palivo	Navážka vzorku [g]	Spalné teplo [MJ/kg]	Výhřevnost [MJ/kg]
Smrkové pelety	0,7570	18,3360	16,7759
	0,7670	18,3480	16,7879
Bukové pelety	0,7304	18,9050	17,4116
	0,7855	18,9920	17,4986
Švestkové pecky	0,7586	19,4280	18,0894
	0,7546	19,0360	17,6974

Tab. 5-3 Výsledky měření výhřevnosti



Obr. 5-4 Kalorimetr IKA C 200



Obr. 5-5 Držák s víkem rozkladné nádoby, k víku je zapojen zapalovací adaptér



Obr. 5-6 Nerezová miska s bavlněným vláknem



Obr. 5-7 Sestavená rozkladná nádoba[24]

5.4. Shrnutí

Hodnoty vlhkosti, popelovin a výhřevnosti byly nakonec zprůměrovány.

Palivo	Vlhkost [%]	Popelovina [%]	Výhřevnost [MJ/kg]
Smrkové pelety	7,6990	0,7019	16,7819
Bukové pelety	6,5025	0,3616	17,4551
Švestkové pecky	3,8575	0,5971	17,8934

Tab. 5-4 Shrnutí výsledků měření – vlastnosti zkoušených paliv

Z hlediska vlhkosti, švestkové pecky dosáhly nejlepších hodnot. Ani dřevěné pelety neměly nejhorší výsledky. Jejich vlhkost je přibližně rovna tři roky vysychajícímu dřevu, které je na spalování nejvhodnější. Co se objemu popela týče, lze zkoušené pelety řadit do kategorie A1 dřevních pelet pro maloodběratele. Hodnoty popelovin jsou tedy příznivé. Nejnižší výhřevnost dosáhly pelety ze smrkového dřeva, které měly zároveň nejvyšší vlhkost mezi zkoušenými vzorky. Nejvyšší výhřevnost byla naměřena u švestkových pecek. Pecky vynikají svou tvrdostí a pórovitým povrchem.

6. Výpočet účinnosti kotle

Kapitola bude zaměřena na výpočet účinnosti kotle dle normy ČSN EN 13240 pomocí nepřímé metody. Vzorce jsou uvedeny bez dosazení změřených hodnot. Vzorový výpočet je uveden v kapitole 6. [25]

6.1. Výpočet minimálního množství vzduchu

- **Minimální potřebné množství kyslíku**

Pro celkovou spotřebu kyslíku při dokonalém spalování 1 kg paliva platí vztah, při němž zahrnujeme součet dílčích potřeb jednotlivých hořlavých složek paliva.

$$V_{O_2\min} = \frac{22,39}{100} \cdot \left(\frac{C}{12,01} + \frac{H}{4,032} + \frac{S}{32,03} - \frac{O}{32} \right) \quad [m_n^3/kg] \quad (8)$$

kde C, H, S, O [-] obsah prvku v palivu

- **Minimální množství suchého vzduchu**

$$V_{SVZ\min} = \frac{100}{21} \cdot V_{O_2\min} \quad [m_n^3/kg] \quad (9)$$

- **Součinitel vlhkosti vzduchu**

Při spalování je nasáván atmosférický vzduch, který obsahuje určité množství vodní páry, jež zvětšuje objem vzduchu. Faktor vyjadřující poměrné zvětšení objemu suchého vzduchu o objem vodní páry je závislý na teplotě vzduchu a relativní vlhkosti.

$$f = 1 + \varphi \cdot \frac{p''}{p_c - \varphi \cdot p''} \quad [-] \quad (10)$$

kde φ [%] relativní vlhkost vzduchu
 p'' [Pa] absolutní tlak vodní páry na mezi sytosti pro teplotu 20 °C
 p_c [kPa] celkový absolutní tlak vlhkého vzduchu

- **Minimální množství vlhkého vzduchu**

Minimální spotřeba objemu vlhkého vzduchu je poté získána zvětšením teoretického objemu suchých spalín o objem vodní páry.

$$V_{VVZ\min} = f \cdot V_{SVZ\min} \quad [m_n^3/kg] \quad (11)$$

- **Minimální množství vlhkého vzduchu za reálných podmínek**

Všechny předešlé výpočty jsou vztaženy k nominálnímu fyzikálnímu stavu a k hmotnosti 1 kg. Je nutné přepočítat objem vzduchu za reálných podmínek pomocí stavových rovnic.

$$V_{rVVZ\min} = V_{VVZ\min} \cdot \frac{t_{ok} + 273,15}{273,15} \cdot \frac{p_{atm}}{p_{vz}} \cdot \dot{M}_{pal} \quad [m^3/kg] \quad (12)$$

kde \dot{M}_{pal} [kg/h] hmotnostní tok paliva
 p_{atm} [Pa] atmosférický tlak, ($p_{atm} = 101325$ Pa)
 p_{vz} [Pa] tlak vzduchu

6.2. Výpočet minimálního množství spalin

Počítá se obdobně jako pro vzduch. Lze určit minimální objem spalin, který vznikne spálením 1 kg paliva.

- **Minimální objem SO₂ ve spalinách**

$$V_{\text{SO}_2\text{min}} = \frac{21,89}{32,06} \cdot \frac{S}{100} \quad [\text{m}_n^3/\text{kg}] \quad (13)$$

- **Minimální objem N₂ ve spalinách**

$$V_{\text{N}_2\text{min}} = \frac{22,4}{28,016} \cdot \frac{N}{100} + 0,7805 \cdot V_{\text{SVZmin}} \quad [\text{m}_n^3/\text{kg}] \quad (14)$$

- **Minimální objem CO₂ ve spalinách**

$$V_{\text{CO}_2\text{min}} = \frac{22,26}{12,01} \cdot \frac{C}{100} + 0,03 \cdot V_{\text{SVZmin}} \quad [\text{m}_n^3/\text{kg}] \quad (15)$$

- **Minimální objem A^r ve spalinách**

$$V_{\text{A}^r\text{min}} = 0,0092 \cdot V_{\text{SVZmin}} \quad [\text{m}_n^3/\text{kg}] \quad (16)$$

- **Minimální objem suchých spalin**

$$V_{\text{SSPmin}} = V_{\text{A}^r\text{min}} + V_{\text{CO}_2\text{min}} + V_{\text{N}_2\text{min}} + V_{\text{SO}_2\text{min}} \quad [\text{m}_n^3/\text{kg}] \quad (17)$$

- **Minimální objem vodní páry**

$$V_{\text{H}_2\text{Omin}} = \frac{44,8}{4,032} \cdot \frac{H}{100} + \frac{22,4}{18,015} \cdot \frac{W}{100} + (f - 1) \cdot V_{\text{SVZmin}} \quad [\text{m}_n^3/\text{kg}] \quad (18)$$

- **Minimální objem vlhkých spalin**

$$V_{\text{VSPmin}} = V_{\text{SSPmin}} + V_{\text{H}_2\text{Omin}} \quad [\text{m}_n^3/\text{kg}] \quad (19)$$

- **Přebytek vzduchu na konci ohniště**

$$\alpha = \frac{21}{21 - \text{O}_2} \quad [-] \quad (20)$$

- **Skutečné množství vlhkých spalin**

$$V_{\text{VSPskut}} = V_{\text{VSPmin}} + (\alpha - 1) \cdot V_{\text{VVZmin}} \quad [\text{m}_n^3/\text{kg}] \quad (21)$$

- **Minimální množství vlhkých spalin za reálných podmínek**

Všechny předešlé výpočty jsou vztaženy k nominálnímu fyzikálnímu stavu a k hmotnosti 1 kg. Je nutné přepočítat objem vzduchu za reálných podmínek pomocí stavových rovnic.

$$V_{\text{VSPreal}} = V_{\text{VSPskut}} \cdot \frac{t_{\text{sp}} + 273,15}{273,15} \cdot \frac{p_{\text{atm}}}{p_{\text{sp}}} \cdot \dot{M}_{\text{pal}} \quad [\text{m}_n^3/\text{kg}] \quad (22)$$

- **Skutečný objem CO₂ ve spalinách**

Skutečný objem CO₂ za nominálních podmínek:

$$V_{\text{nCO}_2} = V_{\text{CO}_2\text{min}} + (\alpha - 1) \cdot \frac{0,03}{100} \cdot V_{\text{SVZmin}} \quad [\text{m}_n^3/\text{kg}] \quad (23)$$

Přepočet na reálné podmínky:

$$V_{rCO_2} = V_{nCO_2} \cdot \frac{t_{sp} + 273,15}{273,15} \cdot \frac{p_{atm}}{p_{sp}} \cdot \dot{M}_{pal} \quad [m^3/kg] \quad (24)$$

Přepočet na objemové koncentrace:

$$CO_2 = \frac{V_{rCO_2}}{V_{VSPreal}} \quad [%] \quad (25)$$

6.2.1. Koncentrace CO

Průměrné hodnoty složek spalín, například kyslíku (O₂), oxidu uhelnatého (CO), se získají z odečtů hodnot na přístrojích, přičemž interval měření musí být tak krátký, aby spolehlivě zachytil případné kolísání.

Průměrná hodnota oxidu uhelnatého (CO_{prum}) se spočítá aritmetickým průměrem z naměřených hodnot v průběhu doby zkoušení. Ta je zaznamenávána v [m³/mg]. Proto ji bylo třeba přepočítat na [%]. Dále se hodnota CO_{prum} přepočítá na hodnotu koncentrace CO na základě běžného obsahu kyslíku ve spalínách O_{2standardized} = 13 % (pro tuto normu) a to na základě následujících vzorců:

- **Přepočet CO_{prum} na [%]**

$$CO_{prum} = \frac{V_{CO} \cdot \rho_{CO}}{10^4} \quad [%] \quad (26)$$

kde CO_{prum} [%] průměrné množství oxidu uhelnatého
 V_{CO} [m³/mg] naměřené množství oxidu uhelnatého
 ρ_{CO} [kg/m³] hustota CO

- **Množství CO [%] ve spalínách v závislosti na množství O₂**

$$CO = CO_{prum} \cdot \frac{21 - O_{2stand}}{21 - O_{2prum}} \quad [%] \quad (27)$$

kde O_{2stand} [%] standardizované množství kyslíku (13 %)
 O_{2prum} [%] průměrné množství O₂ v průběhu měření

6.3. Tepelné ztráty a účinnost

Dle účinnosti lze krbové vložky a kamna s uzavřenou spalovací komorou řadit do jednotlivých tříd dle normy ČSN EN 13240[25]:

Třída	Spotřebiče s uzavřenými dvířky
	Mezní hodnoty třídy účinnosti [%]
Třída 1	≥ 70
Třída 2	≥ 60 > 70
Třída 3	≥ 50 < 60

Tab. 6-1 Třídy účinnosti dle normy ČSN EN 13240[25]

Nepřímá metoda výpočtu účinnosti kotle spočívá v odečtení ztrát komínem, ztrát plynným a mechanickým nedopalem od hodnoty 100 %. Tedy:

$$\eta = 100 - (q_a + q_b + q_r) \quad [\%] \quad (28)$$

kde q_a [%] poměrná ztráta citelným teplem
 q_b [%] poměrná ztráta plynným nedopalem
 q_r [%] poměrná ztráta mechanickým nedopalem

- **Poměrné ztráty citelným nedopalem**

Ztráty citelným teplem spalin:

$$Q_a = (t_{sp} - t_{ok}) \cdot \left[\left[\frac{c_{pmd} \cdot (C - C_r)}{0,536 \cdot (CO + CO_2)} \right] + \left(\frac{c_{pM_{H_2O}} \cdot 1,224 \cdot (9 \cdot H + W)}{100} \right) \right] \quad [kJ/kg] \quad (29)$$

kde t_{sp} [°C] teplota spalin na výstupu kotle
 t_{ok} [°C] teplota okolního vzduchu
 c_{pmd} [kJ/K·m³] střední měrná tepelná kapacita spalin

Poměrné ztráty citelným teplem spalin:

$$q_a = \frac{Q_a}{Q_i^r} \cdot 100 \quad [\%] \quad (30)$$

- **Poměrné ztráty plynným nedopalem**

Ztráty plynným nedopalem:

$$Q_b = \frac{12664 \cdot CO \cdot (C - C_r)}{[0,536 \cdot (CO_2 + CO) \cdot 100]} \quad [kJ/kg] \quad (31)$$

Poměrné ztráty plynným nedopalem:

$$q_b = \frac{Q_b}{Q_i^r} \cdot 100 \quad [\%] \quad (32)$$

- **Poměrné ztráty mechanickým nedopalem**

Ztráty mechanickým nedopalem:

$$Q_r = \frac{335 \cdot A^r \cdot b}{100} \quad [kJ/kg] \quad (33)$$

kde A^r [%] obsah popeloviny
 b [%] množství uhlíku obsaženého v tuhých zbytcích paliva

Poměrné ztráty mechanickým nedopalem:

$$q_r = \frac{Q_r}{Q_i^r} \cdot 100 \quad [\%] \quad (34)$$

- **Střední měrná tepelná kapacita spalin**

$$c_{pmd} = 3,6 \cdot \left[\begin{array}{l} 0,361 + 0,008 \cdot \left(\frac{t_{sp}}{1000} \right) + 0,034 \cdot \left(\frac{t_{sp}}{1000} \right)^2 \\ + \left[0,085 + 0,19 \cdot \left(\frac{t_{sp}}{1000} \right) - 0,14 \cdot \left(\frac{t_{sp}}{1000} \right)^2 \right] \cdot \frac{CO_2}{100} \\ + \left[0,03 \cdot \left(\frac{t_{sp}}{1000} \right) - 0,2 \cdot \left(\frac{t_{sp}}{1000} \right)^2 \right] \cdot \frac{CO_2}{100} \end{array} \right] \quad [kJ/K \cdot m^3] \quad (35)$$

- **Střední měrná tepelná kapacita vodní páry**

$$c_{\text{pmH}_2\text{O}} = 3,6 \cdot \left(0,414 + 0,038 \cdot \left(\frac{t_{\text{sp}}}{1000} \right) + 0,034 \cdot \left(\frac{t_{\text{sp}}}{1000} \right)^2 \right) \quad [\text{kJ}/\text{m}^3] \quad (36)$$

- **Redukovaný hmotnostní podíl uhlíku v nespálených zbytcích**

$$C_r = A^r \cdot \frac{b}{100} \quad [\%] \quad (36)$$

- **Celkový tepelný výkon**

$$P = \frac{\eta \cdot \dot{M}_{\text{pal}} \cdot Q_i^F}{100 \cdot 3600} \quad [\text{kW}] \quad (37)$$

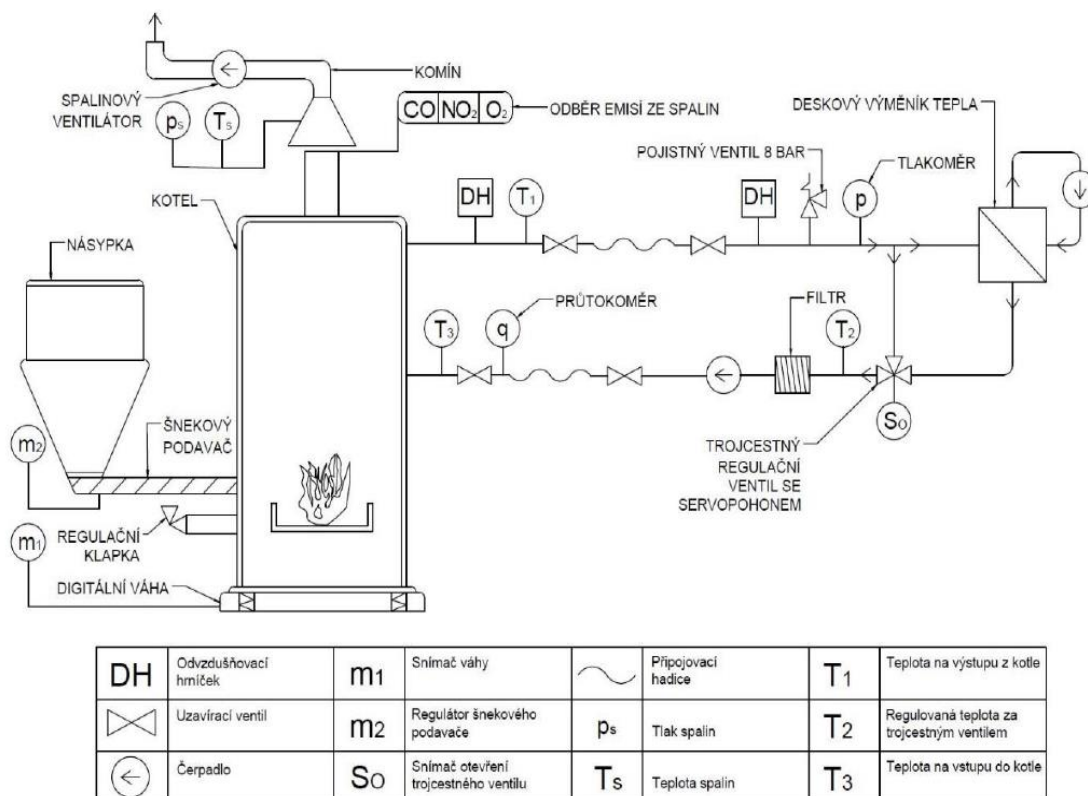
kde η [%] účinnost kotle
 \dot{M}_{pal} [kg/h] hmotnostní tok paliva

7. Spalovací zkouška

Spalovací zkouška byla vykonána ve zkušebně Energetického ústavu FSI VUT v Brně pod odborným dozorem Ing. Otakara Štelcla.

Cílem spalovací zkoušky bylo měření emisí CO, NO a výpočet účinnosti kotle pro 3 různá paliva, jednalo se konkrétně o smrkové pelety, bukové pelety a švestkové pecky. Dále, podle příslušných norem (ČSN EN 303–5 a ČSN EN 13240) byla určena emisní třída kotle a účinnost kotle.

Daná místnost obsahovala všechno potřebné vybavení a přístroje, které byly potřebné pro provedení experimentu. Jako první krok bylo třeba podle schématu uvedeného níže sestavit měřící aparaturu neboli okruh.



Obr. 7-1 Schéma měřící aparatury[24]

Spalování bylo provedeno pomocí kotle Verner A251, který byl opatřen šnekovým podavačem a násypkou. Kotel byl umístěn na digitální váze, aby bylo možné sledovat úbytek paliva. Z toho pak bylo možné vypočítat hmotnostní tok paliva. Spaliny byly odváděny komínem za pomoci odtahového ventilátoru vybaveného frekvenčním měničem. Tím byla umožněna schopnost nastavovat tah komína, který jsme nastavili na 15 Pa. Komín byl kromě ventilátoru dále opatřen termoelektrickým snímačem, sondou analyzátoru spalin a tahoměrem. Veškerá automatizace a sledování měřených hodnot byly zprostředkovány počítačem, rozhraním Labview.

7.1. Použité přístroje

Během zkoušky bylo využito následujících měřicích přístrojů:

- **Kotel Verner A251**

Jedná se o automatický kotel na pelety o výkonu kolem 25kW, který je určen pro komfortní úsporné vytápění rodinných domů, bytových jednotek, škol, dílen a mnoha jiných zařízení. Velkou předností tohoto kotle je jeho vysoká variabilita spalování biomasy v různých formách. [26]

Kotlové těleso je svařeno z ocelových plechů tloušťky 4 až 8 mm. Stěny, které jsou ve styku s plamenem, jsou dvojité, chlazené vodou. Ve spodní části tělesa je hořákový prostor, stěny hořákového prostoru jsou z kvalitního kotlového plechu. V horní části tělesa je tří tahový žárotrubný spalinový výměník, jenž tvoří 24 trubek o světlosti 50 mm. Hořák je obložen tvarovkami ze speciální jakostní keramiky. Zadní stěna hořáku je opatřena třemi otvory zapalovacího vzduchu ve spodní části a dvěma otvory sekundárního vzduchu v horní části. Šnekový dopravník dopravuje palivo z násypky do spadu, odkud propadáva do hořáku. Rozptylovač zajišťuje rovnoměrnější rozmístění paliva po ploše roštu. V hořáku se palivo spaluje a nespalitelné zbytky jsou vytlačovány roštnicemi do popelníku. Roštování je poháněno reverzním chodem pohonu plnicího dopravníku. Spaliny proudí výměníkem, kde předávají teplo do topné vody. Ochlazené spaliny odchází výstupním hrdlem do komína.[26]

Jmenovitý výkon	25 kW
Regulovatelnost	7,5–28 kW
Účinnost	92 %
Spotřeba paliva (při jmenovitém výkonu)	
pelety dřevní	5,8 kg/h
pelety rostlinné	6,3 kg/h
obilniny	6,8 kg/h
Objem vodní náplně	85 l
Objem násypky	240 dm ³
Pracovní rozsah výstupní teploty vody	65 – 90 °C
Teplota spalin (při jmenovitém výkonu)	160 °C
Předepsaný provozní tah komína	15 Pa
Celková hmotnost	575 kg
Třída účinnosti	3
Emisní třída	3

Tab. 7-1 Vybrané parametry automatického kotle Verner A251[26]

- **Siemens ULTRAMAT 21 a 22**

Analyzátor spalin, který určuje koncentraci oxidu siřičitého SO₂, oxidu dusnatého NO, oxidu uhelnatého CO a kyslíku O₂, za pomoci technologie nedisperzní infračervené spektrometrie. Přístroj zaznamenává na displeji okamžité hodnoty koncentrací daných plynů. Na připojeném monitoru lze vidět průběh hodnot. Před analyzátor je zapojeno chladicí zařízení sloužící k ochlazení a vyčištění spalin. Chrání analyzátor před poškozením.

- **Digitální váha Mettler Toledo**

Za pomoci váhy jsme schopni měřit úbytek paliva. Tato hodnota nám slouží k výpočtu hodinové spotřeby nebo účinnosti kotle. Váha měří s přesností 20 g.

K dalším přístrojům patří například teploměr COMET CO301 obsahující termoelektrický fotočlánek, který je napojen na odběr z kouřovodu. Dále indukční průtokoměr FLOMAG 3000 s digitálním výstupem, který je napojen k PC. Pomocí Tahoměru Brigon měříme v průběhu zkoušky předepsaný tah komínu. Výstupy z těchto měřících zařízení jsou zaznamenávány pomocí počítače.



Obr. 7-2 Kotel Verner A251



Obr. 7-3 ULTRAMAT Siemens 21 a 22

7.2. Postup měření

Jak již bylo řečeno, cílem měření bylo zjištění emisí CO, NO, vznikající při spalování dvou druhů dřevěných pelet a švestkových pecek. Nejprve byly spalovány pelety z měkkého smrkového dřeva, dále pelety z tvrdého bukového dřeva a konečně švestkové pecky. U všech uvedených paliv byla změřena vlhkost a výhřevnost.

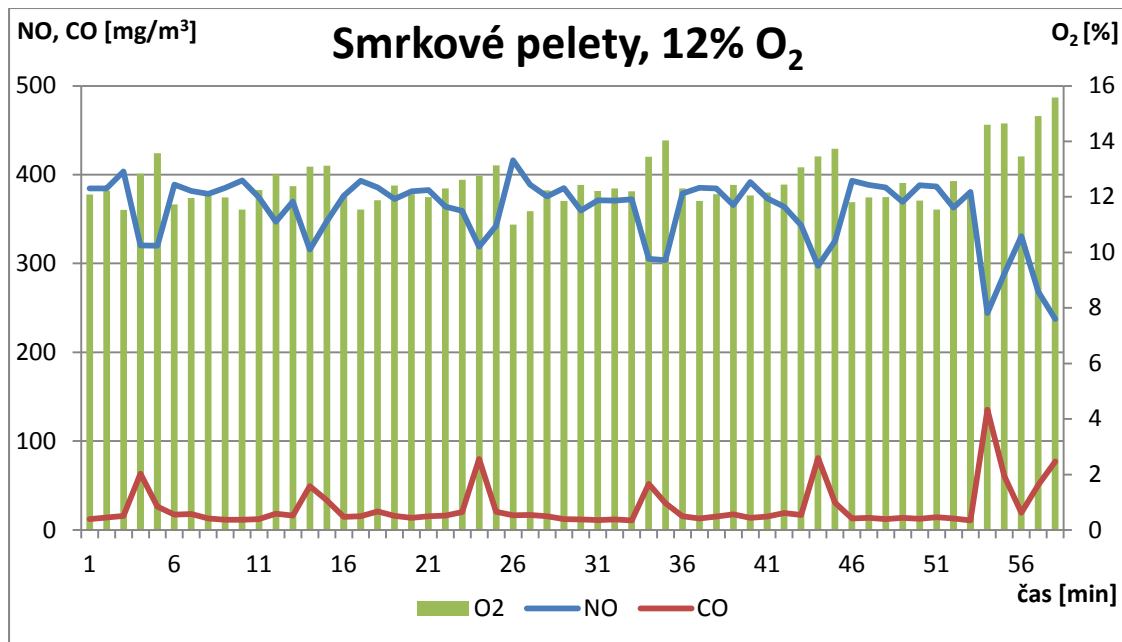
Palivo	Vlhkost [%]	Výhřevnost [MJ/kg]
Pelety smrk	7,6990	16,7819
Pelety buk	6,5025	17,4551
Švestkové pecky	3,8575	17,8934

Tab. 7-2 Parametry paliva před spalováním

Spalování pelet ze smrkového dřeva probíhalo pro tři obsahy kyslíku O₂ a to při 12%, 10% a 8% obsahu kyslíku. Spalování pelet z bukového dřeva a švestkových pecek probíhalo jen při 10% obsahu kyslíku O₂. Všechna měření probíhala po dobu 60 minut. K udržení těchto hodnot bylo potřeba manuálně ladit kotel, například regulováním otáček ventilátoru nebo intenzity plnění paliva šnekovým dopravníkem.

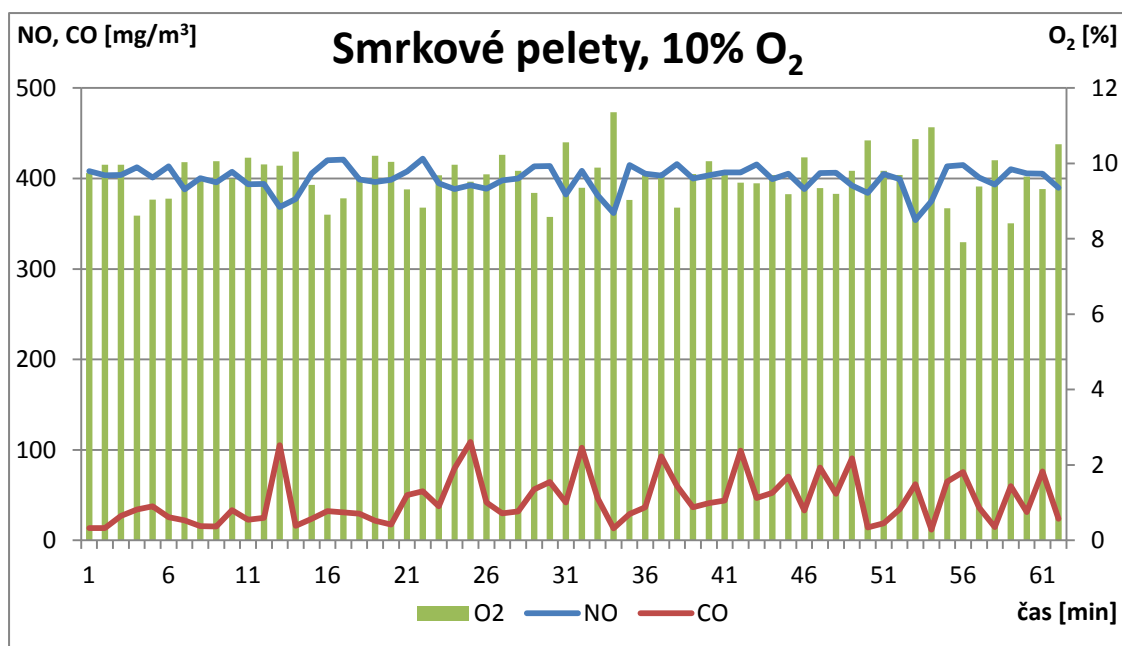
V první fázi se kotel a voda zahřály na provozní teplotu. Následně bylo potřeba počkat na ustálený stav, aby nedocházelo k značnému kolísání výkonu a teplot. Tím jsme snadno nastavili optimální nastavení pro spalovací zkoušku. Naměřená data byla vynesena do následujících grafů.

- Pro smrkové pelety, 12% O₂



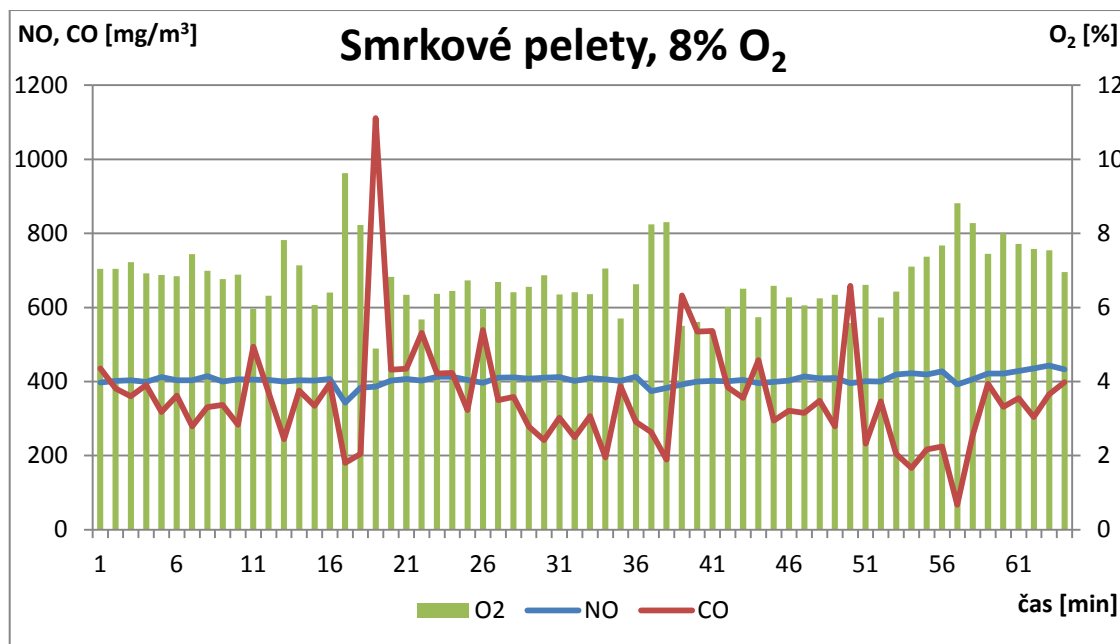
Obr. 7-4 Graf naměřených hodnot pro smrkové pelety, 12% O₂

- Pro smrkové pelety, 10% O₂



Obr. 7-5 Graf naměřených hodnot pro smrkové pelety, 10% O₂

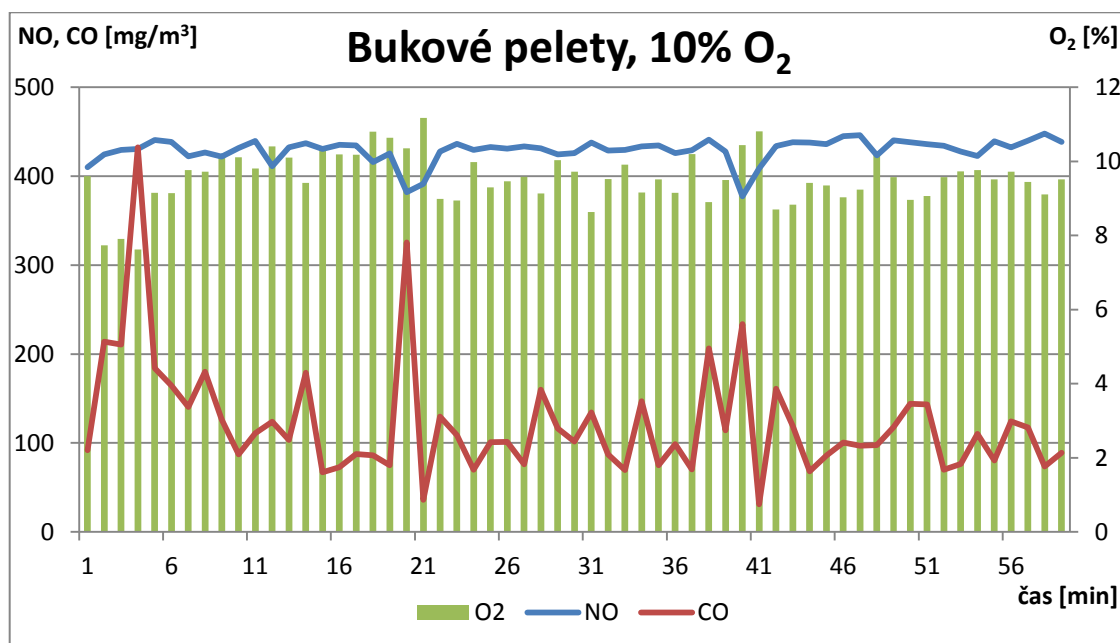
- Pro smrkové pelety, 8% O₂



Obr. 7-6 Graf naměřených hodnot pro smrkové pelety, 8% O₂

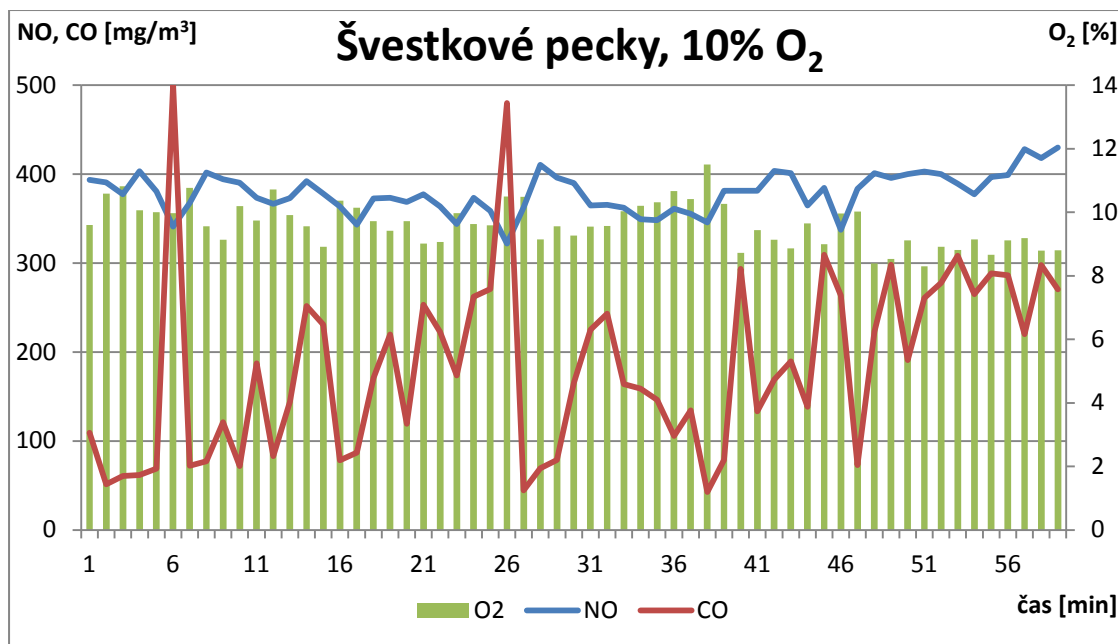
Spalování pelet ze smrkového dřeva proběhlo bez větších komplikací. Každé měření probíhalo po dobu 60 minut. Pravidelný nárůst hodnot oxidu uhelnatého CO je způsoben roštováním kotle, které bylo nastaveno při 12% O₂ na 10 minut a při 10% a 8% obsahu O₂ na 5 minut. Z grafů je patrné, jak obsah kyslíku ovlivňuje především množství CO ve spalinách.

- Pro bukové pelety, 10% O₂



Obr. 7-7 Graf naměřených hodnot pro bukové pelety, 10% O₂

- Pro švestkové pecky, 10% O₂

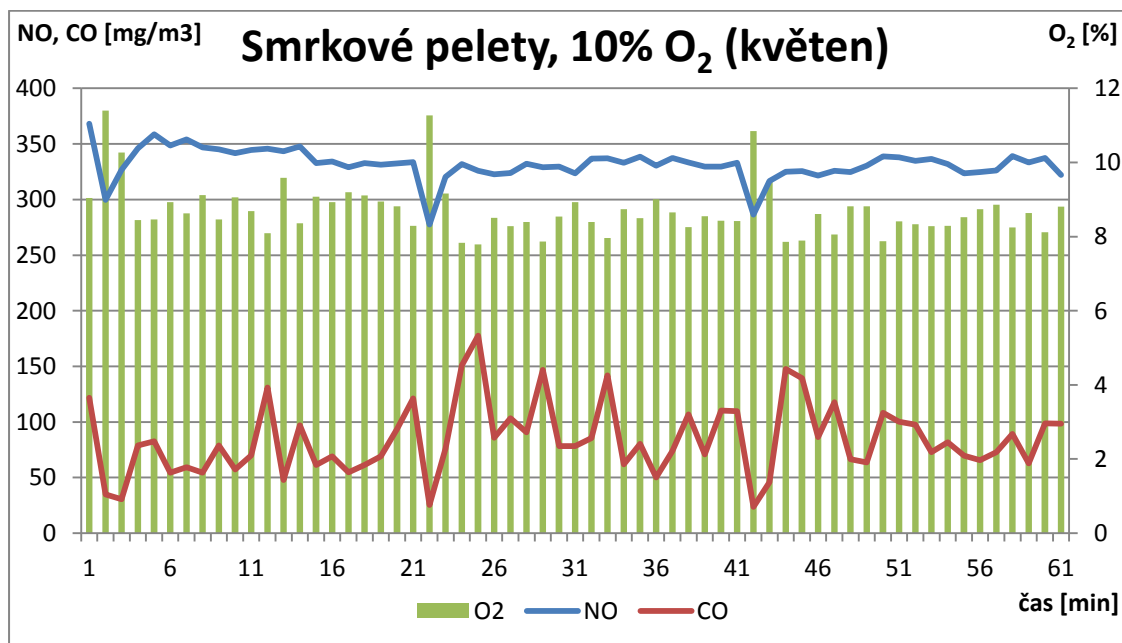


Obr. 7-8 Graf naměřených hodnot pro švestkové pecky, 10% O₂

Spalování pelet z bukového dřeva a švestkových pecek při 10% obsahu kyslíku O₂ proběhlo bez obtíží. Každé měření při ustálených hodnotách probíhalo po dobu 60 minut. Píky v grafech jsou způsobeny roštováním kotle.

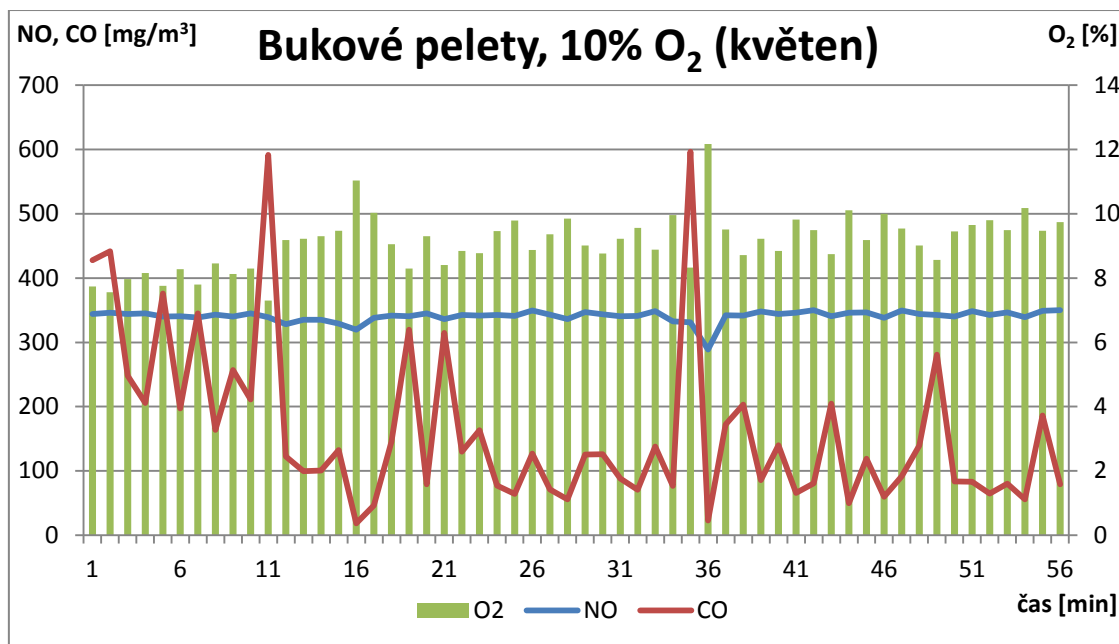
V průběhu dosavadních měření byla ztracena data z počítače (data z váhy, teploty atd.), která souvisí s výpočtem účinnosti, tudíž nejsme schopni účinnost spočítat. Proto v květnu roku 2017 proběhlo další měření. Měřily se znovu již uvedená paliva pro obsah kyslíku O₂ 10%. Hodnoty emisí NO, CO jsou znázorněny v grafech.

- Pro smrkové pelety, 10% O₂



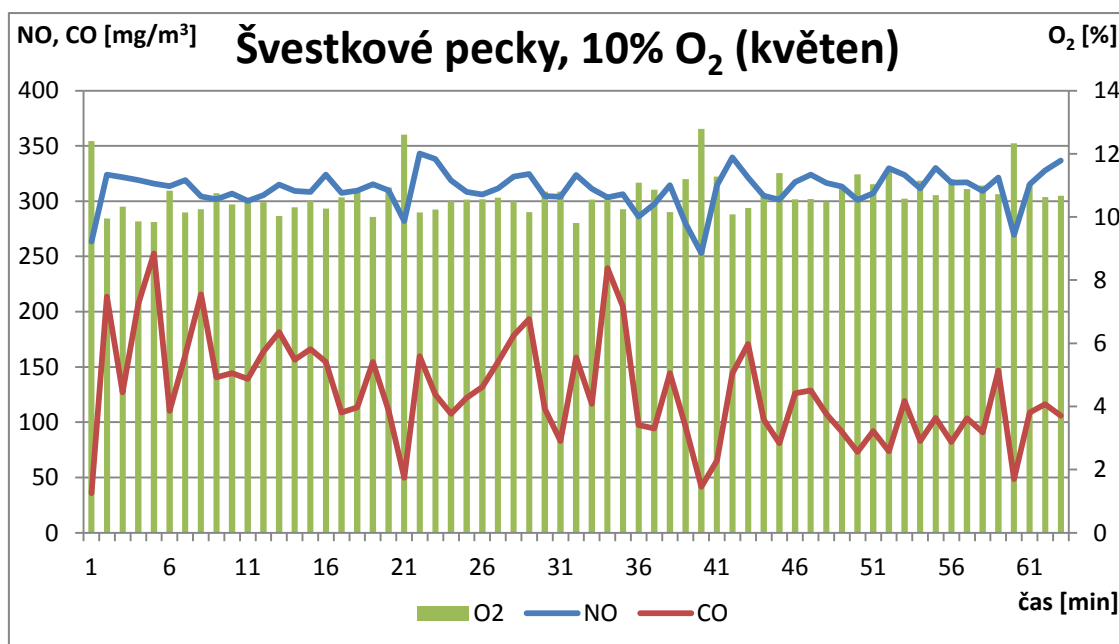
Obr. 7-9 Graf naměřených hodnot pro smrkové pelety, 10% O₂ (květen 2017)

- Pro bukové pelety, 10% O₂



Obr. 7-10 Graf naměřených hodnot pro bukové pelety, 10% O₂ (květen 2017)

- Pro švestkové pecky, 10% O₂



Obr. 7-11 Graf naměřených hodnot pro švestkové pecky, 10% O₂ (květen 2017)

Během každého měření jsme se snažili dosáhnout alespoň 60 minut ustáleného stavu, kdy nedocházelo ke kolísání výkonu a teplot spalin. Při spalování nedošlo k žádným zásadním problémům. Z naměřených dat byly dle normy ČSN EN 303-5 spočítány referenční hodnoty (CO_{ref}, NO_{ref}) pro 10% obsah kyslíku. Z referenčních hodnot byly sestrojeny grafy, které slouží k lepšímu vzájemnému porovnávání paliv.

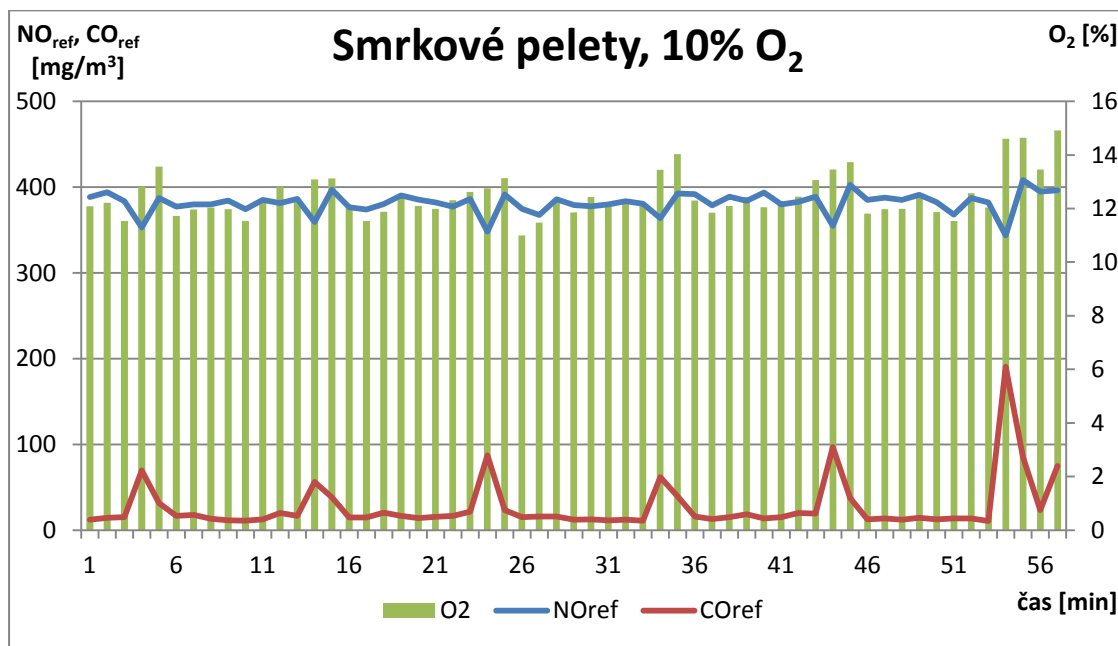
Přepočítání na referenční hodnoty lze uskutečnit vztahem[27]:

$$X_{\text{ref}} = X \cdot \frac{21 - O_{2\text{ref}}}{21 - O_2} \quad [\%] \quad (38)$$

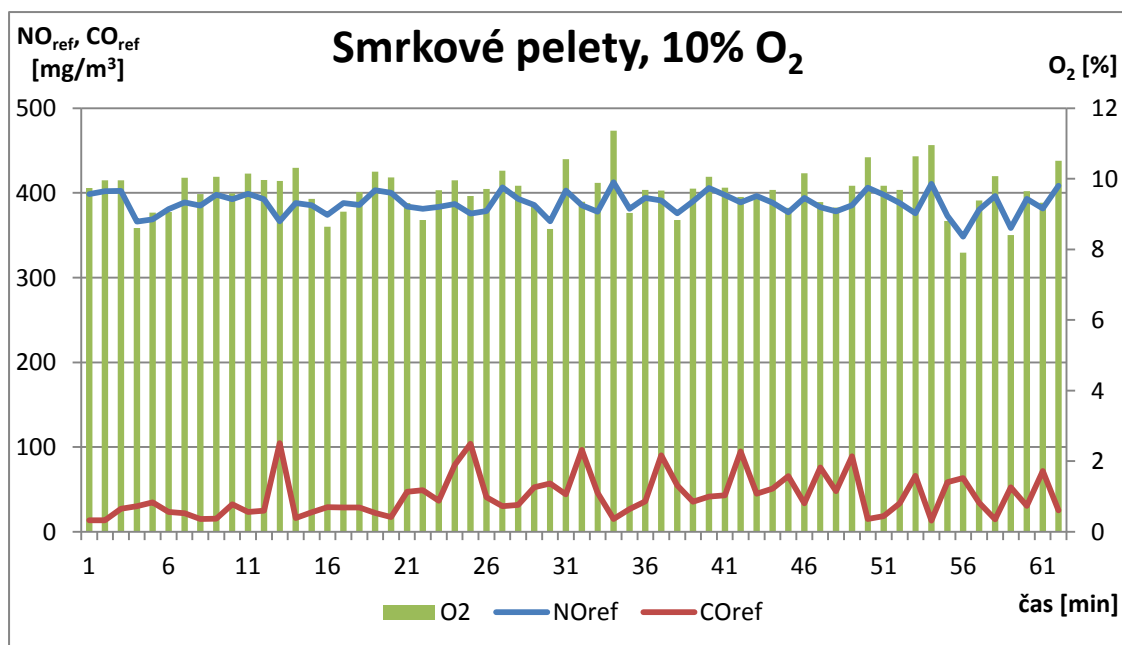
kde	X_{ref}	[%]	referenční hodnota plynu
	X	[mg/m ³]	aktuální hodnota plynu – z grafu
	$O_{2\text{ref}}$	[%]	referenční hodnota kyslíku – 10 %
	O_2	[%]	aktuální hodnota kyslíku – z grafu

- **Referenční hodnoty CO_{ref} , NO_{ref} pro smrkové pelety**

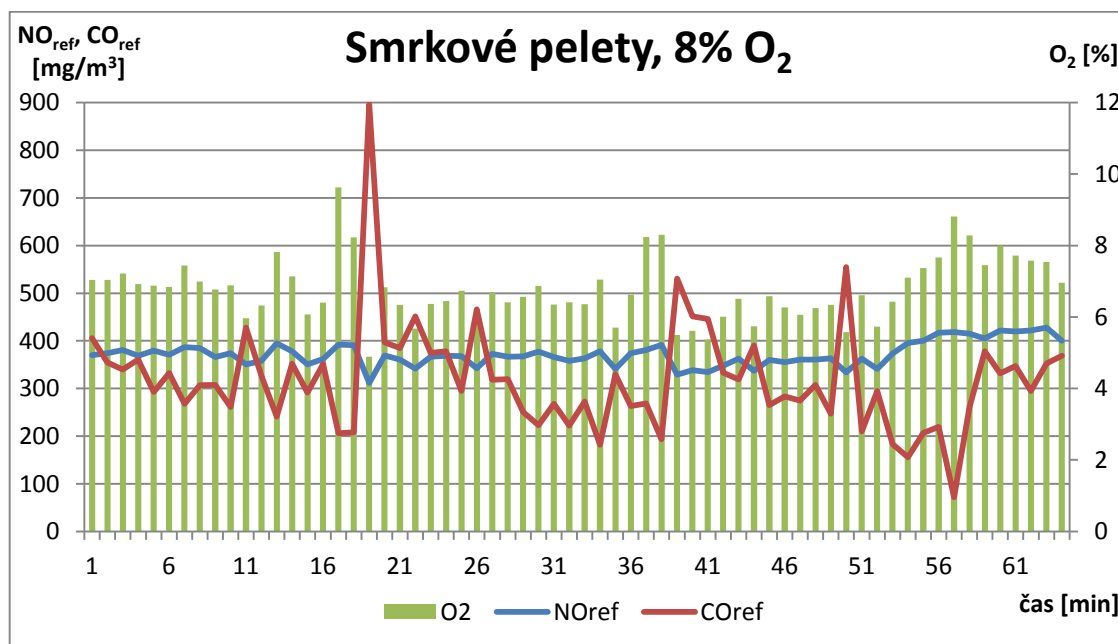
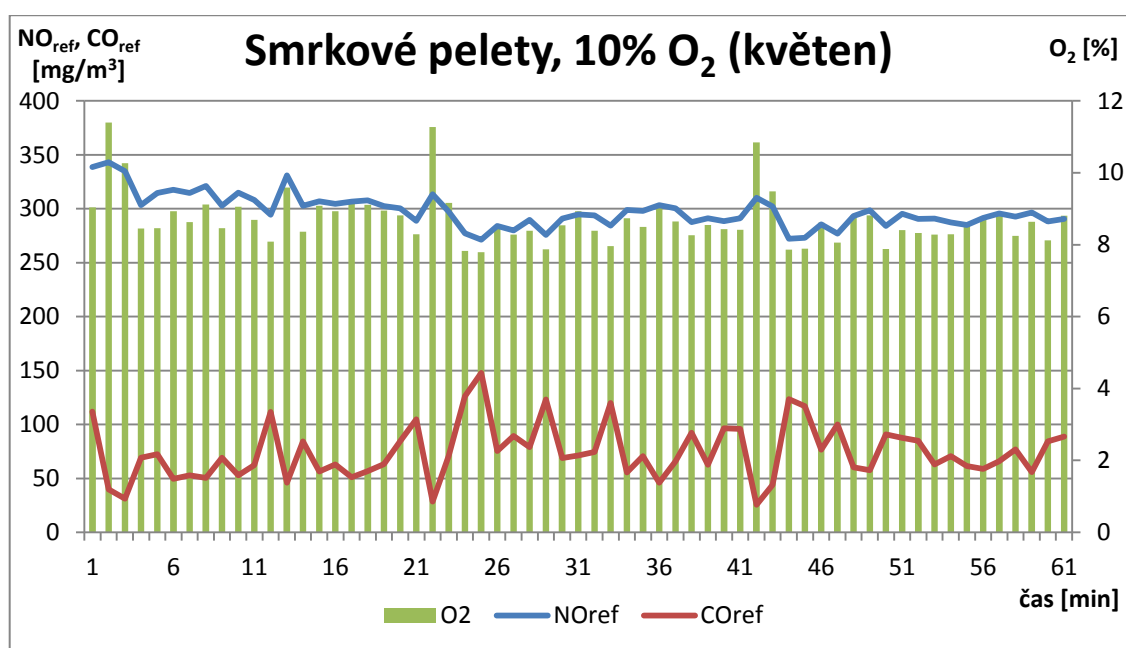
Zde budou uvedeny grafy referenčních hodnot smrkových pelet pro tři obsahy kyslíku, na závěr budou hodnoty vzájemně porovnány s měřením z května 2017.

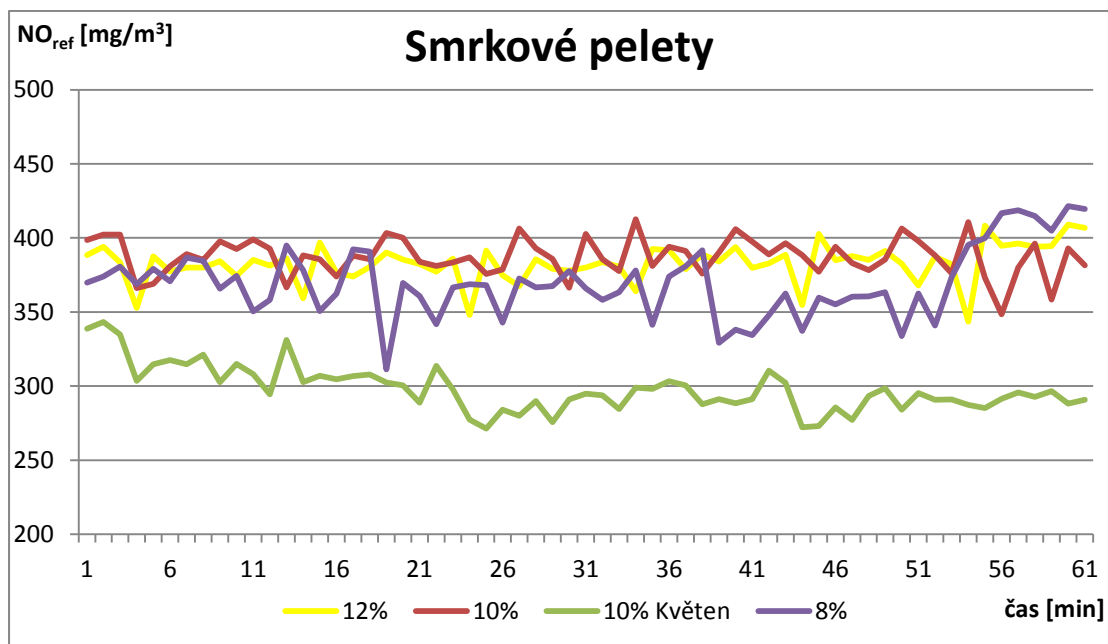


Obr. 7-12 Graf referenčních hodnot pro smrkové pelety, 12% O₂

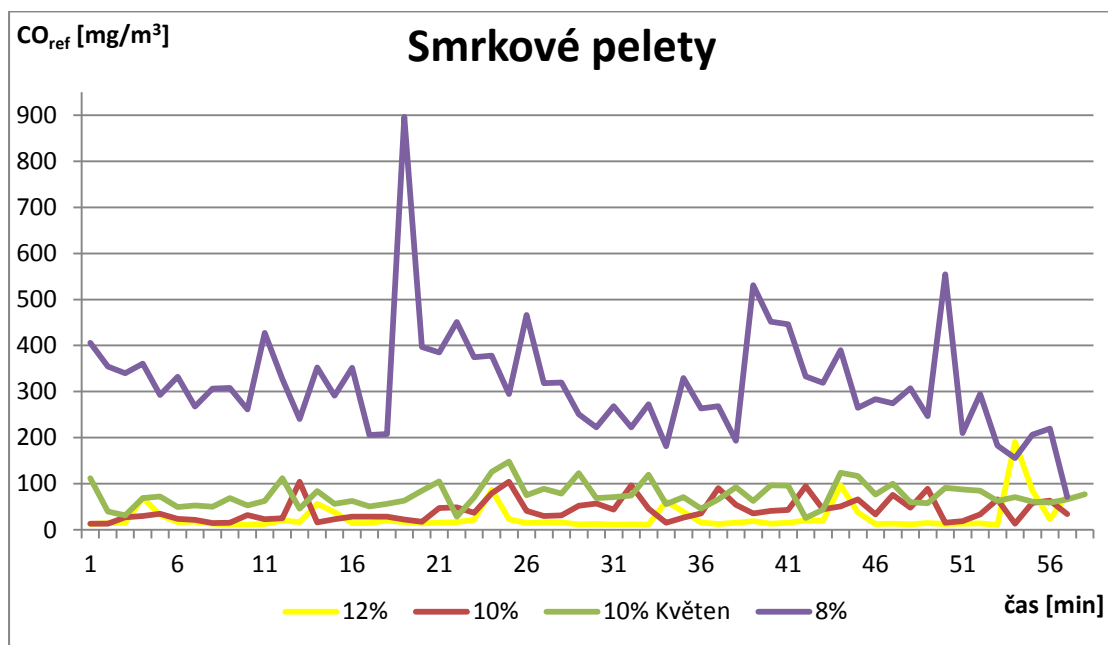


Obr. 7-13 Graf referenčních hodnot pro smrkové pelety, 10% O₂

Obr. 7-14 Graf referenčních hodnot pro smrkové pelety, 8% O₂Obr. 7-15 Graf referenčních hodnot pro smrkové pelety, 10% O₂ (květen 2017)



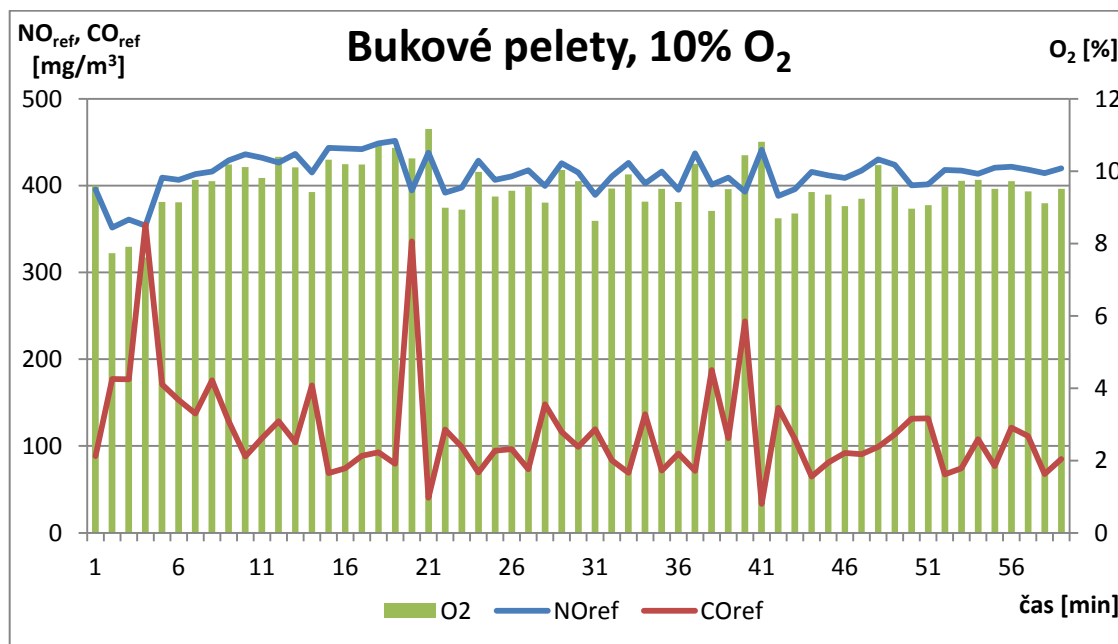
Obr. 7-16 Graf referenčních hodnot NO pro smrkové pelety



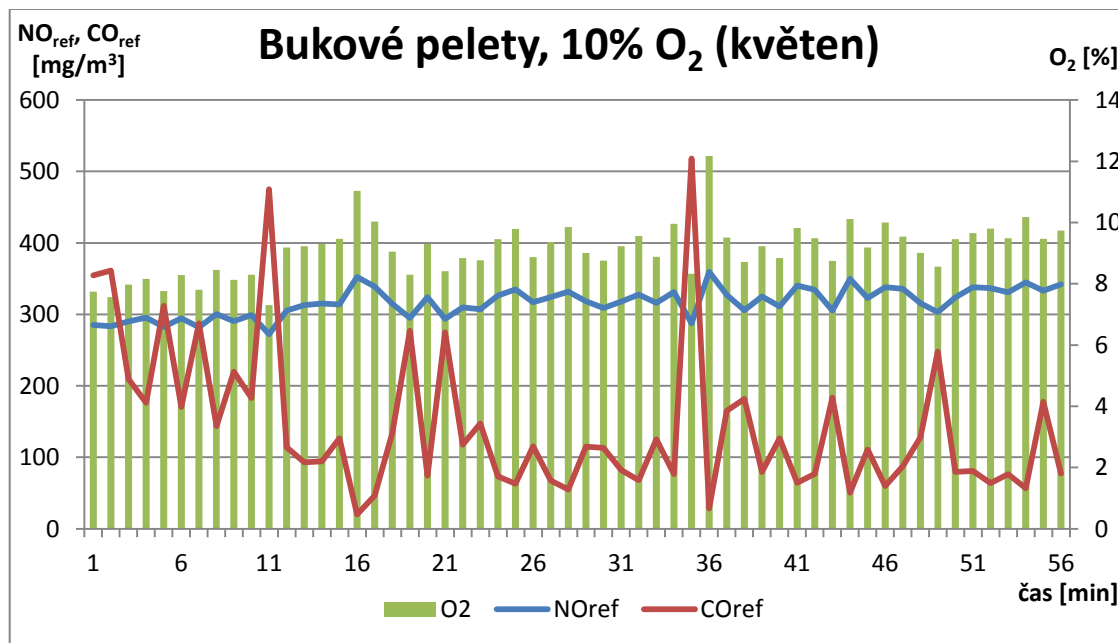
Obr. 7-17 Graf referenčních hodnot CO pro smrkové pelety

- **Referenční hodnoty CO_{ref} , NO_{ref} pro bukové pelety**

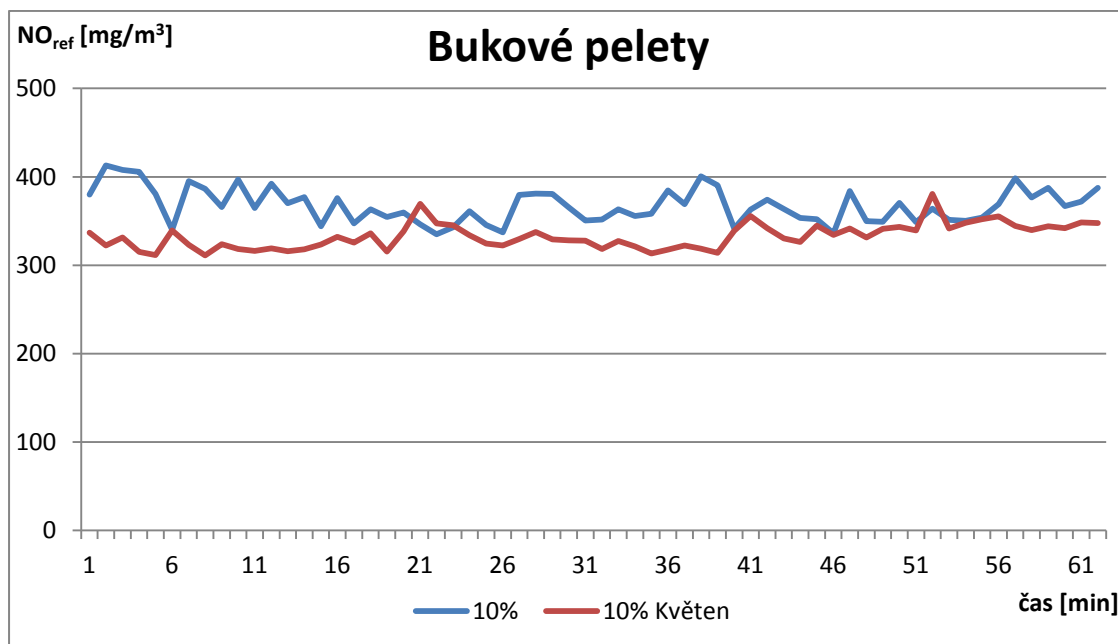
Zde budou uvedeny grafy referenčních hodnot bukových pelet pro 10% obsah kyslíku, na závěr budou hodnoty vzájemně porovnány s měřením z května 2017.



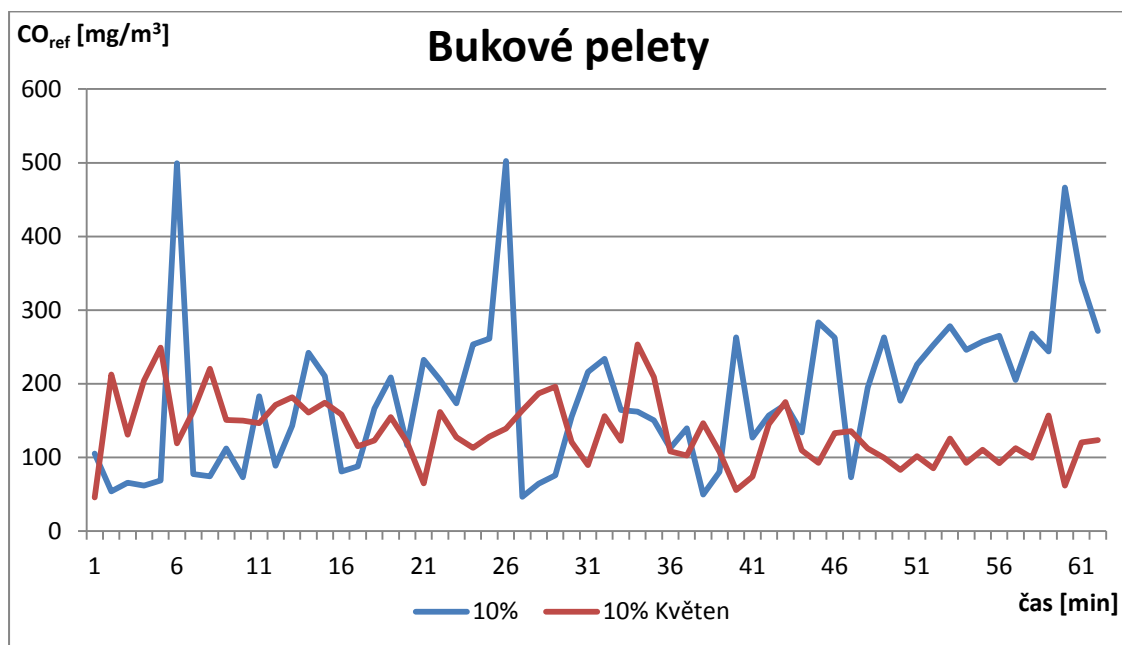
Obr. 7-18 Graf referenčních hodnot pro bukové pelety, 10% O₂



Obr. 7-19 Graf referenčních hodnot pro bukové pelety, 10% O₂ (květen 2017)



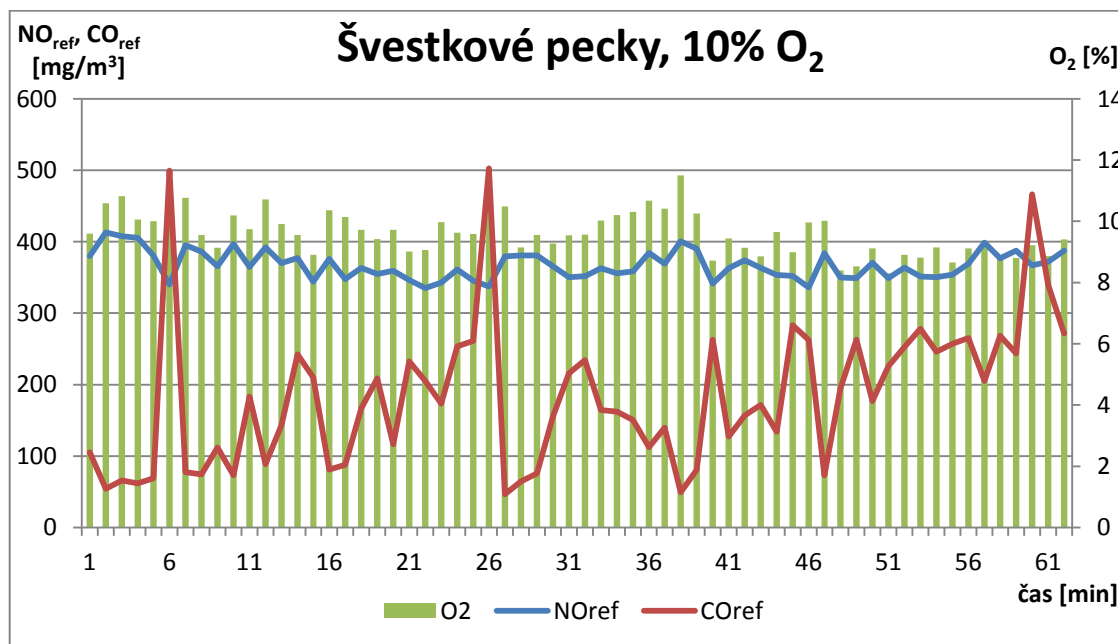
Obr. 7-20 Graf referenčních hodnot NO pro bukové pelety



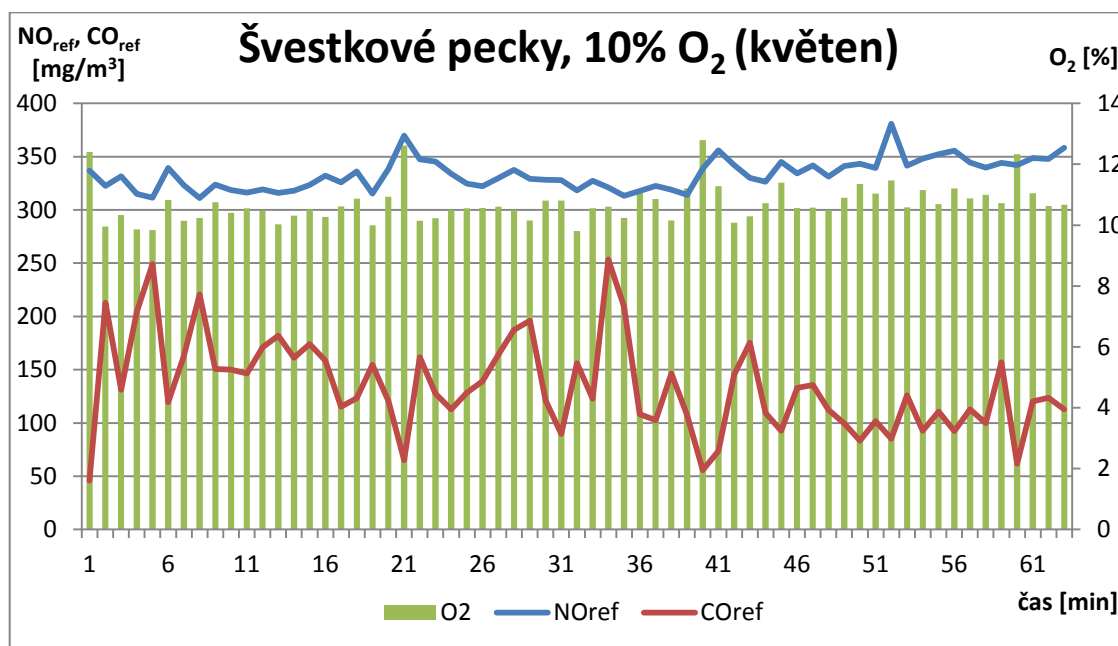
Obr. 7-21 Graf referenčních hodnot CO pro bukové pelety

- **Referenční hodnoty CO_{ref} , NO_{ref} pro švestkové pecky**

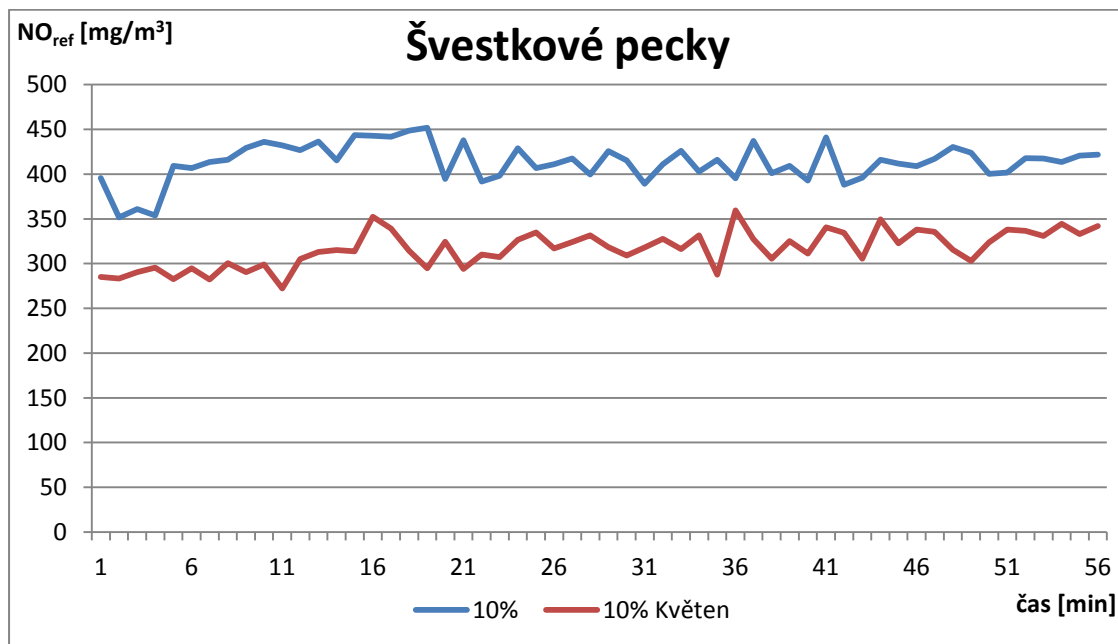
Zde budou uvedeny grafy referenčních hodnot švestkových pecek pro 10% obsah kyslíku, na závěr budou hodnoty vzájemně porovnány s měřením z května 2017.



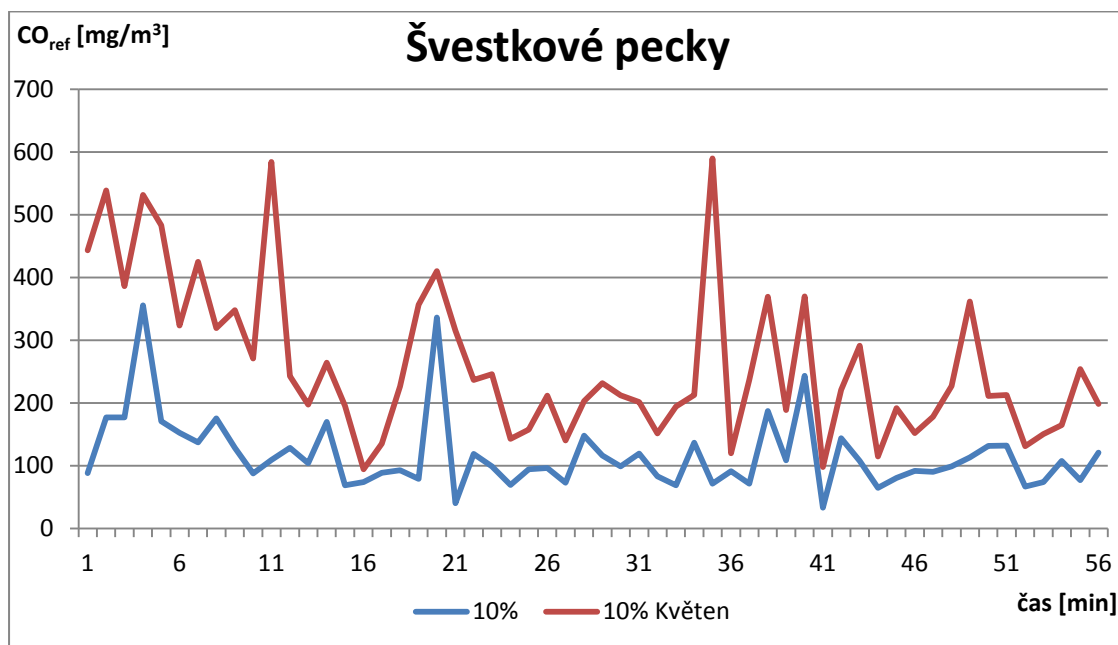
Obr. 7-22 Graf referenčních hodnot pro švestkové pecky, 10% O₂



Obr. 7-23 Graf referenčních hodnot pro švestkové pecky, 10% O₂ (květen 2017)



Obr. 7-24 Graf referenčních hodnot NO pro švestkové pecky



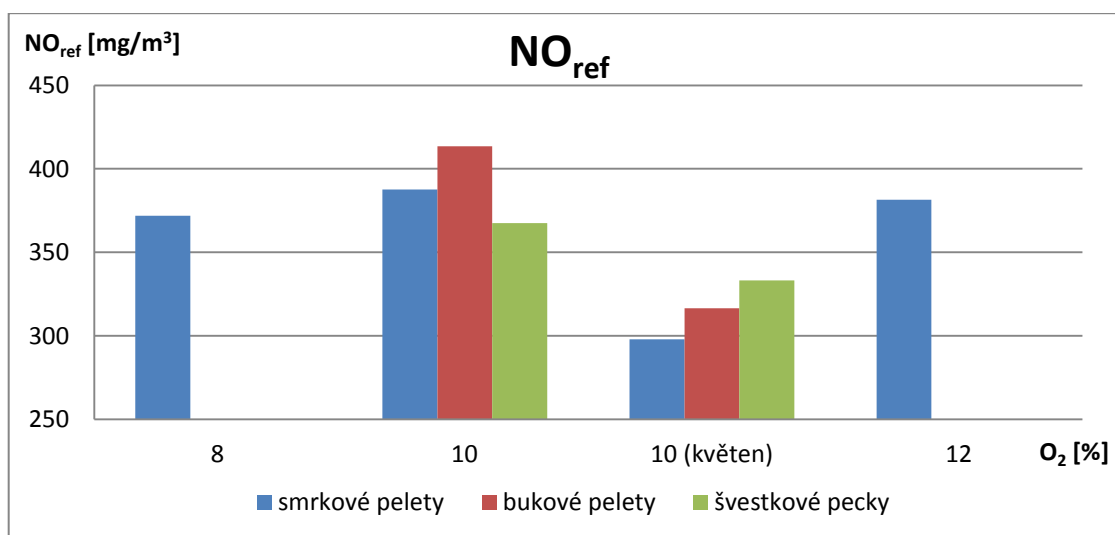
Obr. 7-25 Graf referenčních hodnot CO pro švestkové pecky

Pro lepší porovnání daných paliv byla naměřená data zprůměrována a na základě výsledků byla sestavena tabulka. Měření z května 2017 je zvýrazněno.

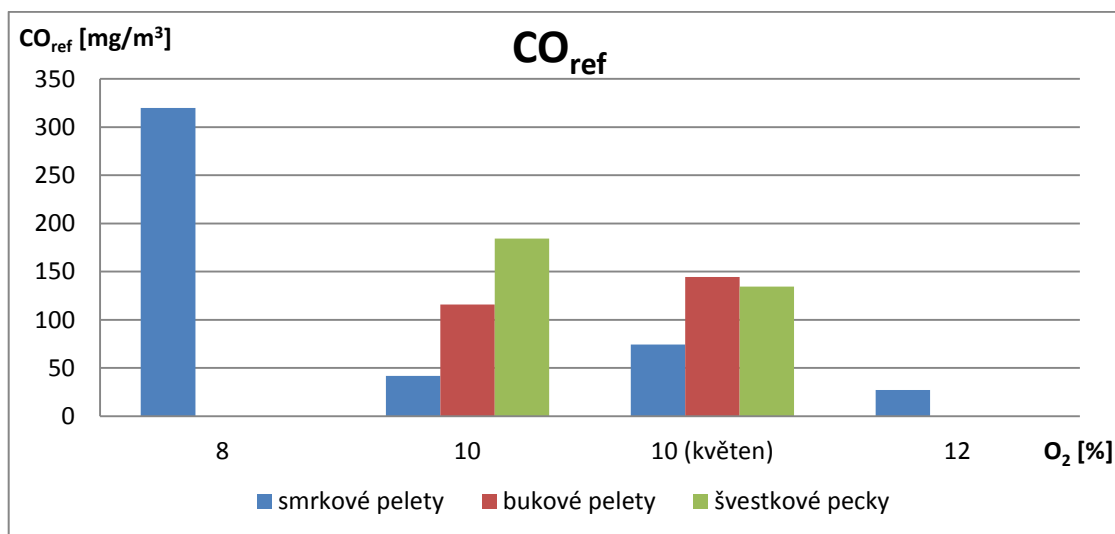
Palivo	O ₂ [%]	NO [mg/m ³]	CO [mg/m ³]	NO _{ref} [mg/m _n ³]	CO _{ref} [mg/m _n ³]	Teplota spalin [°C]
Smrkové pelety	12,59	356,68	27,36	381,51	27,26	–
	9,64	399,65	43,76	387,62	41,99	–
	8,72	331,83	84,29	297,93	74,38	220,80
	6,77	405,52	354,43	371,87	319,74	–
Bukové pelety	9,56	429,08	122,08	413,52	116,01	–
	9,11	340,68	162,52	316,51	144,44	221,91
Švestkové pecky	9,61	380,06	193,64	367,49	184,31	–
	10,72	311,15	127,51	333,25	134,35	210,70

Tab. 7-3 Průměrné hodnoty z ustáleného měření

Pro ještě lepší porovnání paliv byla data z tabulky vynesena do dvou grafů.



Obr. 7-26 Souhrnný graf referenčních hodnot NO



Obr. 7-27 Souhrnný graf referenčních hodnot CO

Měření jsme se snažili co nejlépe odladit tak, aby vyhovovalo našim požadavkům. K tomu bylo nutné přepnout kotel z automatického režimu na režim manuální. Mohli jsme tak regulovat především otáčky ventilátoru, intenzitu plnění, intenzitu roštování, plnicí dávku a škrtecí klapku, která byla většinu měření otevřena.

Požadované hladiny kyslíku O₂ 12 %, 10 % a 8 % se podařilo skoro u všech měření držet. U měření smrkových pelet z května 2017 byla průměrná hodnota kyslíku nižší oproti požadovaným 10 %, což se nám projevilo na emisích. Dále byla nižší opět u smrkových, kde jsme místo 8 % udrželi průměrně 6,77 %. Menší odchylky byli očekávané.

Z grafů, resp. tabulky, je patrný právě vliv přiváděného vzduchu (kyslíku O₂) na průběh spalování. S vyšším obsahem kyslíku klesá objem CO ve spalinách. Nejlepších výsledků dosahovaly paliva při spalování s vyšším obsahem kyslíku O₂. Patří k nim zkouška pro smrkové pelety při 12% (12,59%) obsahu kyslíku, kde byla referenční hodnota CO_{ref} nejmenší, a dále smrkové pelety pro 10% obsah kyslíku O₂. Jestliže chceme porovnat měření smrkových pelet pro 10% obsah kyslíku O₂ s měřením z května 2017, měli bychom brát v potaz rozdíly v množství přiváděného vzduchu. Tyto hodnoty se liší skoro o 1 %. Projevilo se to téměř dvojnásobným množstvím CO u měření z května 2017, ale i tak si s referenční koncentrací 74,38 mg/m³ drží své místo mezi nejlepšími výsledky. Ohledně zkoušek pro 10% obsah kyslíku O₂ nejlepší výsledky dosahují smrkové pelety, za nimi jsou pelety z bukového dřeva, a na konec švestkové pecky, které dosahují nejhorších výsledků. I když smrkové pelety při 6,77% obsahu O₂ dosáhly nejvyšší hodnoty CO_{ref}, neznamená to, že dopadly nejhůře. Neměřili jsme totiž švestkové pecky při tak nízkém obsahu kyslíku. Švestkové pecky při svých 9,61% a 10,72% O₂ (to jsou nejvyšší hodnoty kyslíku u měření na 10% obsah kyslíku O₂) dosáhly v porovnání s peletami ze smrku výrazně horších výsledků. Je proto pravděpodobné, že by pecky při obsahu kyslíku kolem 8 % dopadly mnohem hůře.

Z tabulky a grafů je patrné především u měření na 10% obsah O₂, jak se projevuje změna koncentrace kyslíku na množství CO ve spalinách. Budeme-li se bavit o změnách z března na květen, bukové pelety zaznamenaly **nárůst** koncentrace CO ve spalinách o 28,4 mg/m³ se snížením obsahu O₂ o 0,5 %. Švestkové pecky zaznamenaly **pokles** koncentrace CO o 50 mg/m³ se zvýšením obsahu kyslíku o 1 %. Tato výchylka od průměrné hodnoty kyslíku 10 %, způsobila, že z hlediska koncentrace CO švestkové pecky dopadly v květnu lépe než bukové pelety.

Všechna měřená paliva lze podle normy ČSN EN 303–5, z hlediska koncentrace CO, zařadit do 5. třídy paliv, která toleruje koncentraci CO ve spalinách do 500 mg/m³.

Emisemi NO se norma ČSN EN 303–5 nezabývá. Z tohoto důvodu se emise NO u kotlů na biomasu nižších výkonů příliš nesledují. Změna ale nastane v roce 2020, kdy začne platit směrnice Evropského parlamentu a Rady 2009/125/ES upravující požadavky na Ekodesign kotlů na tuhá paliva. Tato norma udává maximální koncentraci NO ve spalinách pro náš kotel 200 mg/m³. Této limitní hodnoty jsme u žádného paliva nedosáhli. Lze tedy předpokládat, že nově certifikované kotle budou muset projít konstrukční úpravou.[24]

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný výkon kW	Mezní hodnoty emisí								
			CO			OGC			prach		
			mg/m ³ při 10% O ₂ ^a								
			třída	třída	třída	třída	třída	třída	třída	třída	třída
3	4	5	3	4	5	3 ^b	4	5			
ruční	biopaliva	≤ 50	5 000	1 200	700	150	50	30	150	75	60
		> 50 ≤ 150	2 500			100			150		
		> 150 ≤ 500	1 200			100			150		
	fosilní paliva	≤ 50	5 000	150	125						
		> 50 ≤ 150	2 500	100	125						
		> 150 ≤ 500	1 200	100	125						
samočinná	biopaliva	≤ 50	3 000	1 000	500	100	30	20	150	60	40
		> 50 ≤ 150	2 500			80			150		
		> 150 ≤ 500	1 200			80			150		
	fosilní paliva	≤ 50	3 000	100	125						
		> 50 ≤ 150	2 500	80	125						
		> 150 ≤ 500	1 200	80	125						

Tab. 7-4 Mezní hodnoty emisí[27]

Měření tuhých znečišťujících látek (TZL) probíhalo gravimetrickou filtrační metodou za pomoci odběrné sondy umístěné v komíně. Do sondy byl vložen sběrný filtr, který zachytával drobné tuhé částice. Filtry musí být před použitím vyžháný a zakonzervovány v exsikátoru, aby nedocházelo ke změně vlhkosti. Z hlediska TZL, neboli prachu, řadíme všechna měření do 3. emisní třídy, jelikož hodnota nižší jak 60 mg/m³ nebyla dosažena. Měření bylo provedeno každých 30 minut, při obsahu kyslíku 10 %. Hodnoty emisí TZL jsou uvedeny v tabulce 7-5.

Palivo	O ₂ [%]	Prach [mg/m ³]
Smrkové pelety	8,89	68
	8,56	71
Bukové pelety	8,82	75
	9,44	67
Švestkové pecky	10,54	90
	10,92	88

Tab. 7-5 Hodnoty emisí prachu

7.3. Vstupní hodnoty a výpočet účinnosti kotle

7.3.1. Prvkový rozbor

Z měření známe již vlhkost paliva a můžeme za pomoci databáze Phyllis 2 určit prvkový rozbor zkoušeného paliva. V uvedené databázi se prvně najde palivo odpovídající měřenému vzorku. Poté se zadá naměřená vlhkost do databáze, na základě které nám určí množství uhlíku, kyslíku, vodíku, dusíku, síry obsažených v palivu. V databázi je možné také dohledat obsah popeloviny v palivu A^r [%] a množství uhlíku obsaženého v tuhých zbytcích paliva b [%]. Popelovinu paliva jsme ale raději změřili.

Veličina	Smrkové pelety	Bukové pelety	Švestkové pecky
W [%]	7,6990	6,5025	3,8575
C [%]	46,29	48,30	48,24
O [%]	46,62	44,50	42,26
H [%]	6,25	6,08	5,67
N [%]	0,28	0,80	0,31
S [%]	0,01	0,03	0,07
A ^r [%]	0,7019	0,3616	0,5971
Q _i ^r [MJ/kg]	16,7819	17,4551	17,8934
b [%]	20,12	17,81	21,83

Tab. 7-6 Vstupní hodnoty a prvkový rozbor[28]

Pro nepřímou metodu výpočtu účinnosti kotle bylo také nutné změřit hmotnostní tok paliva M_{pal} , teplotu spalin t_{sp} , teplotu okolí t_{ok} a tlak spalin p_{sp} . Tyto hodnoty byly odečteny z počítače a budou uvedeny v tabulce spolu s výsledky účinnosti.

7.3.2. Vzorový výpočet účinnosti

Zde bude spočítána účinnost kotle. Jako palivo byly zvoleny bukové pelety.

Výpočet minimálního množství vzduchu

Minimální potřebné množství kyslíku

$$V_{\text{O}_2\text{min}} = \frac{22,39}{100} \cdot \left(\frac{C}{12,01} + \frac{H}{4,032} + \frac{S}{32,03} - \frac{O}{32} \right) \quad [\text{m}_n^3/\text{kg}] \quad (39)$$

$$V_{\text{O}_2\text{min}} = \frac{22,39}{100} \cdot \left(\frac{48,30}{12,01} + \frac{6,08}{4,032} + \frac{0,03}{32,03} - \frac{44,50}{32} \right) = 0,927 \text{ m}_n^3/\text{kg}$$

Minimální množství suchého vzduchu

$$V_{\text{SVZmin}} = \frac{100}{21} \cdot V_{\text{O}_2\text{min}} \quad [\text{m}_n^3/\text{kg}] \quad (40)$$

$$V_{\text{SVZmin}} = \frac{100}{21} \cdot 0,927 = 4,414 \text{ m}_n^3/\text{kg}$$

Součinitel vlhkosti vzduchu

$$f = 1 + \varphi \cdot \frac{p''}{p_c - \varphi \cdot p''} \quad [-] \quad (41)$$

$$f = 1 + 0,7 \cdot \frac{2490}{98100 - 0,7 \cdot 2490} = 1,018$$

Minimální množství vlhkého vzduchu

$$V_{\text{VVZmin}} = f \cdot V_{\text{SVZmin}} \quad [\text{m}_n^3/\text{kg}] \quad (42)$$

$$V_{VVZmin} = 1,018 \cdot 4,414 = 4,494 \text{ m}_n^3/\text{kg}$$

Minimální množství vlhkého vzduchu za reálných podmínek

$$V_{rVVZmin} = V_{VVZmin} \cdot \frac{t_{ok}+273,15}{273,15} \cdot \frac{p_{atm}}{p_{vz}} \cdot \dot{M}_{pal} \quad [\text{m}_n^3/\text{kg}] \quad (43)$$

$$V_{rVVZmin} = 4,494 \cdot \frac{21,74+273,15}{273,15} \cdot \frac{101325}{98500} \cdot \frac{9,46}{3600} = 0,013 \text{ m}_n^3/\text{kg}$$

Výpočet minimálního množství spalin

Minimální objem SO₂ ve spalinách

$$V_{SO_2min} = \frac{21,89}{32,06} \cdot \frac{S}{100} \quad [\text{m}_n^3/\text{kg}] \quad (44)$$

$$V_{SO_2min} = \frac{21,89}{32,06} \cdot \frac{0,03}{100} = 0,0002048 \text{ m}_n^3/\text{kg}$$

Minimální objem N₂ ve spalinách

$$V_{N_2min} = \frac{22,4}{28,016} \cdot \frac{N}{100} + 0,7805 \cdot V_{SVZmin} \quad [\text{m}_n^3/\text{kg}] \quad (45)$$

$$V_{N_2min} = \frac{22,4}{28,016} \cdot \frac{0,8}{100} + 0,7805 \cdot 4,414 = 3,451 \text{ m}_n^3/\text{kg}$$

Minimální objem CO₂ ve spalinách

$$V_{CO_2min} = \frac{22,26}{12,01} \cdot \frac{C}{100} + 0,03 \cdot V_{SVZmin} \quad [\text{m}_n^3/\text{kg}] \quad (46)$$

$$V_{CO_2min} = \frac{22,26}{12,01} \cdot \frac{48,3}{100} + 0,03 \cdot 4,414 = 1,028 \text{ m}_n^3/\text{kg}$$

Minimální objem A^r ve spalinách

$$V_{A^rmin} = 0,0092 \cdot V_{SVZmin} \quad [\text{m}_n^3/\text{kg}] \quad (47)$$

$$V_{A^rmin} = 0,0092 \cdot 4,414 = 0,041 \text{ m}_n^3/\text{kg}$$

Minimální objem suchých spalin

$$V_{SSPmin} = V_{A^rmin} + V_{CO_2min} + V_{N_2min} + V_{SO_2min} \quad [\text{m}_n^3/\text{kg}] \quad (48)$$

$$V_{SSPmin} = 0,041 + 1,028 + 3,451 + 0,0002048 = 4,52 \text{ m}_n^3/\text{kg}$$

Minimální objem vodní páry

$$V_{H_2Omin} = \frac{44,8}{4,032} \cdot \frac{H}{100} + \frac{22,4}{18,015} \cdot \frac{W}{100} + (f - 1) \cdot V_{SVZmin} \quad [\text{m}_n^3/\text{kg}] \quad (49)$$

$$V_{H_2Omin} = \frac{44,8}{4,032} \cdot \frac{6,08}{100} + \frac{22,4}{18,015} \cdot \frac{6,503}{100} + (1,018 - 1) \cdot 4,414 = 0,836 \text{ m}_n^3/\text{kg}$$

Minimální objem vlhkých spalin

$$V_{VSPmin} = V_{SSPmin} + V_{H_2Omin} \quad [\text{m}_n^3/\text{kg}] \quad (50)$$

$$V_{VSPmin} = 4,52 + 0,836 = 5,356 \text{ m}_n^3/\text{kg}$$

Přebytek vzduchu na konci ohniště

$$\alpha = \frac{21}{21 - O_2} \quad [-] \quad (51)$$

$$\alpha = \frac{21}{21 - 9,11} = 1,766$$

Skutečné množství vlhkých spalin

$$V_{VSPskut} = V_{VSPmin} + (\alpha - 1) \cdot V_{VZmin} \quad [\text{m}_n^3/\text{kg}] \quad (52)$$

$$V_{VSPskut} = 5,356 + (1,766 - 1) \cdot 4,494 = 8,799 \text{ m}_n^3/\text{k}$$

Minimální množství vlhkých spalin za reálných podmínek

$$V_{VSPreal} = V_{VSPskut} \cdot \frac{t_{sp} + 273,15}{273,15} \cdot \frac{p_{atm}}{p_{sp}} \cdot \dot{M}_{pal} \quad [\text{m}^3/\text{kg}] \quad (53)$$

$$V_{VSPreal} = 8,799 \cdot \frac{221,91 + 273,15}{273,15} \cdot \frac{101325}{98475} \cdot \frac{9,46}{3600} = 0,043 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Skutečný objem CO₂ ve spalinách

Skutečný objem CO₂ za nominálních podmínek:

$$V_{nCO_2} = V_{CO_2min} + (\alpha - 1) \cdot \frac{0,03}{100} \cdot V_{SVZmin} \quad [\text{m}_n^3/\text{kg}] \quad (54)$$

$$V_{nCO_2} = 1,028 + (1,766 - 1) \cdot \frac{0,03}{100} \cdot 4,414 = 1,029 \text{ m}_n^3/\text{kg}$$

Přepočet na reálné podmínky:

$$V_{rCO_2} = V_{nCO_2} \cdot \frac{t_{sp} + 273,15}{273,15} \cdot \frac{p_{atm}}{p_{sp}} \cdot \dot{M}_{pal} \quad [\text{m}^3/\text{kg}] \quad (55)$$

$$V_{rCO_2} = 1,029 \cdot \frac{221,91 + 273,15}{273,15} \cdot \frac{101325}{98475} \cdot \frac{9,46}{3600} = 0,005041 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Přepočet na objemové koncentrace:

$$CO_2 = \frac{V_{rCO_2}}{V_{VSPreal}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (56)$$

$$\text{CO}_2 = \frac{0,005041}{0,043} \cdot 100 = 11,69 \%$$

Koncentrace CO

Přepočet CO_{prum} na [%]

$$\text{CO}_{\text{prum}} = \frac{V_{\text{CO}} \cdot \rho_{\text{CO}}}{10^4} \quad [\%] \quad (57)$$

$$\text{CO}_{\text{prum}} = \frac{162,52 \cdot 1,234}{10^4} = 0,02 \%$$

Množství CO [%] ve spalínách v závislosti na množství O_2

$$\text{CO} = \text{CO}_{\text{prum}} \cdot \frac{21 - \text{O}_{2\text{stand}}}{21 - \text{O}_{2\text{prum}}} \quad [\%] \quad (58)$$

$$\text{CO} = 0,02 \cdot \frac{21 - 13}{21 - 9,11} = 0,013 \%$$

Tepelné ztráty a účinnost

Střední měrná tepelná kapacita spalín

$$c_{\text{pmd}} = 3,6 \cdot \left[\begin{aligned} &0,361 + 0,008 \cdot \left(\frac{t_{\text{sp}}}{1000}\right) + 0,034 \cdot \left(\frac{t_{\text{sp}}}{1000}\right)^2 \\ &+ \left[0,085 + 0,19 \cdot \left(\frac{t_{\text{sp}}}{1000}\right) - 0,14 \cdot \left(\frac{t_{\text{sp}}}{1000}\right)^2\right] \cdot \frac{\text{CO}_2}{100} \\ &+ \left[0,03 \cdot \left(\frac{t_{\text{sp}}}{1000}\right) - 0,2 \cdot \left(\frac{t_{\text{sp}}}{1000}\right)^2\right] \cdot \frac{\text{CO}_2}{100} \end{aligned} \right] \quad [\text{kJ/K} \cdot \text{m}^3] \quad (59)$$

$$c_{\text{pmd}} = 3,6 \cdot \left[\begin{aligned} &0,361 + 0,008 \cdot \left(\frac{221,91}{1000}\right) + 0,034 \cdot \left(\frac{221,91}{1000}\right)^2 \\ &+ \left[0,085 + 0,19 \cdot \left(\frac{221,91}{1000}\right) - 0,14 \cdot \left(\frac{221,91}{1000}\right)^2\right] \cdot \frac{11,69}{100} \\ &+ \left[0,03 \cdot \left(\frac{221,91}{1000}\right) - 0,2 \cdot \left(\frac{221,91}{1000}\right)^2\right] \cdot \frac{11,69}{100} \end{aligned} \right] = 1,361 \frac{\text{kJ}}{\text{K} \cdot \text{m}^3}$$

Redukovaný hmotnostní podíl uhlíku v nespálených zbytcích

$$C_r = A^r \cdot \frac{b}{100} \quad [\%] \quad (60)$$

$$C_r = 0,3616 \cdot \frac{17,81}{100} = 0,064 \%$$

Střední měrná tepelná kapacita vodní páry

$$c_{\text{pmH}_2\text{O}} = 3,6 \cdot \left(0,414 + 0,038 \cdot \left(\frac{t_{\text{sp}}}{1000}\right) + 0,034 \cdot \left(\frac{t_{\text{sp}}}{1000}\right)^2\right) \quad [\text{kJ/m}^3] \quad (61)$$

$$c_{\text{pmH}_2\text{O}} = 3,6 \cdot \left(0,414 + 0,038 \cdot \left(\frac{221,91}{1000}\right) + 0,034 \cdot \left(\frac{221,91}{1000}\right)^2\right) = 1,527 \text{ kJ/m}^3$$

Poměrné ztráty citelným nedopalem

Ztráty citelným teplem spalin:

$$Q_a = (t_{sp} - t_{ok}) \cdot \left[\frac{c_{pmd} \cdot (C - C_r)}{0,536 \cdot (CO + CO_2)} + \frac{c_{pmH_2O} \cdot 1,224 \cdot (9 \cdot H + W)}{100} \right] \text{ [kJ/kg]} \quad (62)$$

$$Q_a = (221,91 - 21,74) \cdot \left[\frac{\left[\frac{1,361 \cdot (48,30 - 0,064)}{0,536 \cdot (0,013 + 11,69)} \right] + \left[\frac{1,527 \cdot 1,224 \cdot (9 \cdot 6,08 + 6,053)}{100} \right]}{100} \right] = 2324 \text{ kJ/kg}$$

Poměrné ztráty citelným teplem spalin:

$$q_a = \frac{Q_a}{Q_i^r} \cdot 100 \quad [\%] \quad (63)$$

$$q_a = \frac{2323}{17455,1} \cdot 100 = 13,315 \%$$

Poměrné ztráty plynným nedopalem

Ztráty plynným nedopalem:

$$Q_b = \frac{12664 \cdot CO \cdot (C - C_r)}{[0,536 \cdot (CO_2 + CO) \cdot 100]} \text{ [kJ/kg]} \quad (64)$$

$$Q_b = \frac{12664 \cdot 0,013 \cdot (48,30 - 0,064)}{[0,536 \cdot (11,69 + 0,013) \cdot 100]} = 13,119 \text{ kJ/kg}$$

Poměrné ztráty plynným nedopalem:

$$q_b = \frac{Q_b}{Q_i^r} \cdot 100 \quad [\%] \quad (65)$$

$$q_b = \frac{13,119}{17455,1} \cdot 100 = 0,075 \%$$

Poměrné ztráty mechanickým nedopalem

Ztráty mechanickým nedopalem:

$$Q_r = \frac{335 \cdot A^r \cdot b}{100} \text{ [kJ/kg]} \quad (66)$$

$$Q_r = \frac{335 \cdot 0,3616 \cdot 17,81}{100} = 22,862 \text{ kJ/kg}$$

Poměrné ztráty mechanickým nedopalem:

$$q_r = \frac{Q_r}{Q_i^r} \cdot 100 \quad [\%] \quad (67)$$

$$q_r = \frac{22,862}{17455,1} \cdot 100 = 0,131 \%$$

Účinnost

$$\eta = 100 - (q_a + q_b + q_r) \quad [\%] \quad (68)$$

$$\eta = 100 - (13,315 + 0,075 + 0,131) = 86,479 \%$$

Celkový tepelný výkon

$$P = \frac{\eta \cdot \dot{M}_{\text{pal}} \cdot Q_i^f}{100 \cdot 3600} \quad [\text{kW}] \quad (69)$$

$$P = \frac{86,479 \cdot 9,46 \cdot 17455,1}{100 \cdot 3600} = 39,666 \text{ kW}$$

7.3.3. Účinnost kotle

Jak již bylo řečeno, účinnost byla vypočtena nepřímou metodou. Spočítaly se ztráty, které se nakonec odečetly od 100% účinnosti. Mezi ztráty uvažujeme ztrátu citelným teplem, ztrátu plynným nedopalem a ztrátu mechanickým nedopalem.

Výsledky účinnosti kotle VERNER A251 a naměřené veličiny jsou zaznamenány v tabulce:

Veličina	Smrkové pelety	Bukové pelety	Švestkové pecky
M_{pal} [kg/h]	7,20	9,46	5,74
p_{spal} [Pa]	98481	98475	98478
t_{spal} [°C]	220,80	221,91	210,70
t_{ok} [°C]	21,22	21,74	21,90
P [kW]	29,09	39,67	24,62
W [%]	7,6990	6,5025	3,8575
A^r [%]	0,7019	0,3616	0,5971
Q_i^r [MJ/kg]	16,7819	17,4551	17,8934
η [%]	86,61	86,48	86,25

Tab. 7-7 Tabulka naměřených veličin a účinnosti

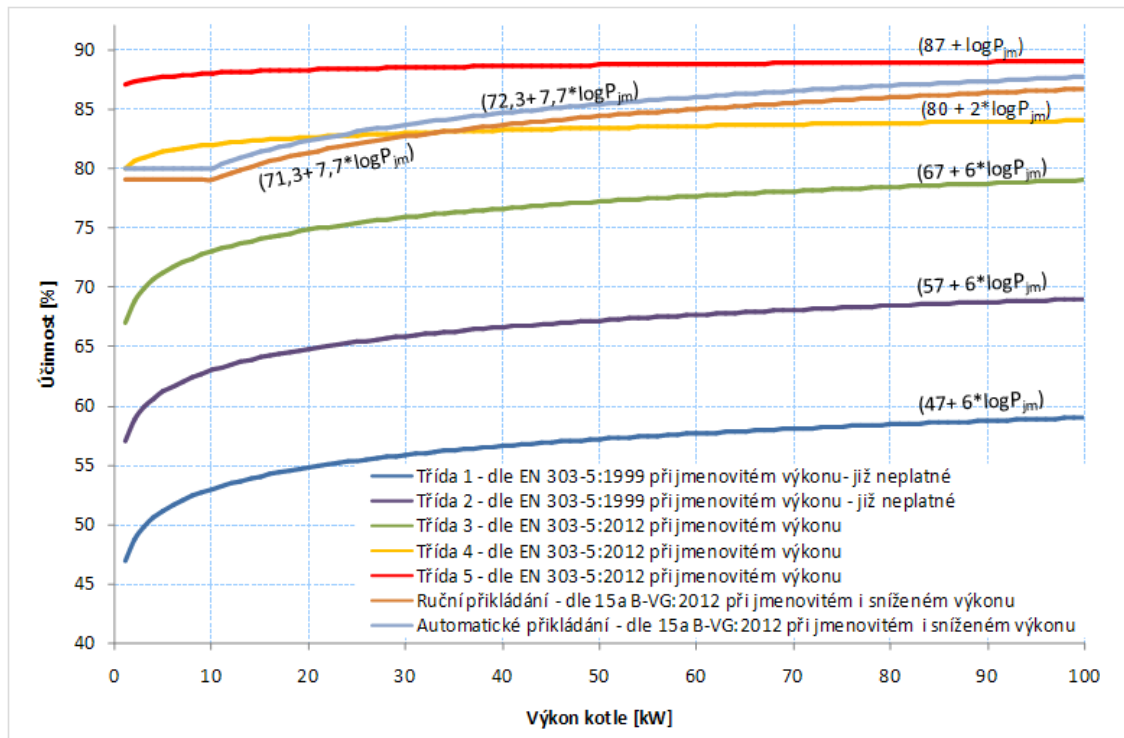
Jako první probíhalo měření smrkových pelet. Dále pokračovaly pelety z buku a nakonec švestkové pecky. Měření probíhalo dostatečně dlouho, abychom byli schopni kotel co nejlépe odladit. Kotel byl dostatečně rozehrátý, jelikož teploty spalin zůstávaly po celou dobu nezměněny. Výjimku tvoří švestkové pecky, kde byla teplota o 10 °C nižší oproti ostatním.

Měření všech paliv probíhalo při 10% obsahu kyslíku O₂. Velké výkonové rozdíly byly způsobeny i hmotnostními toky paliv, jelikož ovládací software kotle má pevně nadefinované intervaly příkládání, které není možné měnit. Přesto jsme se snažili požadovaným podmínkám co nejvíce přiblížit.

Hodnoty účinnosti kotle vyšly téměř stejně pro všechna uvedená paliva. Je to způsobeno tím, že největší ztráta (ztráta citelným teplem nebo komínová ztráta) byla téměř stejná u všech měření. Avšak nejmenší komínovou ztrátu dosáhly pelety ze smrkového dřeva, jak je vidět na výsledku účinnosti, která je nepatrně větší oproti ostatním. Švestkové pecky měly sice nejnižší vlhkost a nejvyšší výhřevnost, ale hodnotami účinnosti nepatrně zaostaly za peletami.

Pelety z buku díky nízkému obsahu popelovin dosáhly nejmenší ztráty mechanickým nedopalem.

Hodnoty účinnosti 86,61 % pro smrkové pelety, 86,48 % pro bukové pelety a 86,25 % pro švestkové pecky se pro jmenovitý výkon 25 kW dle následujícího grafu nachází v emisní třídě 4.



Obr. 7-27 Graf určující emisní třídu kotle[29]

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo vypracovat rešerši týkající se biomasové pelety jako tuhého paliva, popsat konstrukce a typy peletových hořáků a finálně porovnat tři různá paliva z hlediska jejich vlastností, uvolněných emisí a účinnosti kotle. Práce je rozdělena do tří základních částí.

První část popisuje vlastnosti tuhých paliv obecně. Dále popisuje biomasu a některé vybrané obchodní formy, zejména pelety a úzce i brikety. Také se věnuje vlastnostem biomasových pelet a specifikuje tři základní třídy pro maloodběratele (A1, A2, B).

Druhá část se věnuje automatickým kotlům na pelety. Popisuje konstrukci tří různých peletových hořáků (miskový, retortový, trubicový) a způsoby přívodu paliva do spalovacího prostoru (spodní, vodorovný a horní přívod paliva). Pojednává se zde i vhodnost hořáku při spalování pelet méně kvalitních nebo rostlinných.

Třetí část se zabývá měřením vlastností tří zkoušených paliv (smrkové pelety, bukové pelety, švestkové pecky). Byla změřena vlhkost, popelovina a výhřevnost. Smrkové pelety se vyznačují nejvyšší vlhkostí 7,6990 %, nejnižší výhřevností o hodnotě 16,7819 MJ/kg a nejvyšším obsahem popeloviny, který činí 0,7019 %. U bukových pelet byla naměřena vlhkost 6,5025 %, výhřevnost 17,4551 MJ/kg a nejnižší obsah popeloviny 0,3616 %. Nejnižší vlhkosti dosáhly švestkové pecky s hodnotou 3,8575 %, což se pravděpodobně projevilo na výhřevnosti, která vyšla 17,8934 MJ/kg. Obsah popeloviny švestkových pecek činil 0,5971 %.

Součástí poslední, třetí části je také spalovací zkouška. Cílem spalovací zkoušky bylo porovnat paliva z hlediska emisí a účinnosti kotle. Smrkové pelety byly spalovány při 8%, 10%, 12% obsahu kyslíku O₂. Spalování bukových pelet a pecek proběhlo jen při 10% obsahu kyslíku O₂. Spalování pelet a pecek splnilo obecný předpoklad spalování, kdy se při snižujícím obsahu kyslíku zvětšuje množství emisí CO ve spalínách. Jako příklad můžeme použít výsledky spalování smrkových pelet pro tři různé obsahy kyslíku, kde hodnota CO_{ref} vyšla 27,26 mg/m_n³ pro obsah kyslíku O₂ 12,59 %, 41,99 mg/m_n³ pro obsah kyslíku O₂ 9,64 %, 319,74 mg/m_n³ pro obsah kyslíku O₂ 6,77 %. Ohledně zkoušek pro 10% obsah kyslíku O₂ nejlepších výsledků dosáhly smrkové pelety s nejnižší hodnotou CO_{ref}, která vyšla 41,99 mg/m_n³. Za nimi bukové pelety s CO_{ref} o hodnotě 116,01 mg/m_n³ a konečně švestkové pecky s výsledkem 184,31 mg/m_n³. Proběhlo také měření všech paliv v květnu 2017, znovu při 10% obsahu kyslíku O₂. Naměřené hodnoty všech měření byly zprůměrovány a vloženy do tabulky 7-3 na straně 57. Kotel lze zařadit do 3. emisní třídy. Z hlediska množství CO by se snadno vešel i do 5. třídy, ale prach (TZL) vyšel poměrně vysoko (u švestkových pecek až 90 mg/m³). Výrobce kotle uvádí pro zkoušený kotel emisní třídu 3, z čeho vyplývá, že se v současné době nejedná o příliš ekologický kotel. Lepších výsledků emisí by se dosáhlo použitím jiného kotle.

Při výpočtech účinnosti kotle pro zkoušená paliva byly využity hodnoty z května 2017. Hodnoty účinnosti, při konstantním kyslíku 10 %, vyšly téměř shodně pro všechna paliva, přesněji 86,61 % pro smrkové pelety, 86,48 % pro bukové pelety a 86,25 % pro švestkové pecky. Rozhodující komínová ztráta vyšla přibližně stejně u všech měření. Další ztráty se na výsledku účinnosti podepsaly v porovnání s komínovou ztrátou minimálně.

Seznam použitých zdrojů

- [1] LANDA, Stanislav. *Paliva a jejich použití: celostátní vysokoškolská učebnice*. 2., rozš. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1956, 362 s.
- [2] BEDNÁŘ, František. *Kotle na tuhá paliva* [online]. Brno, 2012 [cit. 2018-05-21]. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Marek Baláš.
- [3] BALÁŠ, Marek. *Kotle a výměníky tepla*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013, 119 s. ISBN 978-80-214-4770-7.
- [4] Paliva. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-01-18]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Palivo&oldid=8177764>
- [5] BALÁŠ, Marek, Martin LISÝ a Jiří MOSKALÍK. Kotle – 1. část. In: *TZB-info.cz* [online]. 19.03.2012 [cit. 2017-02-02]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/teorie-a-schemata/8382-kotle-1-cast>
- [6] Sekundární spalování - princip. In: *Nejenkrby.cz* [online]. [cit. 2017-02-03]. Dostupné z: <https://www.nejenkrby.cz/?pn=clanek&cid=85>
- [7] BECHNÍK, Bronislav. Biomasa - definice a členění. In: *TZB-info.cz* [online]. 15.5.2009 [cit. 2017-02-12]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/biomasa/5641-biomasa-definice-a-cleneni>
- [8] VOBOŘIL, David. Biomasa – využití, zpracování, výhody a nevýhody, energetické využití v ČR. *Oenergetice.cz* [online]. 2017 [cit. 2017-02-22]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/obnovitelne-zdroje-energie/biomasa-vyuziti-zpracovani-vyhody-a-nevyhody/>
- [9] Jak funguje výroba energie z biomasy. *Cez.cz* [online]. [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/biomasa/flash-model-jak-funguje-vyroba-energie-z-biomasy.html>
- [10] ČSN EN ISO 17225-2. *Tuhá biopaliva – Specifikace a třídy paliv – Část 2: Tříděné dřevní pelety*.
- [11] Ječmen. In: *Web2.mendelu.cz* [online]. [cit. 2017-02-22]. Dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_222_multitext/krmiva/page.php?lang=cze&id=17
- [12] Katalog plodin. In: *Krv.agrobiologie.cz* [online]. [cit. 2017-02-22]. Dostupné z: http://krv.agrobiologie.cz/atlas/katalog/plodiny/?str_aktualni=3
- [13] Dřevěné brikety. In: *EKObrikety.cz* [online]. [cit. 2017-02-22]. Dostupné z: <http://www.ekobrikety.cz/drevene-brikety.html>
- [14] Dřevní štěpka. In: *Djbt.cz* [online]. [cit. 2017-02-22]. Dostupné z: <http://www.djbt.cz/paliva/produkty/drevni-stepka/>
- [15] KLOBUŠNÍK, Lubomír. *Pelety: palivo budoucnosti*. České Budějovice: Sdružení HARMONIE, 2003, 112 s. ISBN 80-239-1956-3.

- [16] STUPAVSKÝ, Vladimír. Pelety z biomasy - dřevěné, rostlinné, kůrové pelety. In: *Biom.cz* [online]. 2010, [cit. 2018-03-22]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/pelety-z-biomasy-drevene-rostlinne-kurove-pelety>
- [17] LYČKA, Zdeněk. *Dřevní peleta*. Krnov: LING Vydavatelství s.r.o., 2011. ISBN 978-80-904914-0-3.
- [18] LYČKA, Zdeněk. *Dřevní peleta II. 1*. Krnov: LING Vydavatelství s.r.o., 2011. ISBN 978-80-904914-1-0.
- [19] VERNER, Vladimír. Alternativní pelety. *Biom.cz* [online]. 2007, 31. 12. 2007 [cit. 2018-04-22]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/alternativni-pelety>
- [20] Jak funguje plně automatický kotel na pelety?. *Ceskestavby.cz* [online]. 2012, 19. 11. 2012 [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <https://www.ceskestavby.cz/clanky/jak-funguje-plne-automaticky-kotel-na-pelety-21573.html>
- [21] KOLONICKÝ, Jan a kol. *Kotle malých výkonů na pevná paliva*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2542-7.
- [22] STUPAVSKÝ, Vladimír. Peletové vytápěcí soustavy pro rodinné domy. *TZB-info.cz* [online]. 2010 [cit. 2018-01-18]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/peletky/6170-peletove-vytapeci-soustavy-pro-rodinne-domy>
- [23] *ČSN EN 15270: Hořáky spalující pelety pro kotle malých výkonů - Terminologie, požadavky, zkoušení, značení*. Praha: ÚNMZ, 2010, 40 s.
- [24] SEDLÁČEK, Daniel. *Analýza energetického využití kávových pelet* [online]. Brno, 2016 [cit. 2018-04-23]. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Martin Lisý.
- [25] *ČSN EN 13240: Spotřebiče na pevná paliva k vytápění obytných prostorů – požadavky a zkušební metody*. Praha: ČNI, 2002, 60 s.
- [26] *Návod k obsluze a instalaci automatického kotle VERNER A251*. č.v. b026.66200.010311. 2011, 44 s. Dostupné také z: <http://www.kotle-verner.cz/data/sharedfiles/4437/a251-b0266620001031128.pdf>
- [27] *ČSN EN 303-5: Kotle pro ústřední vytápění- Část 5: Kotle pro ústřední vytápění na pevná paliva, s ruční a samočinnou dodávkou, o jmenovitém tepelném výkonu nejvýše 500 kW – Terminologie, požadavky, zkoušení a značení*. TZ: 075303. Praha, ČSN, 2013.
- [28] *Phyllis2 – Database for biomass and waste* [online]. [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: <https://www.ecn.nl/phyllis2/>
- [29] Jaké parametry musí splnit kotle na tuhá paliva?: Legislativa v ČR a Evropě – stav v roce 2017. In: *TZB-info.cz* [online]. 2017 [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/15865-jake-parametry-musi-splnit-kotle-na-tuha-paliva>

Seznam použitých zkratek a symbolů

Značka	Název veličiny	Jednotka
A^f	obsah popeloviny v palivu	[%]
b	množství uhlíku obsaženého v tuhých zbytcích paliva	[%]
C	obsah uhlíku v palivu	[%]
CO	objemová koncentrace CO v suchých spalínách	[%]
CO ₂	objemová koncentrace oxidu uhličitého ve spalínách	[%]
CO _{prum}	průměrná objemová koncentrace CO v suchých spalínách	[%]
c_{pmd}	střední měrná tepelná kapacita spalín	[kJ/K·m ³]
c_{pmH_2O}	střední měrná tepelná kapacita vodní páry	[kJ/K·m ³]
C_r	redukovaný hmotnostní podíl uhlíku v nespálených zbytcích	[%]
D	průměr pelety	[mm]
f	součinitel vlhkosti vzduchu	[-]
h	obsah hořlaviny v palivu	[%]
H	obsah vodíku v palivu	[%]
L	délka pelety	[mm]
m	hmotnost navážky vzorku paliva	[g]
m_1	hmotnost prázdné misky	[g]
m_2	hmotnost misky se vzorkem	[g]
m_3	hmotnost misky s popelem	[g]
m_n	hmotnostní podíl n-tého paliva	[kJ/kg]
M_{pal}	hmotnostní tok paliva	[kg/h]
m_{SD}	hmotnost suchého dřeva	[kg]
m_v	hmotnost vody	[g]
O	obsah kyslíku v palivu	[%]
O ₂	množství kyslíku v průběhu měření	[%]
O _{2prum}	průměrné množství O ₂ v průběhu měření	[%]
O _{2ref}	referenční hodnota kyslíku	[%]
O _{2stand}	standardizované množství kyslíku	[%]
P	celkový tepelný výkon	[kW]
$p^{“}$	absolutní tlak vodní páry na mezi sytosti pro teplotu 20°C	[Pa]
p_{atm}	atmosférický tlak	[Pa]
p_c	celkový absolutní tlak vlhkého vzduchu	[kPa]
p_{SP}	tlak spalín	[Pa]

p_{vz}	tlak vzduchu	[Pa]
q_a	poměrná ztráta citelným teplem	[%]
Q_a	ztráta citelným teplem	[kJ/kg]
q_b	poměrná ztráta plynným nedopalem	[%]
Q_b	ztráta plynným nedopalem	[kJ/kg]
Q_i	výhřevnost	[kJ/kg]
Q_{in}^r	výhřevnost dílčího paliva	[kJ/kg]
q_r	poměrná ztráta mechanickým nedopalem	[%]
Q_r	ztráta mechanickým nedopalem	[kJ/kg]
Q_s	spalné teplo	[kJ/kg]
r	výparné teplo vody	[kJ/kg]
S	obsah síry v palivu	[%]
t_a	teplota měknutí popele	[°C]
t_b	teplota tavení popele	[°C]
t_c	teplota tečení popele	[°C]
t_{ok}	teplota okolí	[°C]
t_{SP}	teplota spalin	[°C]
$V_{A^r_{min}}$	minimální objem A^r ve spalinách	[m ³ /kg]
V_{CO}	naměřené množství oxidu uhelnatého	[mg/m ³]
$V_{CO_2_{min}}$	minimální objem CO ₂ ve spalinách	[m ³ /kg]
$V_{H_2O_{min}}$	minimální objem vodní páry	[m ³ /kg]
V_{nCO_2}	skutečný objem CO ₂ ve spalinách za nominálních podmínek	[m ³ /kg]
$V_{N_2_{min}}$	minimální objem N ₂ ve spalinách	[m ³ /kg]
$V_{O_2_{min}}$	minimální potřebné množství kyslíku	[m ³ /kg]
V_{rCO_2}	skutečný objem CO ₂ ve spalinách za reálných podmínek	[m ³ /kg]
$V_{rVVZ_{min}}$	minimální množství vlhkého vzduchu za reálných podmínek	[m ³ /kg]
$V_{SO_2_{min}}$	minimální objem SO ₂ ve spalinách	[m ³ /kg]
$V_{SSP_{min}}$	minimální objem suchých spalin	[m ³ /kg]
$V_{SVZ_{min}}$	minimální množství suchého vzduchu	[m ³ /kg]
$V_{VSP_{min}}$	minimální objem vlhkých spalin	[m ³ /kg]
$V_{VSP_{real}}$	minimální množství vlhkých spalin za reálných podmínek	[m ³ /kg]
$V_{VSP_{skut}}$	skutečné množství vlhkých spalin	[m ³ /kg]
$V_{VVZ_{min}}$	minimální množství vlhkého vzduchu	[m ³ /kg]
W	vlhkost paliva	[%]

W^r	obsah vody v palivu	[%]
X	aktuální hodnota plynu	[mg/m ³]
X_{ref}	referenční hodnota plynu	[%]
α	přebytek vzduchu na konci ohniště	[-]
η	účinnost kotle	[%]
ρ_{CO}	hustota CO	[kg/m ³]
φ	relativní vlhkost vzduchu	[%]

Seznam obrázků

<i>Obr. 2-1 Závislost výhřevnosti paliva na vlhkosti[6]</i>	19
<i>Obr. 3-1 Ječmen[11]</i>	21
<i>Obr. 3-2 Cukrová řepa[12]</i>	21
<i>Obr. 3-3 Dřevní brikety válcové[13]</i>	22
<i>Obr. 3-4 Dřevní štěpka[14]</i>	22
<i>Obr. 3-5 Pelety z řepkové slámy[16]</i>	23
<i>Obr. 3-6 Pelety ze slunečnice[16]</i>	23
<i>Obr. 3-7 Pelety ze šťovíku[16]</i>	23
<i>Obr. 3-8 Pelety ze sena[16]</i>	23
<i>Obr. 3-9 Dřevěné pelety bez kůry[16]</i>	24
<i>Obr. 3-10 Dřevěné pelety s kůrou[16]</i>	24
<i>Obr. 3-11 Ucpaný rošt</i>	25
<i>Obr. 3-12 Škvára</i>	25
<i>Obr. 3-13 Závislost výhřevnosti běžných dřevních pelet na obsahu vody[17]</i>	26
<i>Obr. 4-1 Spalování se spodním přívodem paliva[21]</i>	31
<i>Obr. 4-2 Spalování s vodorovným přívodem paliva[21]</i>	31
<i>Obr. 4-3 Pánevní ohniště[21]</i>	32
<i>Obr. 4-4 Překlápěcí rošt[21]</i>	32
<i>Obr. 4-5 Miskový hořák[18]</i>	32
<i>Obr. 4-6 Retortový hořák[18]</i>	33
<i>Obr. 4-7 Trubicový hořák[18]</i>	33
<i>Obr. 5-1 Zkoušené paliva, zleva: smrkové pelety, bukové pelety, švestkové pecky</i>	34
<i>Obr. 5-2 KERN MLS</i>	34
<i>Obr. 5-3 Pec VEB ELEKTRO</i>	35
<i>Obr. 5-4 Kalorimetr IKA C 200</i>	37
<i>Obr. 5-5 Držák s víkem rozkladné nádoby, k víku je zapojen zapalovací adaptér</i>	37
<i>Obr. 5-6 Nerezová miska s bavlněným vláknem</i>	37
<i>Obr. 5-7 Sestavená rozkladná nádoba[24]</i>	37
<i>Obr. 7-1 Schéma měřicí aparatury[24]</i>	43
<i>Obr. 7-2 Kotel Verner A251</i>	45
<i>Obr. 7-3 ULTRAMAT Siemens 21 a 22</i>	45
<i>Obr. 7-4 Graf naměřených hodnot pro smrkové pelety, 12% O₂</i>	46
<i>Obr. 7-5 Graf naměřených hodnot pro smrkové pelety, 10% O₂</i>	46
<i>Obr. 7-6 Graf naměřených hodnot pro smrkové pelety, 8% O₂</i>	47

<i>Obr. 7-7 Graf naměřených hodnot pro bukové pelety, 10% O₂.....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 7-8 Graf naměřených hodnot pro švestkové pecky, 10% O₂.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 7-9 Graf naměřených hodnot pro smrkové pelety, 10% O₂ (květen 2017).....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 7-10 Graf naměřených hodnot pro bukové pelety, 10% O₂ (květen 2017).....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 7-11 Graf naměřených hodnot pro švestkové pecky, 10% O₂ (květen 2017).....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 7-12 Graf referenčních hodnot pro smrkové pelety, 12% O₂.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 7-13 Graf referenčních hodnot pro smrkové pelety, 10% O₂.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 7-14 Graf referenčních hodnot pro smrkové pelety, 8% O₂.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 7-15 Graf referenčních hodnot pro smrkové pelety, 10% O₂ (květen 2017).....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 7-16 Graf referenčních hodnot NO pro smrkové pelety.....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 7-17 Graf referenčních hodnot CO pro smrkové pelety.....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 7-18 Graf referenčních hodnot pro bukové pelety, 10% O₂.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 7-19 Graf referenčních hodnot pro bukové pelety, 10% O₂ (květen 2017).....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 7-20 Graf referenčních hodnot NO pro bukové pelety.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 7-21 Graf referenčních hodnot CO pro bukové pelety.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 7-22 Graf referenčních hodnot pro švestkové pecky, 10% O₂.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 7-23 Graf referenčních hodnot pro švestkové pecky, 10% O₂ (květen 2017).....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 7-24 Graf referenčních hodnot NO pro švestkové pecky.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 7-25 Graf referenčních hodnot CO pro švestkové pecky.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 7-26 Souhrnný graf referenčních hodnot NO.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 7-27 Souhrnný graf referenčních hodnot CO.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 7-27 Graf určující emisní třídu kotle[29].....</i>	<i>67</i>

Seznam tabulek

<i>Tab. 2-1 Hrubý rozbor tuhých paliv[3]</i>	17
<i>Tab. 2-2 Vliv prvků na charakteristické teploty[5]</i>	18
<i>Tab. 3-1 Výhody a nevýhody biomasy[8]</i>	20
<i>Tab. 3-2 Specifikace tříděných dřevních pelet pro maloodběratele[10]</i>	27
<i>Tab. 3-3 Parametry dřevních a alternativních pelet[19]</i>	29
<i>Tab. 5-1 Výsledky měření vlhkosti</i>	35
<i>Tab. 5-2 Výsledky měření popeloviny</i>	36
<i>Tab. 5-3 Výsledky měření výhřevnosti</i>	36
<i>Tab. 5-4 Shrnutí výsledků měření – vlastnosti zkoušených paliv</i>	37
<i>Tab. 6-1 Třídy účinnosti dle normy ČSN EN 13240[25]</i>	40
<i>Tab. 7-1 Vybrané parametry automatického kotle Verner A251[26]</i>	44
<i>Tab. 7-2 Parametry paliva před spalováním</i>	45
<i>Tab. 7-3 Průměrné hodnoty z ustáleného měření</i>	57
<i>Tab. 7-4 Mezní hodnoty emisí[27]</i>	59
<i>Tab. 7-5 Hodnoty emisí prachu</i>	59
<i>Tab. 7-6 Vstupní hodnoty a prvkový rozbor[28]</i>	60
<i>Tab. 7-7 Tabulka naměřených veličin a účinnosti</i>	66