



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

# SPALOVÁNÍ PELET Z NEDŘEVNÍ BIOMASY V KOTLECH I

BURNING PELLETS FROM NON-WOOD BIOMASS IN BOILERS I

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Knob

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vladimír Brummer

BRNO 2016



# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav procesního inženýrství
Student:	<b>Jan Knob</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	<b>Ing. Vladimír Brummer</b>
Akademický rok:	2015/16

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:

## **Spalování pelet z nedřevní biomasy v kotlech I**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Zásadní změnou pro výrobce kotlů je zpřísnění emisní vyhlášky a zákona o ovzduší – od roku 2018 bude možné prodávat pouze kotle 4. třídy, které budou splňovat přísnější emisní limity, zejména pro tuhé znečišťující látky (TZL). Snižovat emise kotlů je důležité, protože lokální topeniště jsou jedním z největších zdrojů emisí prachu.

Zvyšuje se poptávka po využívání ekologických paliv, mimo jiné také alternativních tuhých paliv, zejména odpadních produktů ze zemědělství, tzv. agropelet a zároveň se zvyšuje poptávka po kotlech nižších výkonů.

Bude se jednat o prakticky zaměřenou práci. Student se obeznámí s analytickými postupy a bude vykonávat palivářský rozbor agropelet různého složení. V diskusi bude rozebrán vliv složení na funkce kotle, spalování a emise.

### **Cíle bakalářské práce:**

- Stručný úvod do problematiky spalování pelet z nedřevní biomasy v kotlech.
- Rešerše typického složení komerčně dostupných agropelet určených pro spalování v kotlech.
- Experimentální část – palivářský rozbor různých vzorků agropelet.
- Zhodnocení rešeršně a experimentálně získaných poznatků a dat, pokud to bude možné, diskutovat vliv složení agropelet na činnost kotle a emise.

**Seznam literatury:**

VERMA, V.K., S. BRAM, F. DELATTIN, P. LAHA, I. VANDENDAEL, A. HUBIN a J. DE RUYCK. 2012. Agro-pellets for domestic heating boilers: Standard laboratory and real life performance. Applied Energy. 90(1): 17-23. DOI: 10.1016/j.apenergy.2010.12.079. ISSN 03062619. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030626191100002X>

TORVELA, Heikki. c1994. Measurement of atmospheric emissions. London: Springer, ix, 203 s. ISBN 978-1-4471-3484-8.

SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2009/125/ES ze dne 21. října 2009 o stanovení rámce pro určení požadavků na ekodesign výrobků spojených se spotřebou energie. 2009.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.  
ředitel ústavu

---

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

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá spalováním pelet z nedřevní biomasy v kotlech.

V první části teoretické rešerše je biomasa obecně popsána z pohledu paliva, se zaměřením na vlastnosti určující její vhodnost pro přímé spalování v kotlech a nežádoucí emise. V návaznosti jsou shrnuty aktuální i plánovaná legislativní omezení týkající se provozu kotlů malých výkonů. Dále je popsán provoz automatických kotlů, problémy a specifika spojené se spalováním nedřevních pelet a v neposlední řadě byla provedena rešerše mapující složení komerčně dostupných nedřevních pelet a jejich produkci.

V rámci experimentální části byl proveden palivářský rozbor, určující obecné vlastnosti biopaliva – tj. obsah vody, popele, elementární prvkové složení, spalné teplo a výhřevnost – z jehož výsledků byly vystaveny palivové listy testovaných vzorků pelet. Závěrem byl diskutován vliv složení pelet na činnost kotle a emise.

## **ABSTRACT**

This bachelor's thesis deals with combustion of non-woody biomass pellets in boilers.

In the first part of the background research, biomass is generally described in terms of fuel properties, with a focus on characteristics determining its suitability for a direct combustion in boilers and undesirable emissions. In this context, planned legislative restrictions of boilers with a lower operating power are summarized. Furthermore the usage of the automatic boilers, and specific problems associated with combustion of non-woody pellets are described. Final part of the background research focuses on a composition of commercially available non-woody pellets and their production.

Experimental part consists of fuel analysis determining the general properties of the biofuel - i.e. the water and ash content, essential content of elements, lower and higher heating values. Results of analysis are used to put together fuel lists of tested pellets. Conclusion of the experimental part discusses the influence of the pellet composition on the boiler functionality and emissions.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Biomasa, biopalivo, spalování, agropelety, kotel, výhřevnost, palivářský rozbor

## **KEYWORDS**

Biomass, biofuel, combustion, agro-pellets, boiler, lower heating value, fuel analysis



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

KNOB, J. *Spalování pelet z nedřevní biomasy v kotlech I*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 68 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Vladimír Brummer.





## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci „Spalování pelet z nedřevní biomasy v kotlech I“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Vladimíra Brummera a uvedl jsem v seznamu literatury všechny použité literární a odborné zdroje.

V Brně dne 26. 5. 2016

.....  
Jan Knob



## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych rád poděkoval Ing. Vladimíru Brummerovi za vedení, odbornou pomoc a cenné připomínky při vypracovávání této práce.

Tato práce vznikla za podpory a na přístrojovém vybavení NETME Centre, regionálního výzkumného a vývojového centra vybudovaného z finančních prostředků Operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace v rámci projektu NETME Centre (Nové technologie pro strojírenství), Reg. č.: CZ.1.05/2.1.00/01.0002 a podporovaného v navazující fázi udržitelnosti prostřednictvím projektu NETME CENTRE PLUS (LO1202) za finančního přispění Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory programu “Národní program udržitelnosti I“.

## OBSAH

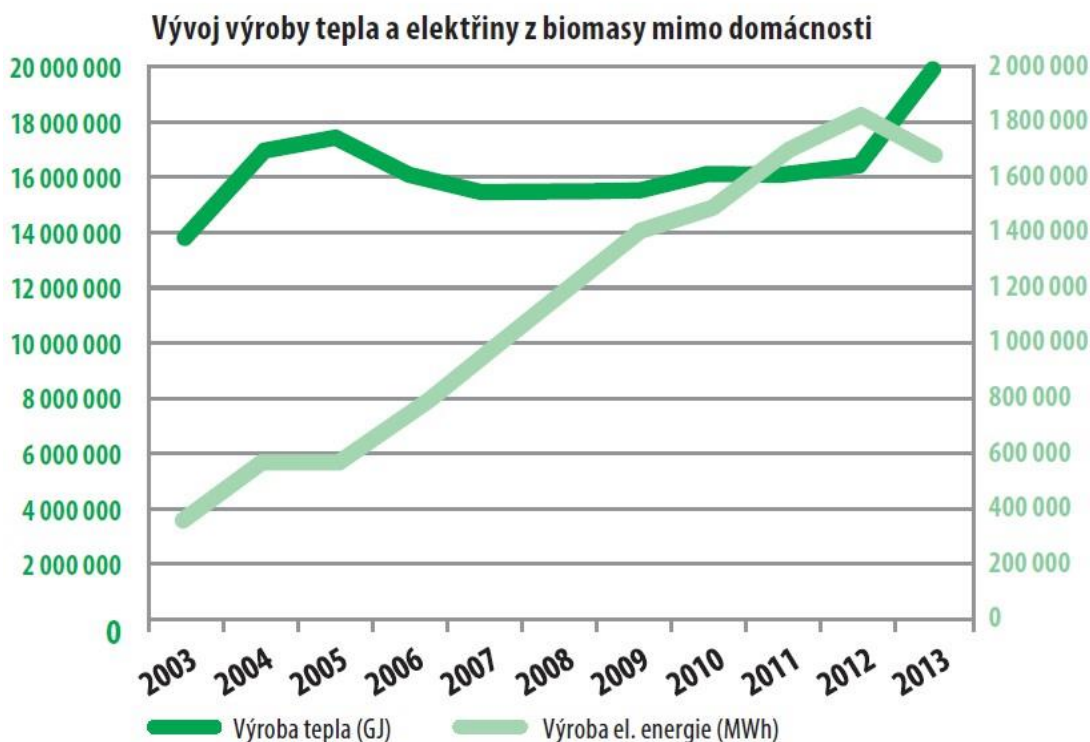
<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>DEFINICE A VYMEZENÍ POJMŮ .....</b>	<b>16</b>
	2.1.1 <i>Biomasa .....</i>	16
	2.1.2 <i>Agropeleta .....</i>	16
	2.1.3 <i>Spalné teplo .....</i>	16
	2.1.4 <i>Výhřevnost .....</i>	16
	2.1.5 <i>TZL .....</i>	16
<b>3</b>	<b>SPALOVÁNÍ PELET Z NEDŘEVNÍ BIOMASY V KOTLECH .....</b>	<b>17</b>
3.1	VLASTNOSTI BIOMASY OVLIVŇUJÍCÍ SPALOVÁNÍ.....	17
	3.1.1 <i>Spalné teplo a výhřevnost .....</i>	17
	3.1.2 <i>Vlhkost .....</i>	17
	3.1.3 <i>Hořlavina .....</i>	18
	3.1.4 <i>Popelovina .....</i>	18
3.2	SPALOVÁNÍ BIOMASY .....	19
	3.2.1 <i>Rosný bod spalin a koroze .....</i>	19
3.3	EMISE.....	19
	3.3.1 <i>Oxid uhelnatý .....</i>	20
	3.3.2 <i>Oxidy dusíku .....</i>	20
	3.3.3 <i>Oxid siřičitý .....</i>	20
	3.3.4 <i>Chlorované aromatické sloučeniny (PCDD/F) .....</i>	20
	3.3.5 <i>TZL – Tuhé znečišťující látky .....</i>	20
3.4	LEGISLATIVA .....	20
3.5	KOTLE NA SPALOVÁNÍ PELET .....	21
	3.5.1 <i>Peletový hořák .....</i>	22
	3.5.2 <i>Skladování pelet .....</i>	23
<b>4</b>	<b>SLOŽENÍ KOMERČNĚ DOSTUPNÝCH AGROPELET .....</b>	<b>24</b>
4.1	PŘEHLED ZDROJŮ BIOMASY .....	24
4.2	ÚPRAVA BIOMASY .....	25
	4.2.1 <i>Brikety .....</i>	26
	4.2.2 <i>Pelety .....</i>	26
4.3	PLATNÉ NORMY PRO VÝROBU PELET .....	26
	4.3.1 <i>Nedřevní pelety dle normy ČSN EN ISO 17225 .....</i>	26
4.4	SLOŽENÍ KOMERČNĚ DOSTUPNÝCH AGROPELET .....	27
	4.4.1 <i>Organické odpady .....</i>	28
	4.4.2 <i>Seno, sláma obilovin a olejnin .....</i>	28
	4.4.3 <i>Rostliny pro energetické účely .....</i>	28
	4.4.4 <i>Fermentační zbytky z bioplynových stanic .....</i>	30
	4.4.5 <i>Odpadní papír .....</i>	30
<b>5</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>31</b>

5.1	VYBRANÉ VZORKY PELET .....	31
5.1.1	<i>Sláma</i> .....	31
5.1.2	<i>Šťovík</i> .....	31
5.1.3	<i>Digestát</i> .....	32
5.1.4	<i>Dřevo</i> .....	32
5.2	EXPERIMENTÁLNÍ METODY A VÝPOČTY .....	32
5.2.1	<i>Stanovení sušiny a obsahu vody</i> .....	32
5.2.2	<i>Stanovení ztráty žiháním</i> .....	33
5.2.3	<i>Elementární prvková analýza</i> .....	35
5.2.4	<i>Stanovení spalného tepla kalorimetrickou metodou</i> .....	38
5.2.5	<i>Výpočet výhřevnosti</i> .....	40
5.2.6	<i>Výpočet spalného tepla z výsledků elementární analýzy</i> .....	42
<b>6</b>	<b>VÝSLEDKY A DISKUSE</b> .....	<b>44</b>
6.1.1	<i>Stanovení sušiny a obsahu vody, ztráty žiháním</i> .....	44
6.1.2	<i>Elementární prvková analýza</i> .....	47
6.1.3	<i>Stanovení spalného tepla kalorimetrickou metodou</i> .....	50
6.1.4	<i>Výpočet výhřevnosti</i> .....	51
6.1.5	<i>Výpočet spalného tepla z elementární analýzy</i> .....	52
6.1.6	<i>Palivové listy testovaných vzorků</i> .....	53
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>54</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b> .....	<b>56</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ</b> .....	<b>60</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>62</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>63</b>
<b>12</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....	<b>64</b>
<b>13</b>	<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>65</b>
13.1	<i>PŘÍLOHA Č. 1: PALIVOVÝ LIST VZORKU AGROPELETY ZE SLÁMY</i> .....	65
13.2	<i>PŘÍLOHA Č. 2: PALIVOVÝ LIST VZORKU AGROPELETY ZE ŠŤOVÍKU</i> .....	65
13.3	<i>PŘÍLOHA Č. 3: PALIVOVÝ LIST VZORKU AGROPELETY Z DIGESTÁTU</i> .....	67
13.4	<i>PŘÍLOHA Č. 4: PALIVOVÝ LIST VZORKU DŘEVĚNÉ PELETY</i> .....	68

# 1 ÚVOD

V důsledku postupnému poklesu celosvětových zásob fosilních paliv roste význam obnovitelných zdrojů energie (OZE). V našich geografických podmínkách můžeme uvažovat např. vodní energii, větrnou energii, energii slunečního záření, nebo energii biomasy [1].

Z výsledků statistického zjišťování Ministerstva průmyslu a obchodu vyplývá, že využívání OZE v ČR meziročně mírně stoupá, viz obr.1. K velkému meziročnímu nárůstu dochází především u výroby elektřiny z biomasy, což je způsobeno stoupajícím podílem kombinované výroby elektrické energie a tepla z biomasy, jež podstatně zvyšuje účinnost zařízení [2]. Celkový dlouhodobý nárůst využití energie z biomasy je mimo jiné důsledkem operačních programů čerpajících prostředků z Evropské unie, jejichž cílem je podpořit účinné nakládání s energiemi, rozvoj energetické infrastruktury a obnovitelných zdrojů energie, zavádění nových technologií v oblasti nakládání energií druhotných surovin, ale i podpora samotných zemědělců v pěstování biomasy [3]. V oblasti lokálních topenišť a kotlů přispívají k nárůstu takzvané „kotlíkové dotace“, zřizované Ministerstvem životního prostředí a Státním fondem životního prostředí ČR [4].



Obr. 1 Vývoj výroby tepla a elektřiny z biomasy mimo domácnosti [3]

V roce 2014 činil podíl OZE na celkové spotřebě energie v ČR 13,4 %. Spalování biomasy tvořilo 60 % veškeré energie pocházející z obnovitelných zdrojů. Dalších 27 % pak představovalo další využití biomasy v podobě bioplynu a kapalných biopaliv [5]. Z těchto závěrů vyplývá, že majoritní podíl na využívání OZE má právě biomasa.

Spalování biomasy přináší celou řadu výhod. Stejně jako fosilní paliva je možné biomasu uchovávat. Její energie tak není závislá na okamžitém využití a může sloužit k vytvoření určité energetické zásoby. Celkovou produkci biomasy lze do značné míry regulovat. Spalování biomasy je také co se týče bilance CO<sub>2</sub> neutrální, protože množství vyloučeného

CO<sub>2</sub> do ovzduší při spalování biomasy je stejné jako množství CO<sub>2</sub> z ovzduší odebrané při procesech fotosyntézy, probíhajících během růstu rostliny. V porovnání se spalováním fosilních paliv se tak zmírňuje negativní dopad na životní prostředí [2].

Při srovnání s ostatními OZE, které jsou ze své podstaty plně vázány na přírodní podmínky (vítr, existence vodního toku, přímý sluneční svit), lze energii biomasy využít téměř kdekoliv. Společně s relativně nízkou vstupní investicí je spalování biomasy vhodné ve velké míře také k využití v domácnostech [6].

Tato práce bude zaměřena především na biomasu nedřevního charakteru, která se následně tvarově zpracovává do podoby pelet a spaluje v kotlech, tzv. agropelety.

## **2 DEFINICE A VYMEZENÍ POJMŮ**

### **2.1.1 Biomasa**

Substance biologického původu (pěstování rostlin v půdě nebo ve vodě, chov živočichů, produkce organického původu, organické odpady). Je buď záměrně získávána jako výsledek výrobní činnosti, nebo se jedná o využití odpadů ze zemědělské, potravinářské a lesní výroby, z komunálního hospodářství, z údržby krajiny a péče o ni [2].

### **2.1.2 Agropeleta**

Agropeleta, nedřevní nebo alternativní peleta je zhutněné nedřevní biopalivo vyrobené z biomasy rozdrčené nebo namleté na prášek, sjednocené do válečků o průměru < 25 mm, náhodné délky [7]

### **2.1.3 Spalné teplo**

Udává množství tepla, které se uvolní dokonalým spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na teplotu 20 °C. Při této teplotě kondenzuje vodní pára vzniklá z obsahu vody v palivu a ze spálení vodíku [8].

### **2.1.4 Výhřevnost**

Ze spalného tepla se získá výpočtem. Udává množství tepla, které se uvolní dokonalým spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na zvolenou teplotu, ale vzniklá pára nekondenzuje, zůstává ve formě páry. Je tedy o kondenzační teplo menší než spalné teplo [8].

### **2.1.5 TZL**

Tuhými znečišťujícími látkami jsou nazývány částice různých velikostí, tvaru, původu a struktury, které jsou za teploty a tlaku v komíně, výduchu, výpusti nebo při měření emisí přítomny v odpadním plynu v pevném skupenství a jsou jím unášeny [9].



### 3 SPALOVÁNÍ PELET Z NEDŘEVNÍ BIOMASY V KOTLECH

V této části práce je nastíněna problematika spalování agropelet v kotlech. Jsou popsány obecné vlastnosti biomasy ovlivňující spalování, jejich vliv na kvalitu spalování a bezproblémovou činnost spalovacího zařízení. Dále je zmíněn vznik emisí spalovacího procesu, legislativní opatření regulující spalování agropelet a v neposlední řadě také konstrukce a provoz spalovacích zařízení – kotlů.

#### 3.1 Vlastnosti biomasy ovlivňující spalování

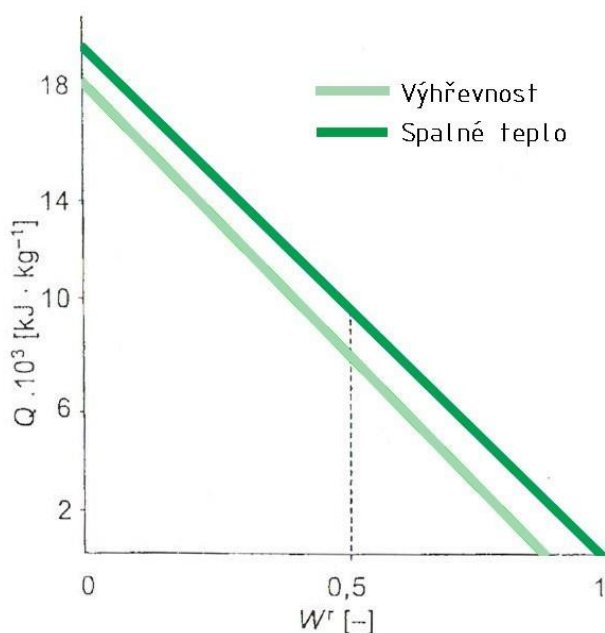
Biomasa má řadu vlastností, které významně ovlivňují její možnosti a vhodnost využití jako palivo při spalování v kotlech. Mezi nejdůležitějšími uvedeme spalné teplo, výhřevnost, vlhkost a obsah popelovin, které budeme u vybraných vzorků sledovat i v experimentální části.

##### 3.1.1 Spalné teplo a výhřevnost

Jedním z nejdůležitějších parametrů biomasy určené pro spalování je hodnota spalného tepla a výhřevnosti. Spalné teplo se určuje stanoveným postupem v kalorimetru [10]. Výhřevnost se ze spalného tepla zjišťuje počteně. Udává množství tepla, které se uvolní dokonalým spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na zvolenou teplotu, ale vzniklá pára nekondenzuje a zůstává ve formě páry. Výhřevnost je tedy o kondenzační teplo vody menší než spalné teplo a udává reálnou energii získanou spálením [8].

##### 3.1.2 Vlhkost

Vlhkost udává obsah vody ve vzorku a ovlivňuje vlastnosti paliva i vlastnosti spalin. Zvýšený obsah vody v palivu snižuje podíl hořlaviny v palivu, spalné teplo a také výhřevnost paliva. Při spalování hraje vlhkost významnou roli a zásadně ovlivňuje výhřevnost paliva, viz obr. 2 [2].



Obr. 2 Graf závislosti výhřevnosti a spalného tepla dřevního odpadu na vlhkosti [8]

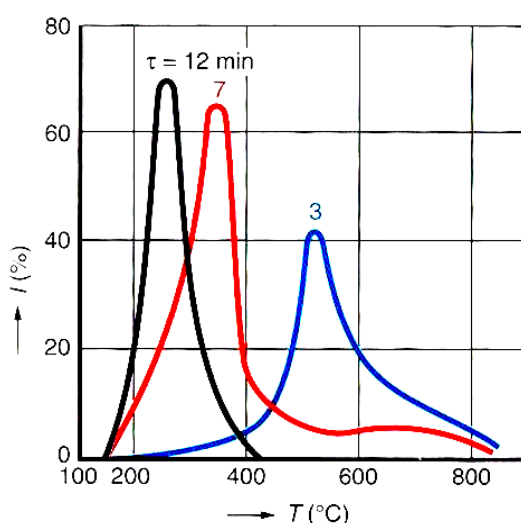
V energetice se vyjadřuje obsah vody na základě relativní vlhkosti vztahem [11]:

$$w_w = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100 \quad (1)$$

kde  $w_w$  – obsah vody ve vzorku [% hm.]  
 $m_1$  – hmotnost původního vzorku [kg]  
 $m_2$  – hmotnost vzorku po vysušení [kg]

### 3.1.3 Hořlavina

Důležitou složkou paliva je taktéž hořlavina, která je nositelkou tepelné energie uvolněné při spalování a tvoří ji uhlík, vodík, dusík, síra a kyslík. Hořlavinu dělíme na prchavou a neprchavou. Důležitým parametrem paliva je podíl prchavé hořlaviny, která se na začátku spalování od teploty cca 200 °C začne uvolňovat v podobě plynu a podstatně napomáhá k vznícení paliva v ohništi a stabilizuje spalovací proces. Podíl prchavé hořlaviny se u paliv z biomasy pohybuje okolo 70 %, což je výrazně více než u fosilních paliv (koks 4-13 %). Na obr. 3 můžeme sledovat, že při určité teplotě se v průběhu uvolňování objevuje ostré maximum, kdy se z biomasy vylučuje převážná část celkového obsahu prchavé hořlaviny. Při konstrukci spalovacího zařízení se s touto skutečností musí počítat a upravit poměr přívodu primárního a sekundárního spalovacího vzduchu. Kdyby prchavá hořlavina přicházela do prostoru ohniště bez dokonalého promísení se spalovacím vzduchem, nedošlo by k jejímu dokonalému vyhoření, což by mělo za následek vysokou tepelnou ztrátu a vysoké emise nežádoucího CO [2][12][13].



Obr. 3 Graf intenzity uvolňování prchavé hořlaviny ze smrkové kůry při různých teplotách a časových intervalech 3, 7, 12 min [2]

### 3.1.4 Popelovina

Popelovinu tvoří minerální látky (křemičitany, uhličitany, draselné soli, sírany a další) které jsou obsaženy v palivu před jeho spálením. Spálením vzniká tuhý zbytek, kterému říkáme popel. Pro provoz kotlů je velmi důležité zejména to, jak se popel při různých teplotách chová. To určují tzv. charakteristické teploty popele. Jsou jimi teplota měknutí, která udává nejnižší teplotu, při které se začne popel nalepovat na výhřevné plochy a tím zhorší prostup tepla ze spalin do media kotle, teplota tavení a také teplota tečení, při níž dojde k roztavení popele. V mnoha případech se stává, že nánosy popelovin, které se nalepují na keramické

stěny předtopeniště, difundují do vyzdívky a ta se potom po tenkých vrstvách odlupuje. Obsah popelovin je u biopaliv v porovnání s fosilními palivy velmi nízký, avšak u stébelnin je znatelně vyšší (okolo 5 %) než u dřeva (0,5 – 1 %). Naopak charakteristické teploty popele jsou u biopaliv znatelně nižší. Především u stébelnin nastává měknutí popele už od 700 °C, což způsobuje, že již při relativně nízkých teplotách dochází k obtížím spojených s natavováním popele. To je také jeden z hlavních důvodů, proč v praxi nelze používat kotle určené výhradně na dřevní pelety pro pelety nedřevní [12][2].

### 3.2 Spalování biomasy

Spalování je chemický pochod, při kterém se hořlavé prvky obsažené v hořlavině paliva slučují s kyslíkem za uvolňování tepla. Spalovací reakce se označují za reakce exotermické a dokonalé spalování probíhá podle chemických vztahů [2]:



Snahou konstruktérů a provozovatelů spalovacích zařízení je paliva spalovat dokonale, to znamená takovým způsobem, že se při spalování přemění chemicky vázaná energie paliva v energii tepelnou bez tepelných ztrát. V praxi se můžeme bezztrátovému spalování pouze více či méně přiblížit, v závislosti na druhu paliva a spalovacím zařízení. To, jak efektivně transformace chemicky vázaného tepla v palivu probíhá udává tepelná účinnost, která je definována poměrem výrobního tepla a tepla do kotle přivedeného [1]. Na tepelnou účinnost se bere zřetel i při zařazení spalovacího zařízení do dané emisní třídy dle ČSN EN 303-5 [14].

#### 3.2.1 Rosný bod spalin a koroze

Rosný bod spalin je teplota, při které začíná kondenzovat pára ve spalinách. Při podkročení této teploty v oblasti zadního tahu kotle dochází ke kondenzaci páry na výměňkových plochách a je-li ve spalinách pára kyseliny sírové, dochází k silné korozi [15]. V případě biopaliv složených z obilnin, které mívají několikanásobně vyšší obsah chloru než ostatní biopaliva, můžeme poukázat na problém sloučenin chloru (převážně Cl<sub>2</sub> a HCl) ve spalinách, které by v plynné fázi tak korozivní účinek neměly, avšak po kondenzaci na výměňkových plochách silnou korozi způsobují [16].

Zkušenosti z provozu kotlů na biomasu ve Skandinávii zase ukazují, že nejintenzivnější koroze je spojena s usazeninami popele, obsahujícími chloridy alkalických kovů, především pak chloridu draselného. Tento jev je pravděpodobně spojen s přítomností méně tavitelných eutektických směsí, které mohou již při teplotách 340 °C tvořit tekutá jádra uvnitř usazenin a reagovat s kovy, případně s vrstvičkami oxidů v kotli .

### 3.3 Emise

Při spalování biomasy vznikají stejné základní látky jako při spalování jiných organických paliv, především CO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O. V závislosti na vedení a podmínkách spalovacího procesu a na sloučeninách obsažených ve spalovaném palivu vzniká množství dalších látek, které jsou považovány za látky znečišťující. V emisích se kontrolují hlavní znečišťující látky CO – oxid uhelnatý, SO<sub>2</sub> – oxid siřičitý, NO<sub>2</sub> – oxidy dusíku vyjádřené sumárně jako NO<sub>x</sub>, TOC (OGC) – celkový organický uhlík, kterým se rozumí úhrnná koncentrace všech

organických látek s výjimkou metanu, CH<sub>4</sub> – metan a TZL – tuhé znečišťující látky neboli prach [2][1].

### **3.3.1 Oxid uhelnatý**

Je produktem nedokonalého spalování. Omezení emisí CO docílíme dostatečnou teplotou spalování a dostatečným množstvím spalovacího vzduchu tak, aby mohl být CO oxidován na CO<sub>2</sub> [2].

### **3.3.2 Oxidy dusíku**

Termické NO<sub>x</sub> vznikají v případě vysokých teplot, které však nejsou při spalování biomasy obvyklé. Při teplotách běžných pro spalování biomasy (700 až 900 °C) vznikají z dusíku obsaženém v palivu především palivové NO<sub>x</sub> [2].

### **3.3.3 Oxid siřičitý**

Jelikož je síra v biomase obsažena většinou pouze v malém množství, emise SO<sub>2</sub> jsou z jejího spalování velmi nízké a to je jedna z velkých předností biopaliv [2].

### **3.3.4 Chlorované aromatické sloučeniny (PCDD/F)**

U paliva z biomasy s větším obsahem chloru, například u obilovin, vzniká riziko tvorby nebezpečných chlorovaných aromatických sloučenin, především dioxinů (PCDD/F). Důležitým faktorem pro množství emisí PCDD/F je kvalita spalovacího procesu a způsob úpravy paliva. Kvalitou spalovacího procesu rozumíme dodržování dostatečně vysoké teploty (vyšší než 800 °C), dostatečné doby hoření paliva v ohništi a dobré promíchávání paliva během hoření. Dobrou úpravou paliva, především pak snížením jeho vlhkosti, můžeme pozitivně ovlivnit kvalitu spalovacího procesu. Experimentálně však byla potvrzena i závislost emisí PCDD/F na vysokém obsahu vody v palivu bez ohledu na kvalitu spalovacího procesu. Hodnoty emisí PCDD/F se snižují i přítomností síry v palivu [18][19].

### **3.3.5 TZL – Tuhé znečišťující látky**

TZL vznikající při spalování pocházejí z popeloviny nebo z produktů nedokonalého spalování, jež jsou tvořeny sazemi, zkondenzovanými uhlovodíky a dehty. Při špatně provozovaném spalovacím zařízení zastaralého typu může prach z nedokonalého spalování tvořit až 90 % z celkových emisí TZL. Optimalizací spalovacího procesu, tedy zajištěním dostatečně vysoké teploty ve spalovací komoře a dostatečně dlouhé doby setrvání spalin v této teplotě, je prach tvořen převážně částicemi popeloviny, čímž je množství možných emisí prachu výrazně redukováno. Emise tuhých částic, především ze spalování drobného dřevního odpadu, lze následně minimalizovat použitím vhodných odlučovačů [20].

## **3.4 Legislativa**

Významné legislativní omezení prodeje kotlů na tuhá paliva přichází s novou evropskou směrnicí o ekodesignu pro kotle a kamna na tuhá paliva 2009/125/ES [21]. Dle této emisní vyhlášky musejí všechny kotle na tuhá paliva uváděné na trh i do provozu od 1. 1. 2018 vyhovovat emisním limitům na úrovni 4. emisní třídy (dle ČSN EN 303-5 [14]) a od 1. 1. 2020 následně emisním limitům na úrovni 5. emisní třídy (dle ČSN EN 303-5 [14]), které máme uvedeny v přehledné tabulce, viz Tab. 1.

Tab. 1 Limity 5. emisní třídy pro kotle na tuhá paliva (při 10 % podílu O<sub>2</sub>), platné od 1. 1. 2020 [14]

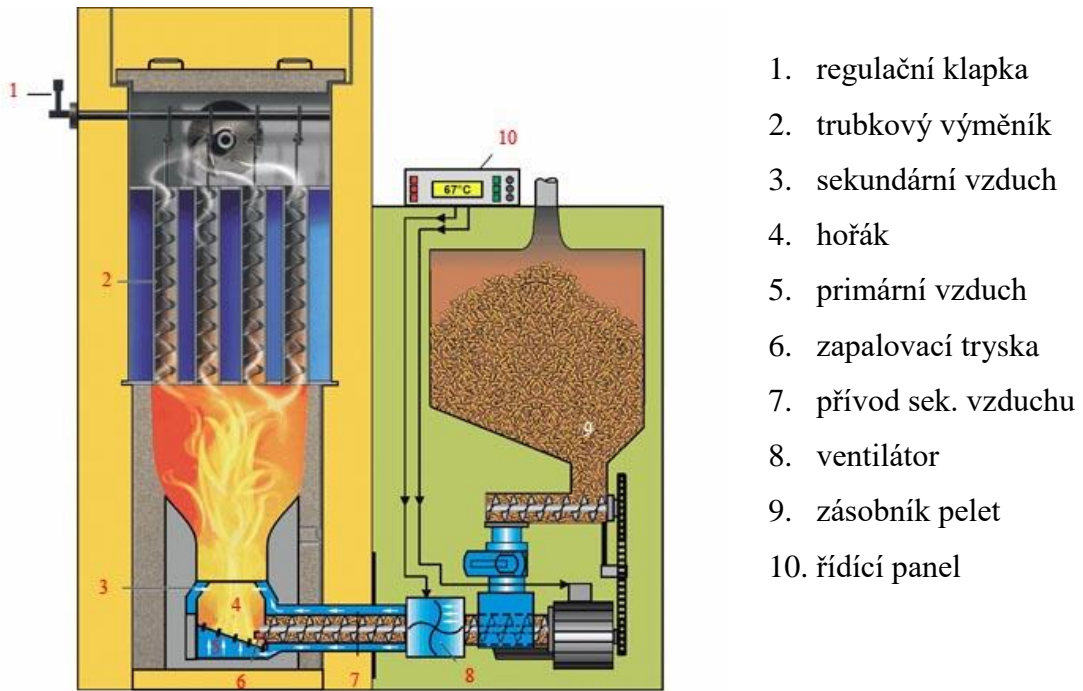
Kotle na tuhá paliva – parametry pro ekodesign	Limitní hodnoty – 5. emisní třída
Sezónní energetická účinnost vytápění [%]	75 (kotle o výkonu ≤ 20 kW) 77 (kotle o výkonu ≥ 20 kW)
Tuhé znečišťující látky (TZL) [mg/m <sup>3</sup> ]	40 (automaticky provozované kotle) 60 (manuálně provozované kotle)
Organické plynné sloučeniny (OGC) [mg/m <sup>3</sup> ]	20 (automaticky provozované kotle) 30 (manuálně provozované kotle)
Oxid uhelnatý (CO) [mg/m <sup>3</sup> ]	500 (automaticky provozované kotle) 700 (manuálně provozované kotle)
Oxidy dusíku (NO <sub>x</sub> ) [mg/m <sup>3</sup> ]	200 (kotle na biomasu) 350 (kotle na fosilní paliva)

### 3.5 Kotle na spalování pelet

S ohledem na problematiku efektivního spalování nedřevních agropelet se pro jejich spalování využívají výhradně automatické kotle. Moderní peletové kotle dokáží díky přesnému elektronicky řízenému systému dávkování paliva a spalného vzduchu zajistit nízké emise a dobré spalovací podmínky s velkou efektivitou a vysokou účinností až 94 %. Na trhu nalezneme širokou výkonovou škálu převážně teplovodních kotlů v rozmezí cca 15 - 100 kW. Objevuje se i velké množství průmyslových kotlů s výkonem dosahujícím až 2 500 kW. Většina kotlů dokáže efektivně pracovat i na nižší výkon a kotle jsou tak plně využitelné pro domácí použití ve všech ročních obdobích. Řadě výrobců se podařilo vyvinout univerzální kotle, které jsou schopné spalovat jak dřevěné pelety, tak agropelety, obilí a další řadu paliv (společnost VERNER a.s. uvádí u svého kotle VERNER A251 celkem 61 odzkoušených druhů paliv [22]) [23][24].

Tělo kotle je tvořeno venkovním opláštěváním, které tepelně izoluje spalovací proces od okolního prostředí, tak aby nedocházelo ke zbytečným ztrátám. Z boku bývá umístěn zásobník pelet, ze kterého se šnekovým dopravníkem dávkuje pelety přímo do spalovacího hořáku, který tvoří nejzásadnější část kotle. Pelety hoří za přísunu optimálního poměru primárního a sekundárního vzduchu ve spalovacím prostoru hořáku a výsledné teplo se posléze teplovodním trubkovým výměníkem dostává ven do systému. Otvor pro komínové připojení je optimalizován podle výkonu, typu kotle a výšky komína dle platné ČSN a realizován nejčastěji v Ø 150 až 200 mm. Spaliny odchází komínovým systémem do ovzduší a zbylý popel se v závislosti na typu hořáku odvádí pryč. Častým způsobem odvodu popele z topeniště bývá šnekový dopravník, nebo pohyblivý rošt dopravující popel do separované nádrže. O celý proces se, v závislosti na typu paliva, potřebném výkonu a požadovaných parametrech, stará sofistikovaná řídicí jednotka poskytující pohodlné a plně automatické uživatelské prostředí [26].

Schématický popis jednotlivých částí automatického kotle na pelety lze vidět na obr. 4.

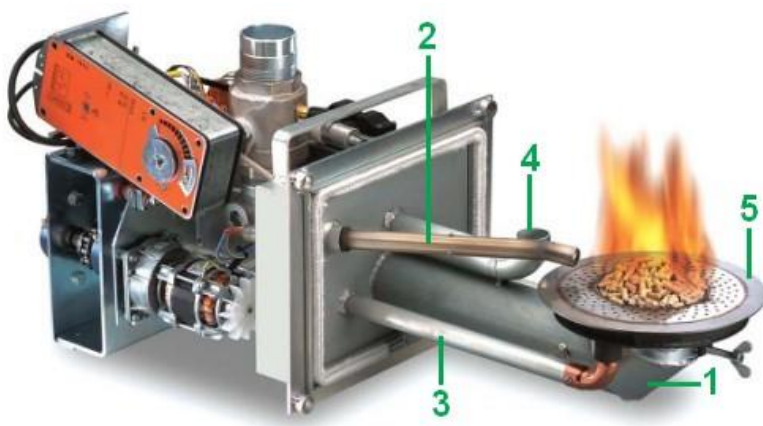


1. regulační klapka
2. trubkový výměník
3. sekundární vzduch
4. hořák
5. primární vzduch
6. zapalovací tryska
7. přívod sek. vzduchu
8. ventilátor
9. zásobník pelet
10. řídicí panel

Obr. 4 Schéma automatického kotle na pelety [27]

### 3.5.1 Peletový hořák

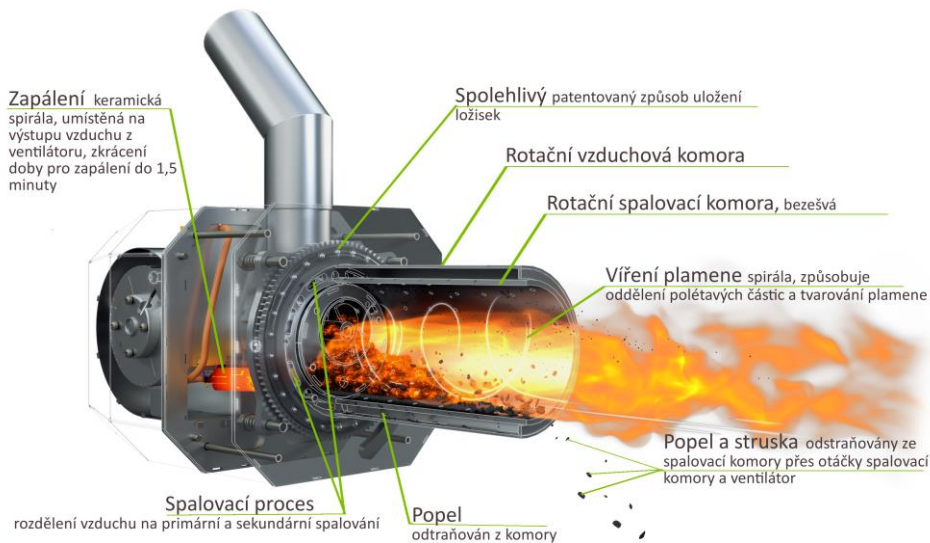
Peletový hořák tvoří jednu z nejdůležitějších součástí kotle na pelety. Jeho vhodnou konstrukcí se totiž přímo ovlivňuje spotřeba paliva, účinnost zařízení, trvanlivost, tvorba emisí a také se od něj obvykle odvíjí celková cena zařízení. Zajišťuje trvalý, regulovatelný a nezávislý přísun paliva i vzduchu a bezobslužný odvod popele. Peletové kotle nabízejí standardně podsuvný nebo hrncový typ hořáku. Zapalování kotle se děje automaticky, horkým vzduchem, přičemž přísun paliva a vzduchu v hořáku se reguluje na základě vyhodnocení údajů o teplotě výstupní vody, teplotě spalin a informací z pokojového termostatu nebo venkovního čidla. Pelety jsou dávkovány na odhořivací talíř nebo šnekovým dopravníkem do odhořivacího hrnce. Pro snadnější údržbu a servis bývají hořáky často vyměnitelné. Výrobci nabízejí i samostatné hořáky, které jsou konstruovány pro daný typ paliva a lze je instalovat i do kotlů, které původně ke spalování takových paliv určeny nebyly [23][24]. Obr. 5 schématicky zobrazuje hořák využívající spodní přísun paliva.



1. spodní přívod paliva se šnekovým podavačem
2. zapálení vzduchem rozžhaveným elektrickým odporem
3. primární přísun vzduchu
4. sekundární přísun vzduchu
5. popel odpadávající přes okraj talíře

Obr. 5 Peletový hořák [23]

Zajímavé technické řešení peletového hořáku uskutečnila společnost BLAZE HARMONY s.r.o. Hořák díky rotační spalovací komoře zabraňuje spékání popele na stěnu, čímž je dosaženo vysokého samočisticího účinku bez ohledu na kvalitu a parametry paliva, viz obr. 6 [25].



Obr. 6 Rotační peletový hořák Blaze Harmony XS [25]

### 3.5.2 Skladování pelet

Pelety je možné skladovat v oddělených skladech, ze kterých se ke kotli dopravují nejčastěji šnekovým dopravníkem, vakuovým sacím systémem nebo kombinací obojího. Oddělený sklad totiž umožní přechovávat velké množství pelet a dopravníkovým systémem je zajištěna naprostá autonomie provozu [26]. Na obr. 7 lze vidět oddělený sklad využívající kombinace šnekového dopravníku a navazujícího sacího potrubí.

Další variantou, zobrazenou na obr. 8, je instalace velkoobjemových textilních vaků (big bag), které standardně pojmu až 1200 kg paliva. Přísun paliva do kotle je zajištěn samospádem – nebo externím dopravníkem [22].

Při menším potřebném množství pelet můžeme pelety vsypávat ručně do zásobníku, který je osazen přímo na kotli, nebo do mezizásobníku, který je osazen vedle kotle, ten je zpravidla konstruován tak, aby pojmul takové množství pelet, které vystačí na vytápění po dobu jednoho dne, případně i týdne [26].



Obr. 7 Kotelna s odděleným skladem pelet [23]



Obr. 8 Big bag [22]

## 4 SLOŽENÍ KOMERČNĚ DOSTUPNÝCH AGROPELET

Pelety využívané v ČR můžeme rozdělit na 2 velké skupiny – dřevní a nedřevní (agropelety). Zatímco dřevní pelety jsou hojně využívány i v zařízeních o malých výkonech, prakticky veškerá spotřeba pelet nedřevních je realizována v sektoru velké energetiky, tedy v teplárnách a elektrárnách [28].

Výsledky statistického zjišťování Ministerstva průmyslu a obchodu ČR uvádějí, že dřevních pelet bylo v ČR v roce 2013 vyrobeno 163 tisíc tun a spotřebováno 68 tisíc tun. Drtivá většina výroby jde na export, který se již několik let drží nad 100 tisíci tunami. Část tuzemské poptávky je tak kryta dovozy z Ukrajiny, Slovenska, Polska, Běloruska i Ruska. V roce 2013 bylo dovezeno 36 tisíc tun dřevních pelet [28].

Nedřevních pelet bylo v ČR v roce 2013 vyrobeno 131 tisíc tun a 18 tisíc tun bylo na náš trh dovezeno. K exportu téměř nedochází. V současné době je evidováno více jak 100 výrobců rostlinných pelet a lze odhadovat, že výrobní kapacita zařízení přesahuje hodnoty 400 tis. tun/rok. Celková produkce je tak závislá především na přírodních podmínkách a bohatosti zemědělské úrody [28]. Základní bilanci od roku 2004, kdy se v ČR vyskytl první výrobce nedřevních pelet, můžeme vidět v tab. 2.

Tab. 2 Základní bilance nedřevních pelet na českém trhu, hodnoty uvedené v tisících tun [28]

Rok	Produkce	Dovoz	Vývoz	Spotřeba - tuzemský trh vč. zásob
2003	-	-	-	-
2004	1	-	-	1
2005	7	-	-	7
2006	26	-	-	26
2007	40	2	-	42
2008	60	2	-	62
2009	110	10	-	120
2010	169	7	3	173
2011	148	25	7	166
2012	192	17	-	209
2013	131	18	-	149

### 4.1 Přehled zdrojů biomasy

S ohledem na energetický význam biomasy a jejích následných produktů se v našich podmínkách převážná část biomasy využívá ke spalování. Můžeme ji dělit na biomasu odpadní, kterou tvoří zbytky stavebního a dřevozpracujícího průmyslu, odpady a nevyužité produkty jiné zemědělské činnosti, a biomasu cíleně pěstovanou pro energetické využití [2].

Některé formy biomasy, jako např. odpady z živočišných chovů (hnůj, chlévská mrva, zbytky krmiv) se ke spalování nehodí. Hlavními aspekty jsou především vysoká vlhkost, velký obsah látek, které zhoršují kvalitu spalování, nebo vytváří nebezpečné emise. U těchto forem biomasy je možné zvolit jiný způsob energetického využití. Příkladem může být výrobu bioplynu anaerobní fermentací [26].

Pro názorné rozdělení i s uvedenými příklady poslouží Tab. 3.



Tab. 3 Dělení biomasy vhodné ke spalování [2]

	ZDROJ	PŘÍKLAD
ODPADNÍ BIOMASA	Lesnictví a dřevozpracující průmysl	<ul style="list-style-type: none"> <li>• dřevo a těžební odpad z lesního hospodaření</li> <li>• spalitelný odpad z pilařské výroby, dřevozpracujícího a papírenského průmyslu</li> </ul>
	Zemědělství	<ul style="list-style-type: none"> <li>• rostlinné sklizňové zbytky zemědělské prvovýroby, zejména sláma obilná a řepková</li> <li>• odpady z provozů na zpracování a skladování rostlinné produkce</li> <li>• odpady z lihovarů a konzerváren (např. rostlinné obaly olejnatých semen)</li> </ul>
	Organická biomasa	<ul style="list-style-type: none"> <li>• kaly z odpadních vod, organický podíl tuhých komunálních odpadů</li> <li>• odpady z jatek, odpady z mlékáren</li> <li>• organické zbytky zemědělské výroby, zejména chlévská mrva, zbytky krmiv</li> </ul>
CÍLENĚ PĚSTOVANÁ BIOMASA	Biomasa energetických plodin 1. generace	<ul style="list-style-type: none"> <li>• řepka a palma olejná na FAME a čistý řepkový olej</li> <li>• pšenice a kukuřice (v USA) na bioethanol</li> <li>• žitovec (triticale) na pelety</li> </ul>
	Biomasa energetických plodin 2. generace (tzv. lignocelulózní plodiny)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• dřeviny: např. topoly, vrby nebo v teplejších oblastech eukalyptus</li> <li>• nedřevnaté rostliny: energetický šťovík, ozdobnice, proso dvojřadé aj.</li> </ul>

## 4.2 Úprava biomasy

Pro efektivní využití biomasy je nutné vstupní surovinu náležitě upravit. Tyto procesy zpravidla vyžadují přidanou energii, a je proto nutné optimalizovat formu tak, aby byla potencionální energie výsledného produktu efektivní v porovnání s dodanou energií při zpracování. Zejména se jedná o sušení biomasy a její mechanickou úpravu. Při sušení je snaha dosáhnout optimální vlhkosti pro následné mechanické úpravy a vysokou efektivitu spalování. Nejčastější mechanickou úpravou nedřevní biomasy je lisování do briket nebo pelet. Lisováním se docílí zmenšení objemu, což usnadňuje skladování, přepravu i dávkování do kotlů. Na trhu se lze vedle briket a pelet jednodruhových (z jednoho druhu biomasy) setkat i s tzv. směsnými briketami, které obsahují více druhů plodin.

### 4.2.1 Brikety

Brikety se lisují nejčastěji do tvaru válců o průměru 40 až 100 mm a délky do 300 mm. Lze je spalovat v kotlech na dřevo, v krbech, v kachlových kamnech i v kotlech ústředního vytápění. Hodí se zejména pro domácí použití, kde mohou sloužit jako alternativa k tradičnímu kusovému dřevu [29].

### 4.2.2 Pelety

Pelety se lisují do tvaru válců a od briket se liší zejména menší velikostí. Nejčastěji jsou vyráběny v průměru 6 mm a různorodé délce 5 – 40 mm. Lze je používat v široké výkonové škále kotlů a kamen v rodinných domech i ve větších budovách. Jejich nespornou výhodou oproti briketám je možnost automatické dodávky do spalovací komory a z toho plynoucí bezobslužný provoz zdroje tepla [30][31].

Pelety se lisují bez dalších přídavných směsí, pojiv nebo lepidel. Při výrobě proto hraje důležitou roli zejména vlhkost zpracovaného materiálu. Ten by měl mít při vstupu do granulárního procesu vlhkost 10 – 12 %. Sušší materiál vyžaduje složitější zpracování, ale výsledkem jsou velmi kvalitní granule. Vlhčí materiál (do 18 %) snižuje dlouhodobou kvalitu finálního produktu. Přesto, že se lépe granuluje a zaručí peletám zpočátku větší soudržnost, později se začnou drobit. Velikost částic materiálu ke granulaci je upravována šrotováním a neměla by přesahovat 1/5 průměru finálních granulí, přičemž platí, že čím jemnější je struktura materiálu ke granulaci, tím lepší je výsledná pevnost pelet. Poslední úpravou před samotnou granulací je zvlhčení nebo napaření samotného materiálu. Nejedná se přitom o vlhčení do hloubky. Materiál se navlhčí pouze povrchově, čímž dojde k nabobtnání a uvolnění lepivých látek a různých silic ze svrchní části materiálu. Tato vnesená vlhkost se následně odpaří za granulacím lisem v chladiči granulí. Samotná granulace se následně provádí na speciálních peletovacích lisech, kde za vysokého tlaku vzniká finální produkt. Čím vyšší tlak je použit, tím pevnější jsou vzniklé pelety [32]. Palivové pelety lze také vyrábět na linkách pro granulovaná krmiva. Jistou nevýhodou je poddimenzování šrotovníku a malý lisovací tlak, což má za následek menší soudržnost pelet. Lze tak ale účelně zvýšit využití těchto zařízení mimo sezónu výroby vitamínových krmných granulí [2].

## 4.3 Platné normy pro výrobu pelet

Od 1. listopadu 2014 vstoupila v platnost nová mezinárodní norma ISO 17225, které byla následována českou normou ČSN EN ISO 17225. Obecná část normy ČSN EN ISO 17225-1 definuje klasifikaci tuhých paliv podle původu a rozlišuje dřevní, bylinnou a ovocnou biomasu. Následujících 6 dalších částí normy se týká neprůmyslového použití ve spalovacích zařízeních do 500 kW a blíže specifikují jednotlivé druhy paliv: dřevní pelety, dřevní brikety, dřevní štěpku, palivové dřevo, nedřevní pelety a nedřevní brikety. Zatímco u obecné části normy jsou parametry spíše informativní, zde jsou parametry normativní a přísnější, protože malá spalovací zařízení v hustě zalidněných oblastech nedisponují nejnovějšími regulacemi, nečistí kouřové plyny a neobsluhují je profesionálně [33].

### 4.3.1 Nedřevní pelety dle normy ČSN EN ISO 17225

Nedřevní pelety mohou být podle normy ČSN EN ISO 17225-6 [7] vyráběny z bylinné (rostliny bez dřevitého stonku), z ovocné a vodní biomasy. Do této normy se řadí také různé směsi surovin na bázi biomasy. Nedřevní pelety se normativně dělí do dvou tříd A a B. Ve třídě A jsou přísnější parametry pro obsah vody, popele a některých prvků. Průměr

nedřevních pelet může být dle normy od 6 do 25 mm. Norma také identifikuje několik specifických typů nedřevních pelet podle vstupní suroviny, jako např. pelety z obilné slámy [7].

#### 4.4 Složení komerčně dostupných agropelet

Z porovnání dat statistického průzkumu Ministerstva průmyslu a obchodu ČR [5] s daty produkce firmy Ekover [34] vyplývá, že téměř 80 % veškeré výroby agropelet v ČR je produkováno jako licenční palivo Ekover. Družstvo Ekover poskytuje lokálním zemědělcům licenci na výrobu certifikovaných paliv. Ekover zaštiťuje aktuálně 70 licenčních výrobců a již šestým rokem produkuje cca 100 tisíc agropelet ročně. Účastníci projektu mají jednoduše zajištěnu technologii na výrobu pelet, certifikaci paliva dle zákonných norem, podporu při získávání dotací, velkoodbyt u hlavních výrobců elektřiny a tepla v ČR a mohou tak samostatně zpracovávat vlastní materiál, který posléze sami prodají jako finální produkt. Ekover v současnosti vede celkem 10 licencovaných druhů agropelet, které jsou uvedeny v tab. 4, některé z nich jsou zobrazeny na obr. 9 – 12 [34].

Tab. 4 Licenční paliva EKOVER [34]

Název	Materiálové složení
EKOVER	Odpady z čištění zrna
EKOVER S	Seno, sláma obilovin či olejnin
EKOVER T	Celé rostliny triticales (žitovec) – sláma včetně zrna
EKOVER O	Celé rostliny obilovin či olejnin pro energetické účely
EKOVER F	Fermentační zbytky z bioplynových stanic
EKOVER OM	90 % EKOVER O a 10 % masokostní moučky
EKOVER SM	90 % EKOVER S a 10 % masokostní moučky
EKOVER P	Odpadní papír
EKOVER SP	70 % sláma obilovin a olejnin a 30 % druhotně nevyužitelný papír
EKOVER OP	70 % EKOVER O a 30 % druhotně nevyužitelný papír



Obr. 9 Peleta EKOVER [35]



Obr. 10 Peleta EKOVER S [35]



Obr. 12 Peleta EKOVER O [35]



Obr. 11 Peleta EKOVER F [35]

#### 4.4.1 Organické odpady

Jedná se převážně o odpady z čištění semen zemědělských plodin. Obsahují hlavně: zlomky semen, povrchové vrstvy semen, nestandardní semena, plevy, pluchy, osiny, kousky ostatních částí rostlin, semena plevelů a nekulturních rostlin, biologický odol. Dále také i otruby, sladové plevy, sladový prach, mouky nevhodné k potravinářským nebo krmným účelům [34]. Příkladem jsou pelety řepkové a slunečnicové, tvořené odpadem získaným při lisování řepkového a slunečnicového oleje.

Dalším potenciálním zdrojem této odpadní suroviny, na jehož využití firma Ekover v současné době pracuje, je oddělený sběr odpadů – vznikajících při sklizni zrnin ve sklízecích mlátičkách. Doposud jsou tyto odpady rozmetány po sklizeném poli současně při sklizni zrnin. Využití tohoto odpadu má navíc vedlejší efekt v postupném odplevelení polí a tedy v omezení chemické ochrany rostlin proti plevelům [34].

Organické odpady se vyznačují malou vlhkostí, max. do 13 %. Z tohoto důvodu není třeba kalkulovat s nutností dosoušení suroviny při výrobě paliva [34].

#### 4.4.2 Seno, sláma obilovin a olejnin

Seno a sláma, jinak hojně využívané jako hospodářské krmivo a stelivo, tvoří zajímavý potenciál pro výrobu pelet. Řada z obilovin a olejnin pěstovaných pro prvotní využití obilného či olejného semene se vyznačuje poměrně statným vzrůstem. Po procesu vymlácení tak zpravidla zůstává velký podíl nadzemní hmoty, tj. slámy. Technologie pěstování a sklizně obilovin a olejnin, včetně skladování slámy, je dobře známá a propracovaná do relativní dokonalosti [2]. V peletách se můžeme setkat se slámou z těchto plodin:

- pšenice
- žito
- ječmen
- oves
- kukuřice
- řepka olejná
- slunečnice

#### 4.4.3 Rostliny pro energetické účely

Rostliny bylinného charakteru, cíleně pěstované pro získávání energie, lze rozdělit na několik skupin. Z praktického hlediska se tyto rostliny dělí na jednoleté a víceleté či vytrvalé. Dále lze tyto rostliny členit podle botanického zařazení, například na energetické obiloviny,

energetické trávy a celou další velkou skupinu rostlin dvouděložných. Do této skupiny se pak řadí vzrůstné statné rostliny, zpravidla netradiční, z nichž některé byly dříve pěstovány jako plodiny zemědělské, nebo se jedná o rostliny okrasné, nebo i planě rostoucí. Hlavním kritériem rostlin pro energetické účely jsou nízké nároky na pěstování a vysoké výnosy nadzemní hmoty. Rozšíření pěstování těchto plodin bude záviset též na vývoji zemědělské politiky v EU [36]. Uvedeme si několik nejvýznamnějších zástupců, které se na našem území pěstují.

### **Triticale (žitovec)**

Jednoletá obilnina, kříženec žita a pšenice. Pěstování energetických obilovin má nespornou výhodu v tom, že je technologie jejich produkce i sklizně zemědělci důvěrně známa a že zde není třeba žádné speciální mechanizace. Sklizeň lze zajistit posekáním na řádky a po doschnutí celý objem hmoty sebrat, slisovat do balíků a následně celou rostlinu včetně zrna použít na výrobu pelet. Termín sklizně celých rostlin je však třeba stanovit tak, aby nebylo obilí přezralé, neboť by pak mohlo dojít k vyšším ztrátám v důsledku výtoku zrna. Při skladování takovýchto balíků je pak třeba zajistit ve skladech ochranu proti hlodavcům. Celková výtěžnost suché hmoty žitovce (sláma + zrno) se pohybuje kolem 10–12 t/ha [36].

### **Šťovík krmný (Šťovík Uteuša)**

Vytrvalá bylina, jež vydrží na svém stanovišti až 18 let, je křížencem špenátu a šťovíku ťanšanského. Šťovík krmný je statná, 1,5–2 m vysoká rostlina odolná vůči vymrzání, nemá žádné vyhraněné nároky na stanoviště. A daří se jí dobře v nížinách i ve vyšších polohách. Protože je to vysoce vzrůstná plodina, potřebuje ke svému růstu a vývoji dostatek živin v půdě. V chudších půdách je vhodné vydatnější hnojení, včetně hnojení organického. Po založení kultury dochází k první sklizni až v druhém roce po vysetí. Pro výrobu agropellet lze šťovík sklízet jako celou nadzemní hmotu, včetně plodů, a to při plné zralosti rostliny. V tomto případě je lodyha již dostatečně vyschlá, což je z hlediska získání kvalitního fytopaliva vždy velmi důležité. Šťovík se sklízí buď kombajnem, pokud je třeba sklízet zvlášť plody, které mají velmi dobrou krmnou hodnotu, nebo silážní řezačkou. Pěstování šťovíku je vyobrazeno na obr. 15 a obr. 16. Při sklizni celkové nadzemní hmoty dosahuje krmný šťovík při dozrání vysokých výnosů, v rozsahu 15–25 t/ha suché hmoty [2][36].



*Obr. 15 Šťovíkové pole v prvním roce o zasetí [2]*



*Obr. 16 Sklizeň šťovíku [37]*

### **Konopí seté**

Jednoletá, 2–3 m vysoká bylina. Konopí je deklarováno jako teplomilná rostlina, avšak daří se mu velmi dobře i ve vyšších polohách, díky dostatečnému množství srážek v těchto oblastech. Pro výrobu agropelet lze využívat celých rostlin, nebo jen odpady po jeho zpracování na vlákna, či papír a pod. Při sklizni způsobují lýková vlákna i značná výška rostlin často potíže a je tak třeba odzkoušet nejvhodnější typ žacího ústrojí. Výnosy nadzemní suché hmoty konopí se pohybují od 8,5 až do 16 t/ha [36].

#### **4.4.4 Fermentační zbytky z bioplynových stanic**

Výsledkem fermentačního procesu v bioplynové stanici je stabilizovaný materiál v kapalné podobě, tzv. digestát, který lze odvodněním převést do tuhé formy. Potenciální množství suroviny závisí na rozvoji bioplynových stanic využívajících převážně rostlinné vstupní materiály. V těchto případech je vhodné vysoušet fermentační zbytky odpadním teplem z bioplynové stanice a poté je granulací přetvořit na palivo [34][38].

#### **4.4.5 Odpadní papír**

Množství odpadního papíru vhodného k výrobě paliv závisí na momentální ceně sběrných surovin na trhu. V období propadu tržních cen dosahuje množství této suroviny tisíce tun ročně [34].

## 5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V této části práce je popsán provedený palivářský rozbor vybraných vzorků agropelet, který zahrnuje experimentální stanovení sušiny a obsahu vody dle ČSN EN 12880 [11], experimentální stanovení ztráty žháním dle ČSN EN 15169 [39], elementární prvkovou analýzu (C, H, N, S), stanovení spalného tepla kalorimetrickou metodou v tlakové nádobě a výpočet výhřevnosti dle ČSN ISO 1928 [10] a výpočet spalného tepla z elementární analýzy. V rámci práce nebyly zjišťovány charakteristické teploty popele (teplota tavení, měknutí a tečení) a nebyla provedena termická analýza (TGA). Ze zjištěných vlastností budou na závěr sestaveny palivové listy pro jednotlivé vzorky.

### 5.1 Vybrané vzorky pelet

Předmětem experimentálního měření jsou celkem 4 vzorky pelet neznámého původu. Jedná se o 3 vzorky agropelet - ze slámy, z krmného šťovíku a z digestátu. Měřené vzorky agropelet doplňuje pro následné srovnání 1 vzorek dřevní pelety. Část každého vzorku byla pro potřeby prováděných zkoušek rozemleta do podoby prášku laboratorním mlýnkem IKA A 11 basic.

Vzorek můžeme rozdělit na 3 složky – vodu, hořlavinu a popelovinu. Jednotlivé charakteristiky budeme vztahovat samostatně - k vzorku v dodaném stavu (horní index a), k bezvodému vzorku (horní index dr), nebo k samotné hořlavině vzorku (horní index daf).

#### 5.1.1 Sláma

Vzorek tvořen slámou blíže nespecifikované obilniny či olejninu představuje pelety s největším průměrem z vybraných vzorků. Může se jednat i o peletu směsnou, složenou ze slámy více druhů rostlin, viz. obr. 15.



*Obr. 17 Sláma*

#### 5.1.2 Šťovík

Vzorek tvořen celými rostlinami krmného šťovíku, viz. obr. 16.



*Obr. 18 Krmný šťovík*

### 5.1.3 Digestát

Vzorek tvořen digestátem,- odvodněným zbytkem fermentačního procesu v bioplynové stanici, viz. obr. 17.



Obr. 19 Digestát

### 5.1.4 Dřevo

Vzorek tvořen dřevěným odpadem, dle světlé barvy pouze pilinami bez obsahu kůry, viz. obr. 18.



Obr. 20 Dřevo

## 5.2 Experimentální metody a výpočty

Jednotlivé části obsahují základní popis dané zkoušky, postup měření, následné zpracování dat a vzorce pro výpočty požadovaných hodnot. Všechna měření probíhala v laboratořích Ústavu procesního inženýrství umístěných ve výzkumném centru - Netme Centre.

### 5.2.1 Stanovení sušiny a obsahu vody

Zkouška stanovení sušiny a obsahu vody určená normou ČSN EN 12880 [11] spočívá ve vysušení vzorku do konstantní hmotnosti v sušárně při teplotě  $105\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ . Z rozdílu hmotnosti vzorku před sušením a po sušení se vypočte koncentrace veškerých látek ve vzorku, který odpovídá obsahu sušiny  $w_{dr}$ . Dále lze dopočítat obsah vody  $w_w$ .

K provedení zkoušky byly použity tyto přístroje a pomůcky:

- Sušárna řízená termostatem, s nucenou cirkulací vzduchu, udržující teplotu  $105\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$
- Exsikátor obsahující vysoušedlo – silikagel
- Analytické váhy Denver instrument SI-603 měřící s přesností na tisíce gramů
- Odpařovací porcelánová miska odolná vůči  $550\text{ °C}$

Jak dovoluje norma, zkouška stanovení podílu sušiny a zkouška stanovení ztráty žíháním (viz. 5.2.2) byla provedena ve dvou po sobě jdoucích krocích ve stejné misce. Prázdné a označené odpařovací misky tedy bylo nejprve nutné 30 min žíhat v peci při teplotě  $550\text{ °C}$ . Vyžíhané misky byly zchlazeny na keramickém obložení pultu, vloženy do exsikátoru a následně jednotlivě zváženy ( $m_a$ ). Do každé misky byl přidán vzorek v rozdrčeném stavu a celá miska byla i se vzorkem opět zvážena ( $m_b$ ). Množství vzorku se pohybovalo v rozmezí



0,6–1,6 g, tedy tak, aby měla získaná sušina hmotnost nejméně 0,5 g – jak určuje norma [11]. Misky se vzorky byly poté sušeny v sušárně při teplotě 105 °C. Doba sušení byla, stanovena na doporučení vedoucího práce, na cca 6 hod, což je dle praktických zkušeností již dostatečná doba na vysušení tohoto typu vzorku. Vysušené vzorky byly následně zchlazeny v exsikátoru a společně s miskou opět zváženy ( $m_c$ ). Manipulaci s miskou a vzorkem byla prováděna za pomoci kovových kleští a plastové naběračky, aby nedošlo ke styku s kůží a následnému navázání vlhkosti nebo jiných látek na miskou se vzorkem, což by mohlo ovlivnit výsledky měření.

Obsah sušiny  $w_{dr}$  a obsah vody  $w_w$  vyjádřené v hmotnostních procentech se vypočítá podle následujících vzorců [11]:

$$w_{dr} = \frac{m_c - m_a}{m_b - m_a} \cdot 100 \quad (5)$$

$$w_w = 100 - w_{dr} \quad (6)$$

kde  $w_{dr}$  – obsah sušiny ve vzorku [% hm.];

$w_w$  – obsah vody ve vzorku [% hm.];

$m_a$  – hmotnost prázdné misky [g];

$m_b$  – hmotnost misky s navážkou vzorku [g];

$m_c$  – hmotnost misky s vysušeným vzorkem [g];

$m_d$  – hmotnost misky se zbytkem po žíhání [g].

Výsledná hodnota obsahu sušiny  $w_{dr}$  a obsahu vody  $w_w$  byla stanovena jako aritmetický průměr třech měřených vzorků daného typu pelet.

### 5.2.2 Stanovení ztráty žíháním

Stanovení ztráty žíháním v odpadech, kalech a sedimentech určuje norma ČSN EN 15169 [39]. Principem zkoušky je žíhání zkušební vzorku do konstantní hmotnosti v peci při teplotě 550 °C ±25 °C. Z rozdílu hmotnosti před a po žíhání se vypočte ztráta žíháním v sušině  $W_{LOI}^{dr}$  a zbytku po žíhání, který odpovídá obsahu popele v sušině  $A^{dr}$ .

K provedení zkoušky byly použity tyto přístroje a pomůcky:

- Muflová pec udržující teplotu 550 °C ±25 °C
- Exsikátor obsahující vysoušedlo – silikagel
- Analytické váhy Denver instrument SI-603 měřící s přesností na tisícinu gramů
- Odpařovací porcelánová miska odolná vůči 550 °C

Jak již bylo zmíněno v kapitole, zkouška byla provedena v těsné návaznosti na zkoušku stanovení sušiny a obsahu vody. Všechny provedené kroky předcházející zkoušce stanovení ztráty žíháním – od vyžíhání zkušebních misek až po konečné vážení misky s vysušeným vzorkem – jsou popsány v kapitole 5.2.1. Po zvážení misky s vysušeným vzorkem ( $m_c$ ) byly všechny vzorky vloženy do pece, kde byly žíhány při teplotě 550 °C, po dobu 1 hod, což je dle praktických zkušeností dostatečně dlouhá doba k úplnému vyžíhání vzorku tohoto druhu. Vyžíhané vzorky byly ochlazeny na keramickém obložení pultu po dobu několika minut.

Stále teplé vzorky byly přesunuty do exsikátoru a zchlazeny na teplotu okolí. Misky s vyžíhanými vzorky byly následně jednotlivě zváženy ( $m_d$ ).

Ztráta žíháním v sušině  $W_{LOI}^{dr}$  a obsah popele v sušině  $A^{dr}$  se vypočítají dle vzorců [39]:

$$W_{LOI}^{dr} = \frac{m_c - m_d}{m_c - m_a} \cdot 100 \quad (7)$$

$$A^{dr} = 100 - W_{LOI}^{dr} \quad (8)$$

kde  $W_{LOI}^{dr}$  – ztráta žíháním v sušině [% hm.];

$A^{dr}$  – obsah popele v sušině [% hm.];

$m_a$  – hmotnost prázdné misky [g];

$m_c$  – hmotnost misky s vysušeným vzorkem [g];

$m_d$  – hmotnost misky se zbytkem po žíhání [g].

Výsledná hodnota ztráty žíháním v sušině  $W_{LOI}^{dr}$  a obsahu popele v sušině  $A^{dr}$  byla stanovena jako aritmetický průměr třech změřených vzorků daného typu pelet.

Sušina vzorku je tvořena pouze popelem a hořlavinou. Ztráta žíháním v sušině  $W_{LOI}^{dr}$  tedy odpovídá obsahu hořlaviny v sušině  $w_{daf}^{dr}$ :

$$W_{LOI}^{dr} = w_{daf}^{dr} \quad (9)$$

kde  $W_{LOI}^{dr}$  – ztráta žíháním v sušině [% hm.];

$w_{daf}^{dr}$  – obsah hořlaviny v sušině [% hm.].

Původní vzorek v dodaném stavu obsahuje kromě popele a hořlaviny také vodu. Obsah popele  $A^a$  a obsah hořlaviny  $w_{daf}^a$  v původním vzorku musí být tedy přepočítán dle vzorců:

$$A^a = \frac{100 - w_{dr}}{100} \cdot A^{dr} \quad (10)$$

$$w_{daf}^a = \frac{100 - w_{dr}}{100} \cdot w_{daf}^{dr} \quad (11)$$

kde  $A^a$  – obsah popele v původním vzorku [% hm.];

$A^{dr}$  – obsah popele v sušině [% hm.];

$w_{daf}^a$  – obsah hořlaviny v původním vzorku [% hm.];

$w_{daf}^{dr}$  – obsah hořlaviny v sušině [% hm.];

$w_{dr}$  – obsah sušiny ve vzorku [% hm.].

Ztrátu žíháním v původním vzorku  $W_{LOI}^a$  potom vypočteme jako:

$$W_{LOI}^a = 100 - A^a \quad (12)$$

kde  $W_{LOI}^a$  – ztráta žíháním v původním vzorku [% hm.];

$A^a$  – obsah popele v původním vzorku [% hm.].

Další určenou charakteristikou bude balastní podíl  $B^a$  udávající podíl látek snižující výhřevnost, tj. popel a vodu v původním vzorku:

$$B^a = 100 - A^a - w_w \quad (13)$$

kde  $B^a$  – balastní podíl [% hm.];

$A^a$  – obsah popele v původním vzorku [% hm.];

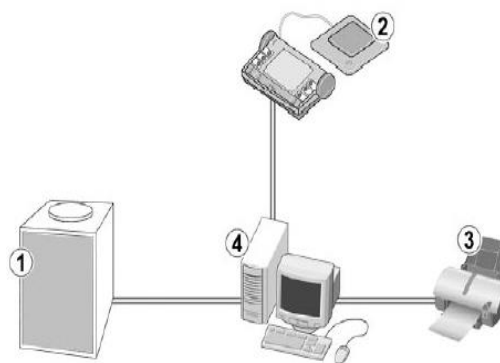
$w_w$  – obsah vody ve vzorku [% hm.].

### 5.2.3 Elementární prvková analýza

Elementární prvková analýza byla provedena za účelem zjištění koncentrace uhlíku, vodíku, dusíku a síry ve vzorku. K provedení analýzy byl použit elementární analyzátor Vario MACRO cube, který můžeme vidět na obr. 21. Jedná se o vysoce sofistikovaný přístroj pracující na principu spalování vzorků v katalytické trubici, oddělení cizích plynů od požadovaných měřících komponent a následné detekce podle tepelné vodivosti. Jak je patrné z obr. 22, analyzátor je propojen s počítačem, tiskárnou a váhami – měřícími s přesností na tisícinu mg. Je tak značně usnadněna obsluha přístroje, kdy váhy automaticky posílají naměřené hodnoty přímo do měřícího softwaru v počítači [42].



Obr. 21 Vario MACRO cube [42]58



Obr. 22 Schéma zapojení, 1 - analyzátor, 2 - váhy, 3 - tiskárna, 4 - počítač [42]58

O detekci měřených komponent v přístroji se stará tepelně vodivostní detektor (TCD), který sestává ze dvou komor, kterými současně protéká směs analyzovaných plynů (měřící kyveta) a čisté helium (referenční kyveta). Tyto dvě komory vytvářejí během analýzy měřící můstek. Tepelná vodivost nosného plynu He reaguje citlivě na přidání malého množství cizích plynů, jako jsou měřené komponenty  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$  a  $SO_2$ . Jestliže je jedna z těchto komponent přítomná v analyzované směsi plynů, naruší se měřící můstek, což je registrováno ve formě elektrického signálu. Ten se následně digitalizuje, integruje a měřícím softwarem v počítači se registruje ve formě měřeného píku v závislosti na čase. Absolutní koncentrace prvku v aktuálním vzorku se vypočítá z integrálů jednotlivých měřených píků a kalibračních faktorů. TCD ale při detekci poskytuje pouze informace o součtu všech měřených komponent v nosném plynu, nikoli o jejich typu. Pro správnost analýzy tedy najednou v nosném plynu může existovat pouze jedna měřená komponenta, která se musí oddělit od ostatních. To se

děje systémem adsorpčních kolon, jenž se zahřívají na potřebné teploty absorpce a desorpce daných měřených komponent. Jednotlivé složky se desorbují postupně a procházejí detektorem TCD [42].

Na začátku celé analýzy je třeba pustit ventily bomb He a O<sub>2</sub>, jež jsou z bezpečnostních důvodů při nečinnosti vždy zavřeny. Následně může být spuštěn samotný přístroj, počítač a měřící software. Důležité je provedení kontroly, zda přístroj nevyžaduje údržbu a její případné obstarání dle manuálu [42]. Pro provedení analýzy je třeba nadefinovat v měřícím softwaru přesný sled vzorků a jednotlivé metody analýzy, které budou na daných vzorcích vykonány. Po nadefinování a vložení všech potřebných vzorků do přístroje může být spuštěna analýza, která trvá i několik hodin.

Měřené vzorky byly připravovány z rozemletých pelet. Navážka v rozmezí 7–12 mg byla zvážena, pomocí pinzet zabalena do cínové fólie tak, aby byl vzorek uvnitř balíčku těsně uzavřen a nemohl se vysypat. Těsnost každého balíčku byla kontrolována. Krom měřených vzorků bylo nutné připravit několik pomocných vzorků, které byly tvořeny prázdnou cínovou fólií (blank), nebo referenčním vzorkem sulfanamidu (standard).

Sekvence vzorků byla zahájena sérií cca 15 pomocných kalibračních a čistících vzorků. Následovalo proměření vzorků sulfanamidu (standard), pomocí kterých byly určeny denní faktory. Po těchto kalibračních a čistících vzorcích již následovaly zvážené vzorky pelet. Měřeny byly série 4 vzorků od každého druhu pelet. Před každou sérií sledovaných vzorků byly do sekvence zařazeny ještě 2 vzorky navážených pelet (tzv. RunIn), sloužící k pročištění a přípravě přístroje na následující sledovaný vzorek.

Aritmetickým průměrem naměřených dat byla zjištěna koncentrace uhlíku  $C^a$ , vodíku  $H^a$ , dusíku  $N^a$  a síry  $S^a$  v původním vzorku. Nutno podotknout, že přístrojem byla stanovena pouze síra prchavá. Neprchavá složka síry zůstává v popelu a tímto postupem ji není možné zjistit.

Teoretické dopočítání koncentrace kyslíku v původním vzorku  $O^a$  bylo stanoveno z předpokladu, že prvky C, H, N, S a O tvoří veškerou hořlavinu a vodu v původním vzorku:

$$O^a = 100 - (C^a + H^a + N^a + S^a) - A^a \quad (14)$$

kde  $O^a$  – koncentrace kyslíku v původním vzorku [% hm.];

$C^a$  – koncentrace uhlíku v původním vzorku [% hm.];

$H^a$  – koncentrace vodíku v původním vzorku [% hm.];

$N^a$  – koncentrace dusíku v původním vzorku [% hm.];

$S^a$  – koncentrace síry v původním vzorku [% hm.];

$A^a$  – obsah popela v původním vzorku [% hm.].

Tato formulace představuje pouze zjednodušený model, protože v reálném vzorku se v hořlavině mohou vyskytnout i další prvky např. fosfor a halogeny. Jejich procentuální podíl je však u biomasy s ohledem na prvkové složení zanedbatelný [13].

Pro stanovení koncentrace C, H, N, S a O v hořlavině je nutné opět předpokládat, že tyto prvky společně tvoří v původním vzorku veškerou hořlavinu a vodu. Voda v původním vzorku je tvořena pouze prvky H a O. Z molárních hmotností H a O je možné stanovit hmotnostní podíl daných prvků ve vodě (H<sub>2</sub>O):

$$H_{H_2O} = \frac{2 \cdot M(H)}{2 \cdot M(H) + M(O)} \cdot 100 = \frac{2 \cdot 1,0079}{2 \cdot 1,0079 + 15,999} \cdot 100 = 11,19 \quad (15)$$

$$O_{H_2O} = 100 - H_{H_2O} = 88,81 \quad (16)$$

kde  $H_{H_2O}$  – hmotnostní podíl vodíku ve vodě [-];

$O_{H_2O}$  – hmotnostní podíl kyslíku ve vodě [-].

$M(H)$  – molární hmotnost vodíku [ $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ ];

$M(O)$  – molární hmotnost kyslíku [ $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ ].

Odečtením vody z původního vzorku dojde ke zmenšení koncentrace H a O, zatímco koncentrace C, N a S zůstanou zachovány:

$$H^{a,red} = H^a - (H_{H_2O} \cdot w_w) \quad (17)$$

$$O^{a,red} = O^a - (O_{H_2O} \cdot w_w) \quad (18)$$

kde  $H^{a,red}$  – redukována koncentrace vodíku [% hm.];

$O^{a,red}$  – redukována koncentrace kyslíku [% hm.];

$O^a$  – koncentrace kyslíku v původním vzorku [% hm.];

$H^a$  – koncentrace vodíku v původním vzorku [% hm.];

$H_{H_2O}$  – hmotnostní podíl vodíku ve vodě [-];

$O_{H_2O}$  – hmotnostní podíl kyslíku ve vodě [-].

Koncentrace  $C^a$ ,  $N^a$ ,  $S^a$  v původním vzorku s redukovanou koncentrací  $H^{a,red}$  a  $O^{a,red}$  již společně tvoří reálné poměry v hořlavině. Ty je nutné ještě přepočítat, aby dohromady tvořily 100 % hořlaviny:

$$C^{daf} = \frac{C^a}{C^a + H^{a,red} + N^a + S^a + O^{a,red}} \cdot 100 \quad (19)$$

$$H^{daf} = \frac{H^{a,red}}{C^a + H^{a,red} + N^a + S^a + O^{a,red}} \cdot 100 \quad (20)$$

kde  $C^{daf}$  – koncentrace uhlíku v hořlavině [% hm.];

$H^{daf}$  – koncentrace vodíku v hořlavině [% hm.];

$C^a$  – koncentrace uhlíku v původním vzorku [% hm.];

$H^{a,red}$  – redukována koncentrace vodíku [% hm.];

$N^a$  – koncentrace dusíku v původním vzorku [% hm.];

$S^a$  – koncentrace síry v původním vzorku [% hm.];

$O^{a,red}$  – redukována koncentrace kyslíku [% hm.].

Následně byly analogicky k rovnicím (19) a (20) dopočítány zbylé koncentrace  $N^{daf}$ ,  $S^{daf}$  a  $O^{daf}$  v hořlavině.

Pro přepočet koncentrace prvků C, H, N, S, O v hořlavině na koncentraci jednotlivých prvků v sušině je využito jednoduchého vztahu (popsán je pouze vzorový vztah pro C) :

$$C^{dr} = \frac{w_{daf}^{dr} \cdot C^{daf}}{100} \quad (21)$$

kde  $C^{dr}$  – koncentrace uhlíku v sušině [% hm.];  
 $C^{daf}$  – koncentrace uhlíku v hořlavině [% hm.];  
 $w_{daf}^{dr}$  – obsah hořlaviny v sušině [% hm.].

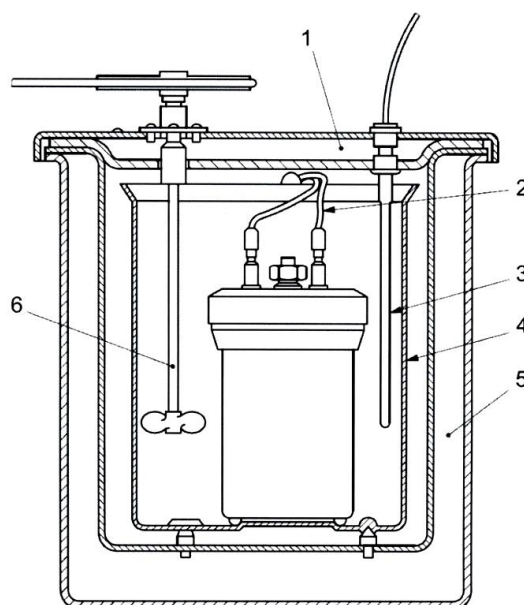
Analogicky k rovnici (21) byly následně dopočítány koncentrace  $H^{dr}$ ,  $N^{dr}$ ,  $S^{dr}$  a  $O^{dr}$  v sušině.

#### 5.2.4 Stanovení spalného tepla kalorimetrickou metodou

Podstata stanovení spalného tepla kalorimetrickou metodou spočívá ve spálení zváženého analytického vzorku v kyslíku za vysokého tlaku v tlakové nádobě kalorimetru. Pro stanovení efektivní tepelné kapacity kalorimetru, nutné pro experimentální výpočet spalného tepla, je nutné provést kalibrační zkoušky spálením certifikované kyseliny benzoové za stejných podmínek, které jsou uvedeny v certifikátu. Přístroj v průběhu zkoušky měří teplotu před, během a po dokončení spalovacích reakcí. Doba a četnost měření závisí na použitém typu kalorimetru. Hodnota spalného tepla se vypočítá z opraveného teplotního vzestupu a efektivní tepelné kapacity kalorimetru, se zřetelem na podíly energie při zapálení, spálení zapalovacího prostředku (v našem případě zapalovací drát) a tepelné účinky z vedlejších reakcí, jako je např. korekce na započtení rozdílu energie mezi roztokem kyseliny sírové vzniklé při reakci v tlakové nádobě a plynným oxidem siřičitým, tj. vzniklým reakčním produktem z obsazení síry[10].



Obr. 23 Kalorimetr Parr 6100



Obr. 24 Schéma uložení kalorimetru [10],  
1. víko termostatu, 2. zapalovací přívody,  
3. teploměr, 4 kalorimetrická nádoba, 5. nádoba termostatu, 6. míchadlo58

Pro experimentální zjištění spalného tepla bylo použito kalorimetru Parr 6100, viz Obr. 23. od každého druhu pelet byly kalorimetrickou metodou měřeny dva vzorky, v případě digestátu tři. Vzorky byly vytvořeny z celých pelet. Následuje podrobný popis měření s tímto přístrojem, jehož schématický popis je na Obr. 25. Kalorimetr je, z důvodu stabilizace teploty, vhodné zapnout cca 20 min před samotným měřením. Nejprve je nutné do kalorimetrické nádoby odměřit v odměrném válci 2000 ml vody, která by měla mít o 1–2 °C menší teplotu, než je teplota pláště. Poté byl, ve formě celé pelety, navážen vzorek a umístěn do kovového kelímku. Množství navážky se pohybovalo v rozmezí 0,6–1 g, tak aby množství uvolněné energie při spálení vzorku nepřesáhlo 8 000 cal, tj. 33 500 J. Kelímek i se vzorkem byl uložen do kruhového drátěného držáku vyvedeného z víka spalovací bomby. Následovalo upevnění zapalovacího drátu, jež byl vždy ustrižen ve velikosti 100 mm. Oba konce drátu byly vloženy do dírek v držáku misky a následně zajištěny, přetažením kovových svorek, proti vysunutí. Orientace zapalovacího drátu musí být upravena tak, aby se dostatečně dotýkal vzorku, což je pro úspěšnost zkoušky krajně důležité. V praxi se vzorek několikrát, kvůli nevhodně umístěnému zapalovacímu drátu, během zkoušky nepodařilo zapálit. Víko spalovací bomby i s upevněným vzorkem a zapalovacím drátem bylo vsazeno do spalovací bomby. Při tomto úkonu je třeba mít uvolněný ruční jehlový ventil víka, aby mohlo při uzavírání dojít k uvolnění plynu z bomby. Z důvodu ochrany vnitřního pláště spalovací bomby před případnými usazeninami, byla do vnitřku spalovací bomby ještě vložena skleněná kádinka. Sestavená bomba byla následně zajištěna důkladným utažením šroubovacího převlečného víka. Utažením jehlového ventilu došlo k následnému utěsnění spalovací bomby. Povolněním bezpečnostního ventilu na kyslíkové bombě bylo umožněno přísunu kyslíku do kalorimetru. Nasazením plnicího konektoru – vedoucího z kalorimetru – na plnicí ventil spalovací bomby bylo vše připraveno k samotnému plnění. To probíhá automaticky, po zmáčknutí tlačítka „O<sub>2</sub> FILL“ na displeji kalorimetru, a trvá 60 s. Z bezpečnostních důvodů bylo vždy při plnění bomby odstoupeno do přiměřené vzdálenosti. Po ukončení plnění O<sub>2</sub> a sejmutí plnicího konektoru byla bomba přemístěna za pomoci kleští do kalorimetrické nádoby s vodou. Vizuelní kontrolou případných bublinek byla zkontrolována těsnost natlakované bomby.



*Obr. 25 Části kalorimetru [44]  
 1. skleněná kádinka, 2. kovový kelímek, 3. držák kelímku, 4. víko spalovací bomby, 5. spalovací drát, 6. svorky spalovacího drátu, 7. jehlový ventil, 8. spalovací bomba, 9. šroubovací převlečné víko, 10. plnicí konektor kyslíku, 11. plnicí ventil bomby, 12. kleště, 13. elektrody 58*

Do elektrod na víku bomby byly zapojeny banánky zapalovacích vodičů. Následovalo zavření víka kalorimetru, při kterém bylo dbáno na to, aby víkem nebyly zapalovací vodiče sevřeny, a aby nevadily v činnosti míchadla. Stisknutím příkazu „START“ a zadáním hmotnosti navážky bylo již započato samotné měření. Měření, během něhož je vhodné se od přístroje opět vzdálit, trvá cca 15 min a je ukončeno zvukovým signálem. Po vyjmutí spalovací bomby, opatrném uvolnění jehlového ventilu a následném rozebrání spalovací bomby bylo zkontrolováno, zda se ve vzorku nenachází nespálené zbytky. Pro korekci na drát byla do přístroje zadána energie vzniklé spálením zapalovacího drátu. Tuto hodnotu usnadnila stanovit stupnice umístěná na špulce použitého drátu (Parr 45C10), ke které byly přiloženy zbytky nespáleného zapalovacího drátu. Následně byla ještě provedena korekce na obsah síry, kde byla zadána koncentrace S ve vzorku, zjištěná z elementární analýzy [43].

Před samotným měřením sledovaných vzorků je nutné ještě provést standardizaci přístroje, přičemž je postup obdobný, avšak jako vzorek je použita tableta standardu – kyseliny benzoové.

Naměřené hodnoty spalného tepla určené kalorimetrickou metodou udávají spalné teplo původního vzorku  $HHV^a$ .

Pro přepočítání spalného tepla původního vzorku  $HHV^a$  na spalné teplo sušiny  $HHV^{dr}$  a spalné teplo hořlaviny  $HHV^{daf}$  bylo použito těchto vzorců [1]:

$$HHV^{dr} = \frac{HHV^a}{w_{dr}} \cdot 100 \quad (22)$$

$$HHV^{daf} = \frac{HHV^{dr}}{w_{daf}^{dr}} \cdot 100 \quad (23)$$

kde  $HHV^{daf}$  – spalné teplo hořlaviny [ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ];

$HHV^{dr}$  – spalné teplo sušiny [ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ];

$HHV^a$  – spalné teplo původního vzorku [ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ];

$w_{daf}^{dr}$  – podíl hořlaviny v sušině [% hm.];

$w_{dr}$  – obsah sušiny ve vzorku [% hm.].

### 5.2.5 Výpočet výhřevnosti

Výhřevnost je spalné teplo snižené o kondenzační teplo vody vzniklé spalováním. Po vypočtení spalného tepla je tedy nutné stanovit množství vody vzniklé spalováním.

Hoření vodíku probíhá za stechiometrické rovnice (3). Dva moly vodíku se slučují s jedním molem kyslíku na dva moly vodní páry [1]:





a spálením 1 kg vodíku tedy vznikne 8,94 kg vodní páry [1]:

$$1 + \frac{M(O_2)}{2 \cdot M(H_2)} = \frac{2 \cdot M(H_2O)}{2 \cdot M(H_2)} = \frac{36,032}{4,032} = 8,94 \text{ kg} \quad (25)$$

kde  $M(H_2)$  – molární hmotnost molekuly vodíku [ $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ ];

$M(O_2)$  – molární hmotnost molekuly kyslíku [ $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ ];

$M(H_2O)$  – molární hmotnost vody [ $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ ].

Pro výhřevnost původního vzorku  $LHV^a$  potom platí [1]:

$$LHV^a = HHV^a - r_{H_2O}^{20^\circ C} \cdot (w_w + 8,94 \cdot x_H^a) \quad (26)$$

$$x_H^a = \frac{H^{daf} \cdot w_{daf}^a}{100} \quad (27)$$

kde  $LHV^a$  – výhřevnost původního vzorku [ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ];

$HHV^a$  – spalné teplo původního vzorku [ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ];

$r_{H_2O}^{20^\circ C}$  – výparné teplo vody při 20 °C, má hodnotu 2 454 [ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ];

$w_w$  – koncentrace vody ve vzorku [% hm.];

$x_H^a$  – koncentrace spalitelného vodíku v původním vzorku [% hm.];

$H^{daf}$  – koncentrace vodíku v původním vzorku [% hm.];

$w_{daf}^a$  – obsah hořlaviny v původním vzorku [% hm.].

Dále pro výpočet výhřevnosti sušiny  $LHV^d$  platí [1]:

$$LHV^{dr} = HHV^{dr} - r_{H_2O}^{20^\circ C} \cdot 8,94 \cdot x_H^{dr} \quad (28)$$

$$x_H^{dr} = \frac{H^{dr}}{100} \quad (29)$$

kde  $LHV^{dr}$  – výhřevnost sušiny [ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ];

$HHV^{dr}$  – spalné teplo sušiny [ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ];

$r_{H_2O}^{20^\circ C}$  – výparné teplo vody při 20 °C, má hodnotu 2 454 [ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ];

$x_H^{dr}$  – koncentrace vodíku v sušině [% hm.].

Pro přepočítání z výhřevnosti sušiny na výhřevnost hořlaviny je využito analogie k rovnici (23), tj. rovnice (30):

$$LHV^{daf} = \frac{LHV^{dr}}{w_{daf}^{dr}} \cdot 100 \quad (30)$$

kde  $LHV^{daf}$  – výhřevnost hořlaviny [ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ];

$LHV^{dr}$  – výhřevnost sušiny [ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ];

$w_{daf}^{dr}$  – podíl hořlaviny v sušině [% hm.].

### 5.2.6 Výpočet spalného tepla z výsledků elementární analýzy

Výpočet spalného tepla je možno provést podle prvkového složení v hořlavině získaného výpočtem z výsledků elementární analýzy vzorků. Vychází z empirických vzorců, stanovujících teoretickou hodnotu spalného tepla hořlaviny  $HHV_{teor}^{daf}$  z obsahu prvků uhlík, vodík, dusík, síra a kyslík v hořlavině. Již v roce 1843 byly uveřejněny rovnice francouzského chemika P. Dulonga, které však nejsou zcela vyhovující pro dřevo a další druhy tuhých paliv s vyšším podílem kyslíku. Mimo Dulongovy rovnice je uvedeno dalších 9 rovnic těchto autorů [41]:

#### D. I. Mendělejev (1897)

$$HHV_{teor}^{daf} = 339 \cdot C^{daf} + 1256 \cdot H^{daf} - 109 \cdot (O^{daf} - S^{daf}) \quad (31)$$

#### G. Strache a R. Lant (1924)

$$HHV_{teor}^{daf} = 340,6 \cdot C^{daf} + 1432 \cdot H^{daf} - 153,2 \cdot O^{daf} + 104,6 \cdot S^{daf} \quad (32)$$

#### W. Steuer (1926)

$$HHV_{teor}^{daf} = 339 \cdot (C^{daf} - \frac{3}{8} \cdot O^{daf}) + 239 \cdot (\frac{3}{8} \cdot O^{daf}) + 1444 \cdot (H^{daf} - \frac{O^{daf}}{16}) + 105 \cdot S^{daf} \quad (33)$$

#### E. Grummel a J. Daveies (1933)

$$HHV_{teor}^{daf} = (15,22 \cdot H^{daf} + 987,5) \cdot (\frac{C^{daf}}{3} + H^{daf} - \frac{O^{daf} - S^{daf}}{8}) \quad (34)$$

#### R. Michel (1938)

$$HHV_{teor}^{daf} = 340,3 \cdot C^{daf} + 1243,2 \cdot H^{daf} + 62,8 \cdot N^{daf} + 190,9 \cdot S^{daf} - 98,4 \cdot O^{daf} \quad (35)$$

#### V. Boie (1953)

$$HHV_{teor}^{daf} = 351,6 \cdot C^{daf} + 1162,2 \cdot H^{daf} - 117,6 \cdot (O^{daf} + S^{daf}) \quad (36)$$

$$HHV_{teor}^{daf} = 351,6 \cdot C^{daf} + 1162,2 \cdot H^{daf} - 104,6 \cdot O^{daf} + 96,3 \cdot S^{daf} \quad (37)$$

$$HHV_{teor}^{daf} = 351,6 \cdot C^{daf} + 1162 \cdot H^{daf} - 110,9 \cdot O^{daf} + 104,6 \cdot S^{daf} \quad (38)$$

#### F. Schuster (1957)

$$HHV_{teor}^{daf} = 339 \cdot C^{daf} + 1423 \cdot (H^{daf} - \frac{O^{daf}}{8}) + 92 \cdot S^{daf} \quad (39)$$

kde  $HHV_{teor}^{daf}$  – teoretická hodnota spalného tepla hořlaviny [ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ];

$C^{daf}$  – koncentrace uhlíku v hořlavině [% hm.];

$H^{daf}$  – koncentrace vodíku v hořlavině [% hm.];

$O^{daf}$  – koncentrace kyslíku v hořlavině [% hm.];

$S^{daf}$  – koncentrace síry v hořlavině [% hm.];

$N^{daf}$  – koncentrace dusíku v hořlavině [% hm.].

Protože žádná z těchto rovnic není navržena konkrétně pro spalné teplo biomasy, je výsledná teoretická hodnota spalného tepla hořlaviny  $HHV_{teor}^{daf}$  vypočtena jako aritmetický průměr z výsledků rovnic (7)–(15).

Analogicky k vzorcům (22) a (23) bylo pro přepočítání teoretického spalného tepla hořlaviny  $HHV_{teor}^{daf}$  na spalné teplo sušiny  $HHV_{teor}^{dr}$  a spalné teplo původního vzorku  $HHV_{teor}^a$  použito těchto vzorců:

$$HHV_{teor}^{dr} = \frac{HHV_{teor}^{daf} \cdot w_{daf}^{dr}}{100} \quad (40)$$

$$HHV_{teor}^a = \frac{HHV_{teor}^{dr} \cdot w_{dr}}{100} \quad (41)$$

kde  $HHV_{teor}^{daf}$  – teoretická hodnota spalného tepla hořlaviny [ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ];

$HHV_{teor}^{dr}$  – teoretická hodnota spalného tepla sušiny [ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ];

$HHV_{teor}^a$  – teoretická hodnota spalného tepla původního vzorku [ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ];

$w_{daf}^{dr}$  – podíl hořlaviny v sušině [% hm.];

$w_{dr}$  – obsah sušiny ve vzorku [% hm.].

## 6 VÝSLEDKY A DISKUSE

### 6.1.1 Stanovení sušiny a obsahu vody, ztráty žiháním

Zkouška stanovení sušiny a obsahu vody společně se zkouškou ztráty žiháním byly provedeny ve dvou po sobě jdoucích krocích. Naměřené hodnoty obou zkoušek jsou tedy zaznamenány společně, viz. Tab. 5.

Tab. 5 Zkouška stanovení sušiny a obsahu vody a zkouška ztráty žiháním – naměřené hodnoty

Vzorek	Číslo misky	$m_a$ [g]	$m_b$ [g]	$m_c$ [g]	$m_d$ [g]
Sláma	35	15,933	16,592	16,543	15,975
	32	15,826	16,414	16,37	15,864
	33	15,792	16,45	16,4	15,833
Šťovík	121	15,411	16,08	16,022	15,446
	10	17,637	18,472	18,399	17,684
	31	17,271	18,037	17,973	17,311
Digestát	56	20,226	21,366	21,271	20,348
	62	16,033	16,656	16,604	16,104
	60	16,053	16,667	16,615	16,121
Dřevo	1	15,719	16,449	16,386	15,726
	61	15,686	16,784	16,686	15,698
	18	17,28	18,218	18,136	17,283

kde  $m_a$  – hmotnost prázdné misky [g];

$m_b$  – hmotnost misky s navážkou vzorku [g];

$m_c$  – hmotnost misky s vysušeným vzorkem [g];

$m_d$  – hmotnost misky se zbytkem po žihání [g].

Tab. 6 Výsledky stanovení sušiny a obsahu vody

Vzorek	Obsah sušiny $w_{dr}$ [% hm.]	Obsah vody $w_w$ [% hm.]	Směrodatná odchylka	Interval spolehlivosti
Sláma	92,5	7,5	0,1	0,1
Šťovík	91,4	8,6	0,2	0,2
Digestát	91,6	8,4	0,1	0,1
Dřevo	91,2	8,8	0,1	0,1

Tab. 6 ukazuje srovnání obsahů vody  $w_w$  daného vzorku, jež je jedním z nejdůležitějších parametrů spalovaného paliva. Obsah vody má zásadní vliv na konečnou výhřevnost vzorku a je tak výchozím parametrem určení kvality pelet. Standardní hodnota  $w_w$  pro většinu vyráběných pelet se pohybuje okolo 8-10 % hm. [26], přičemž kvalitnější dřevní i nedřeví pelety dosahují až 7,5 % hm. vlhkosti [45]. Nižšího obsahu vody v peletách zpravidla

dosaženo nebývá, protože vlhkost počáteční suroviny vstupující do granulačního procesu následně ovlivňuje soudržnost pelet [32].

Nejnižší hodnota obsahu vody  $w_w$  byla naměřena u vzorku slaměných pelet, jež svojí vlhkostí patří k tomu kvalitnějšímu na trhu agropelet. Pelety vyrobené z odpadů zemědělské produkce mají všeobecně zpravidla nízký obsah vody, což je způsobeno relativně suchou vstupní surovinou bez nutnosti dosušování [32]. Zbylé vzorky pelet se svojí vlhkostí řadí k lepšímu průměru na trhu dostupných pelet.

Tab. 7 Výsledky ztráty žiháním a obsahu popele v sušině

Vzorek	Ztráta žiháním v sušině $W_{LOI}^{dr}$ [% hm.]	Obsah popele v sušině $A^{dr}$ [% hm.]	Směrodatná odchylka	Interval spolehlivosti
Sláma	93,1	6,9	0,1	0,1
Šťovík	94,1	5,9	0,2	0,2
Digestát	87,9	12,1	0,3	0,4
Dřevo	99,1	0,9	0,4	0,4

Tab. 7 zobrazuje výsledky zkoušky ztráty žiháním, tedy ztrátu žiháním v sušině  $W_{LOI}^{dr}$  a obsah popele v sušině  $A^{dr}$ . Referenční hodnoty obsahu popele udávané výrobcí jsou však hodnoty vztažené k původnímu vzorku, viz Tab. 8.

Tab. 8 Ztráty žiháním a obsahu popele v původním vzorku

Vzorek	Ztráta žiháním v původním vzorku $W_{LOI}^a$ [% hm.]	Obsah popele v původním vzorku $A^a$ [% hm.]
Sláma	93,6	6,4
Šťovík	94,6	5,4
Digestát	88,9	11,1
Dřevo	99,2	0,8

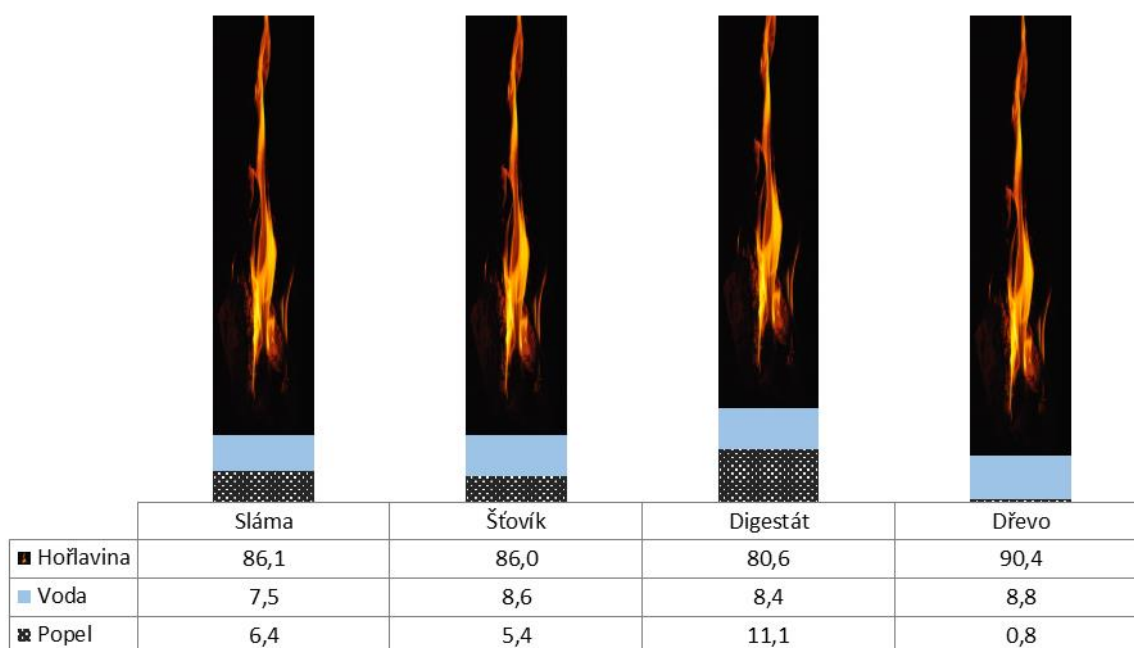
Obsah popele v původním vzorku  $A^a$  je dalším důležitým parametrem srovnávání pelet. Jak ukazuje Tab. 8, nejméně popele vykazuje jednoznačně vzorek dřevní pelety. U dřevních pelet se obsah popele obecně pohybuje do 1 % hm. [26], což je jejich značná výhoda vůči peletám nedřevním. Méně popele při spalování znamená pro činnost kotle snadnější odvod popele a pomalejší plnění zásobníku, tedy méně časté vynášení. Důležitým aspektem jsou také charakteristické teploty popele, tedy náchylnost ke spékání při spalování. To je další výhodou dřevních briket oproti agropeletám, které jsou ke spékání popele náchylnější [12]. Vzorek digestátu potom vykazuje téměř dvojnásobný obsah popele než zbylé agropelety, obsahující zhruba 6 % hm. - což je standardní hodnota rostlinných agropelet [2].

Poslední charakteristikou hrubého rozboru paliva je balastní podíl  $B^a$ , tedy podíl látek snižujících výhřevnost, tj. popele a vody, v původním vzorku, viz Tab. 9. Nejnižší hodnoty balastního podílu  $B^a$  vykazuje jednoznačně vzorek dřeva, což vede k předpokladu nejvyšší výhřevnosti původního vzorku v případě dřevních pelet. Naopak nejnižší hodnota výhřevnosti původního vzorku je očekávána u pelet z digestátu, které vykazují téměř dvojnásobný balastní podíl, než dřevo.

Tab. 9 Balastní podíl

Vzorek	Balastní podíl $B^a$ [% hm.]
Sláma	13,9
Šťovík	14,0
Digestát	19,4
Dřevo	9,6

Sumární srovnání hrubého rozboru daných vzorků je vyobrazeno v grafu, viz obr. 24.



Obr. 26 Celkový poměr hořlaviny, vody a popele v měřeném vzorku

## 6.1.2 Elementární prvková analýza

Tab. 10 Elementární prvková analýza v původním vzorku – naměřené hodnoty

Vzorek	číslo vzorku	$C^a$ [% hm.]	$H^a$ [% hm.]	$N^a$ [% hm.]	$S^a$ [% hm.]*
Sláma	1	42,31	6,13	0,85	0,15
	2	42,43	6,10	0,82	0,16
	3	41,73	6,04	0,82	0,17
	4	42,32	6,34	0,82	0,14
Šťovík	1	43,18	6,19	1,34	0,29
	2	43,28	6,04	1,37	0,30
	3	43,12	6,06	1,34	0,32
	4	43,21	5,95	1,39	0,27
Digestát	1	42,06	6,23	1,71	0,36
	2	41,62	6,57	1,73	0,28
	3	42,03	6,62	1,7	0,31
	4**	48,32	7,56	1,95	0,31
Dřevo	1**	45,76	6,48	0,59	2,52
	2**	45,55	6,74	0,8	1,46
	3	45,5	6,62	0,73	1,01
	4	45,88	6,25	0,65	0,92

\* síra prchavá

\*\* hodnoty nebyly uvažovány (odlehlost nebo ovlivnění koncentrace síry předchozím vzorkem standardu)

V Tab. 10 jsou zobrazeny výsledky elementární prvkové analýzy, která udává koncentraci daných prvků v původním vzorku. V případě digestátu je vzorek č. 4 zjevně odlehlý. U vzorku č. 1 a 2 v případě dřeva je zase patrná vyšší koncentrace síry. To je způsobeno skutečností, že vzorky dřeva byly měřeny jako úplně první. Přístroj se po měření referenčního standardu, s řádově vyšší koncentrací síry, nestihl dostatečně pročistit a hodnoty jsou tak zkreslené. Tyto hodnoty tedy nebyly uvažovány.

Výsledné hodnoty naměřené koncentrace uhlíku  $C^a$ , vodíku  $H^a$ , dusíku  $N^a$ , síry  $S^a$  a dopočítané koncentrace kyslíku  $O^a$  v původním vzorku ukazuje Tab. 11.

Tab. 11 Koncentrace C, H, N, S, O v původním vzorku

Vzorek	Sláma	Šťovík	Digestát	Dřevo
$C^a$ [% hm.]	42,20	43,20	41,90	45,67
Směrodatná odchylka	0,27	0,06	0,20	0,15
Interval spolehlivosti	0,27	0,06	0,23	0,15
$H^a$ [% hm.]	6,15	6,06	6,47	6,52
Směrodatná odchylka	0,11	0,09	0,18	0,18
Interval spolehlivosti	0,11	0,08	0,20	0,18
$N^a$ [% hm.]	0,83	1,36	1,71	0,69
Směrodatná odchylka	0,01	0,02	0,01	0,08
Interval spolehlivosti	0,01	0,02	0,01	0,08
$S^a$ [% hm.]*	0,15	0,29	0,32	0,96
Směrodatná odchylka	0,01	0,02	0,03	0,05
Interval spolehlivosti	0,01	0,02	0,04	0,07
$O^a$ [% hm.]	44,31	43,73	38,54	45,36

\*síra prchavá

Komplexní srovnání prvkové bilance v původním vzorku, v sušině a v hořlavině je potom zobrazeno v Tab. 12.

Tab. 12 Koncentrace C, H, N, S, O v původním vzorku, sušině a hořlavině

	Vzorek	Sláma	Šťovík	Digestát	Dřevo
V hořlavině	$C^{daf}$ [% hm.]	48,99	50,20	52,02	50,50
	$H^{daf}$ [% hm.]	6,17	5,92	6,87	6,13
	$N^{daf}$ [% hm.]	0,96	1,58	2,13	0,77
	$S^{daf}$ [% hm.]	0,18	0,34	0,39	1,07
	$O^{daf}$ [% hm.]	43,71	41,95	38,60	41,54
V sušině	$C^{dr}$ [% hm.]	45,62	47,26	45,74	50,06
	$H^{dr}$ [% hm.]	5,74	5,58	6,04	6,07
	$N^{dr}$ [% hm.]	0,89	1,49	1,87	0,76
	$S^{dr}$ [% hm.]	0,17	0,32	0,34	1,06
	$O^{dr}$ [% hm.]	40,70	39,49	33,94	41,18
V původním vzorku	$C^a$ [% hm.]	42,20	43,20	41,90	45,67
	$H^a$ [% hm.]	6,15	6,06	6,47	6,52
	$N^a$ [% hm.]	0,83	1,36	1,71	0,69
	$S^a$ [% hm.]*	0,15	0,29	0,32	0,96
	$O^a$ [% hm.]	44,31	43,73	38,54	45,36

\*síra prchavá



Při srovnání zjištěného prvkového složení daných vzorků s dostupnými palivovými listy (k dispozici jsou pouze parametry slámy – odpadní pšenice, šťovíku a dřeva – odpadní smrk) [13] – viz. Tab. 13 – je patrné, že koncentrace uhlíku C, vodíku H a kyslíku O odpovídají. Avšak v případě dusíku N a síry S bylo zjištěno – u síry až několikanásobně – vyšší koncentrace těchto prvků v námi naměřených vzorcích, než vykazují vzorky palivových listů. Pelety ze šťovíku a digestátu obsahují limitní koncentraci síry v sušině (0,3 % hm.), kterou dovoluje norma ČSN EN ISO 17225-1 [7]. Vzorek slámy vykazuje koncentraci síry v sušině o něco menší, avšak norma je pro pelety z obilné slámy přísnější a dovoluje pouze 0,1 % hm., což náš vzorek překračuje. Vzorek slámy nevyhovuje ani koncentraci dusíku v sušině, jež je a dle normy max. 0,7 % hm.

Konečná koncentrace síry a dusíku v peletách je ovlivněna především daným složením půdy, v nichž je biomasa pěstována, a použitím hnojiv. Vyšší koncentrace síry v peletách zvyšuje emise SO<sub>2</sub> a při kondenzaci sloučenin síry na výměňkových plochách kotle, může být také příčinou vzniku koroze [15].

Tab. 13 Porovnání prvkové bilance měřených vzorků s dostupnými palivovými listy [13]

Vzorek	Sláma		Šťovík		Dřevo	
	testovaný vzorek	palivové listy**	testovaný vzorek	palivové listy	testovaný vzorek	palivové listy***
$C^{dr}$ [% hm.]	45,62	46,00	47,26	47,00	50,06	50,10
$H^{dr}$ [% hm.]	5,74	5,97	5,58	5,77	6,07	6,13
$N^{dr}$ [% hm.]	0,89	0,59	1,49	1,15	0,76	0,12
$S^{dr}$ [% hm.]*	0,17	0,03	0,32	0,06	1,06	<0,01
$O^{dr}$ [% hm.]	40,70	42,30	39,49	41,30	41,18	43,40

\*síra prchavá

\*\*odpadní pšenice

\*\*\*odpadní smrk

Problémy s korozi jsou způsobeny také vyšší koncentrací chloru ve vzorku. Stejně jako v případě síry, i sloučeniny chloru způsobují po kondenzaci silnou korozi. Vhodnou optimalizací teploty spalin, tedy i zabránění kondenzace v oblasti zadního tahu kotle může být tento nežádoucí jev odstraněn. Koncentrace chloru v palivu může mít také vliv na tvorbu chlorovaných aromatických sloučenin (PCDD/F), avšak většina výzkumů se shoduje, že mnohem vyšší podíl na tvorbě PCDD/F má samotná kvalita spalovacího procesu. Jak uvádí analýza různých druhů biomasy [18], nejvyšší koncentraci chloru z měřených vzorků byl zjištěn ve slámě obilnin (konkrétně v ječné slámě to bylo 0,81 % hm.). Ostatní druhy pelet mají koncentraci chloru až 6x nižší, od 0,12 do 0,17 % hm. V naší práci koncentrace chloru měřena nebyla, avšak případné problémy spojené s jeho výskytem mohou být očekávány i u námi testovaného vzorku slámy.

### 6.1.3 Stanovení spalného tepla kalorimetrickou metodou

Tab. 14 Výsledky měření spalného tepla kalorimetrickou metodou

Vzorek	1. vzorek $HHV^a$ [kJ.kg <sup>-1</sup> ]	2. vzorek $HHV^a$ [kJ.kg <sup>-1</sup> ]	3. vzorek $HHV^a$ [kJ.kg <sup>-1</sup> ]	Výsledná průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Interval Spolehlivosti
Sláma	17044	17083	-	17064	19	27
Šťovík	16958	17068	-	17013	55	76
Digestát	17208	16828	17016	17017	155	175
Dřevo	18287	18374	-	18331	44	60

Výsledky měření spalného tepla původního vzorku  $HHV^a$  pomocí kalorimetru jsou uvedeny v Tab. 14. v případě měření vzorku digestátu bylo po srovnání dvou relativně odlišných měření přistoupeno k měření dalšího, tedy třetího vzorku. Širší interval spolehlivosti u vzorků digestátu mohl být způsoben vyšší nehomogenitou pelet, než tomu bylo u jiných vzorků. Tato nehomogenita se ve větší míře vyskytuje pouze u této zkoušky, která byla prováděna na celých vzorcích pelet. Zbylé metody pracovali s rozemletými vzorky, čímž byla nehomogenita jednotlivých pelet zřejmě eliminována na minimum.

Tab. 15 Porovnání spalného tepla původního vzorku, sušiny a hořlaviny

Vzorek	$HHV^a$ [kJ . kg <sup>-1</sup> ]	$HHV^{dr}$ [kJ . kg <sup>-1</sup> ]	$HHV^{daf}$ [kJ . kg <sup>-1</sup> ]
Sláma	17064	18448	19809
Šťovík	17013	18611	19771
Digestát	17017	18574	21124
Dřevo	18331	20092	20268

Porovnání hodnot spalného tepla původního vzorku, sušiny a samotné hořlaviny je zobrazeno v Tab. 15. Srovnání hodnot spalného tepla, i s intervaly spolehlivosti stanovení, ukazuje, že všechny 3 vzorky testovaných agropelet mají stejný energetický potenciál. Tab. 15 poukazuje také na fakt, že původní energie hořlaviny je větší, než energie původního vzorku. Nositelkou energie je totiž, v případě paliva, pouze hořlavina. Zbylé části paliva – balastní podíl – tj. popel a voda – tuto energii hořlaviny pouze snižují. To je patrné v případě digestátu, jehož hodnota spalného tepla hořlaviny  $HHV^{daf}$  je nejvyšší ze všech, avšak konečná výhřevnost původního vzorku je nejnižší, viz. Tab. 16. To je způsobeno tím, že digestát obsahuje nejvyšší podíl balastu, viz. Tab. 9.

Srovnání konečných hodnot výhřevnosti  $LHV^a$  už se liší více, v závislosti na obsahu vody a koncentraci spalitelného vodíku daného vzorku, viz Tab. 16. Vzorek dřevní pelety vykazuje oproti nedřevním spalné teplo v původním vzorku  $HHV^a$  vyšší.

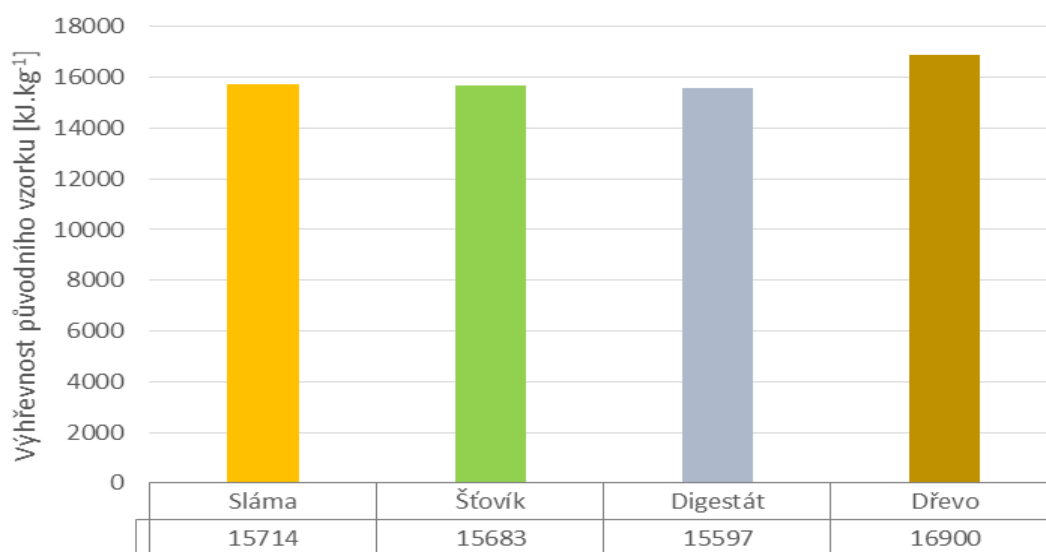
## 6.1.4 Výpočet výhřevnosti

Tab. 16 Porovnání výhřevnosti původního vzorku, sušiny a hořlaviny

Vzorek	$LHV^a$ [kJ . kg <sup>-1</sup> ]	$LHV^{dr}$ [kJ . kg <sup>-1</sup> ]	$LHV^{daf}$ [kJ . kg <sup>-1</sup> ]
Sláma	15714	17188	18456
Šťovík	15683	17388	18471
Digestát	15597	17249	19617
Dřevo	16900	18759	18923

Hodnota výhřevnosti původního vzorku  $LHV^a$ , viz. Tab. 16, je veličinou, která udává konečný energetický potenciál daného vzorku při reálném spálení. Tato veličina je základním parametrem srovnání pro výrobce i spotřebitele, ať už se jedná o jakýkoliv typ paliva.

Nejvyšší výhřevnosti původního vzorku  $LHV^a$  dosahují, dle předpokladů, vzorky dřevěných pelet. Průměrem výhřevnosti dřevěných pelet na českém trhu je 16 500 kJ.kg<sup>-1</sup> [46], čímž se námi měřený vzorek dřevní brikety řadí k tomu lepším, co se nabízí, přičemž některé komerčně dostupné dřevní pelety udávají výhřevnost až 18 000 kJ.kg<sup>-1</sup> [31]. Někteří výrobci užívají poněkud zavádějících hodnot výhřevnosti, když místo výhřevnosti vzorku uvádějí výhřevnost samotné sušiny, která je samozřejmě vyšší [46]. Jak ukazuje i naše měření, výhřevnost agropelet bývá v zásadě o něco nižší, než v případě dřevěných pelet. Námi měřené vzorky jsou si s ohledem na výhřevnost dosti podobné a všechny překračují hodnotu 15 500 kJ.kg<sup>-1</sup>. Nejvyšší hodnoty  $LHV^a$  z testovaných agropelet však dosahuje vzorek slámy, v těsné návaznosti je vzorek šťovíku a nejnižší hodnotu ze všech testovaných pak vzorek digestátu, což potvrzuje náš původní předpoklad vycházející z vysoké hodnoty balastního podílu. Celkové srovnání výhřevnosti původního vzorku je uvedeno v grafu, viz Obr. 27.



Obr. 27 Graf výhřevnosti původního vzorku testovaných pelet

### 6.1.5 Výpočet spalného tepla z elementárnej analýzy

Teoretický výpočet spalného tepla hořlaviny byl určen aritmetickým průměrem z 9 uvedených rovnic. Srovnáním teoretické hodnoty spalného tepla hořlaviny  $HHV_{teor}^{daf}$  se spalným teplem hořlaviny vypočteným z výsledků kalorimetrické metody  $HHV^{daf}$ , viz Tab. 17, bylo v případě vzorku šťovíku a dřeva zjištěno přibližně stejné hodnoty spalného tepla teoretického i měřeného. U vzorku slámy a digestátu je již odchylka teoretické hodnoty od naměřené o něco vyšší, nicméně i v případě digestátu, jehož hodnoty se liší nejvíce, nedosáhla ani 5 %.

Při porovnání dílčích výsledků rovnic, se kterými byla teoretická hodnota spalného tepla v hořlavině  $HHV_{teor}^{daf}$  počítána, s hodnotou určenou z kalorimetru  $HHV^{daf}$  bylo zjištěno, že rovnice popisující nejlépe všechny čtyři vzorky je nejstarší z nich, tedy rovnice dle D. I. Mendělejeva z roku 1897. Tyto měření tak dokazují vhodnost použití této rovnice pro paliva z biomasy. Nejméně přesné výsledky naopak vykazuje rovnice dle F. Schustera z roku 1957.

Tab. 17 Srovnání teoretické hodnoty spalného tepla v hořlavině se spalným teplem vypočteným z kalorimetrického měření

Vzorek		Sláma	Šťovík	Digestát	Dřevo
Spalné teplo vypočtené z kalorimetrického měření $HHV^{daf}$ [kJ . kg <sup>-1</sup> ]		19809	19771	21124	20267
Rovnice pro výpočet spalného tepla z prvkového složení	Průměrná hodnota výsledků daných rovnic $HHV_{teor}^{daf}$ [kJ . kg <sup>-1</sup> ]	19248	19594	21877	20071
	Mendělejev	19609	19924	22097	20403
	Strache	18843	19193	21684	19724
	Steuer	19949	20250	22663	20772
	Grummel	18444	18813	21221	19347
	Michel	20132	20485	22652	20966
	Boie 1	19232	19562	21687	19866
	Boie 2	19838	20181	22273	20634
	Boie 3	19563	19918	22032	20380
Schuster	17626	18018	20579	18547	

Dopočítané hodnoty teoretického spalného tepla hořlaviny, sušiny i původního vzorku jsou v Tab. 18.

Tab. 18 Teoretické spalné teplo v původním vzorku, sušině a hořlavině

Vzorek	$HHV_{teor}^a$ [kJ . kg <sup>-1</sup> ]	$HHV_{teor}^{dr}$ [kJ . kg <sup>-1</sup> ]	$HHV_{teor}^{daf}$ [kJ . kg <sup>-1</sup> ]
Sláma	16580	17926	19249
Šťovík	16860	18445	19594
Digestát	17624	19236	21877
Dřevo	18153	19897	20071

### **6.1.6 Palivové listy testovaných vzorků**

Z výsledků experimentálního měření byly sestaveny pro každý měřený vzorek odpovídající palivové listy. Ty jsou umístěny jako příloha na konci práce.

Z porovnání všech měřených vzorků se jeví jako nejlepší palivo dřevní peleta, a to především díky nízkému obsahu popele a tím pádem vysoké výhřevnosti. Nejméně vhodným palivem je vzorek digestátu, který naopak disponoval vysokým balastním podílem a z toho plynoucí nižší výhřevností.

S ohledem na prvkové složení je nutné podotknout, že námi měřený vzorek slaměné pelety nespĺňuje normu [7] pro svoji vysokou koncentraci síry a zbylé agropelaty vykazují taktěž limitní hodnoty.

## 7 ZÁVĚR

Většinová produkce nedřevních pelet v ČR slouží jako palivo pro teplárny a elektrárny, avšak použití automatických kotlů menších výkonů je na vzestupu. Automatické kotle na spalování pelet mohou být, díky svému bezobslužnému provozu, zajímavou alternativou pro běžně užívané zdroje vytápění - jako např. zemní plyn – přičemž jejich zavedení je podporováno i formou tzv. kotlíkových dotací. Nejčastěji využívaným palivem v automatických peletových kotlech jsou pelety dřevní. Spalování pelet nedřevních, tzv. agropelet totiž přináší řadu komplikací, kvůli nimž není efektivní spalování agropelet v kotlech určených pro dřevní pelety možné. Především jde o větší tvorbu popele a jeho spékavost. Velké množství výrobců již kotle na spalování agropelet nabízí, ty jsou však dražší.

Významné legislativní omezení prodeje kotlů na tuhá paliva přichází s novou evropskou směrnicí o ekodesignu pro kotle a kamna na tuhá paliva 2009/125/ES [21], která od 1. 1. 2018 povoluje prodej pouze kotlů vyhovujících 4. emisní třídě, resp. od 1. 1. 2020 pouze kotlů vyhovujících 5. emisní třídě dle ČSN EN 303-5 [14].

Agropelety dostupné na českém trhu jsou nejčastěji složeny z odpadu zemědělské produkce (sláma, zbytky z čištění semen, nestandardní semena, osiny, atd.), ale i z rostlin pěstovaných záměrně pro energetické účely (žitovec, šťovík, konopí). Agropelety mohou být vyráběny i z fermentačních zbytků z bioplynových stanic, tzv. digestátu.

V experimentální části práce byl proveden palivářský rozbor třech vzorků agropelet (sláma, šťovík a digestát) a jednoho vzorku dřevní pelety. Stanovením sušiny a obsahu vody dle ČSN EN 12880 [11] byl zjištěn obsah vody, jež má zásadní vliv na celkovou výhřevnost paliva. Testované pelety vykazovaly vlhkost cca 8 % hm., což je pro pelety standardní hodnota.

Zkouškou stanovení ztráty žíháním dle ČSN EN 15169 [39] byl zjištěn obsah popele ve vzorku. Nejmenší obsah popele 0,8 % hm. byl dle očekávání naměřen na vzorku dřevní pelety. Pelety ze slámy a šťovíku obsahují cca 6 % popele a vzorek digestátu téměř dvojnásobek. Vysoký obsah popele má negativní vliv na činnost kotle a zároveň snižuje výslednou výhřevnost vzorku.

Ke zjištění prvkového složení byla provedena elementární analýza, která zjistila zvýšenou koncentraci síry ve všech vzorcích. Vzorek slámy dokonce překračuje dovolené koncentrace síry a dusíku dle ČSN EN ISO 17225-1 [7], která specifikuje přísnější kritéria pro obilnou slámu. Dále bylo provedeno měření spalného tepla kalorimetrickou metodou a výpočet výhřevnosti dle ČSN ISO 1928 [10]. Výpočtem z naměřených hodnot spalného tepla byla určena výhřevnost jednotlivých vzorků, jež je základním porovnávacím kritériem všech paliv. Jak potvrzuje i naše měření, výhřevnost agropelet bývá v zásadě nižší než u dřevních pelet. Námi měřené trojici agropelet byla určena přibližně stejná výhřevnost – cca 15 650 kJ.kg<sup>-1</sup>. Výhřevnost vzorku dřevní pelety je vyšší – 16 900 kJ.kg<sup>-1</sup>.

Poslední část byla věnována teoretickému výpočtu spalného tepla ze známých empiricky stanovených vzorců. Tyto vzorce počítaly spalné teplo pomocí základního prvkového složení C, H, O, N a S v hořlavině. Výsledkem bylo spalné teplo hořlaviny, které bylo po srovnání se spalným teplem naměřeným kalorimetricky víceméně stejné (odchylka nepřesáhla 5 %).

Z výsledků experimentálního měření byly sestaveny pro každý měřený vzorek odpovídající palivové listy.

Shrnutím všech získaných i naměřených poznatků můžeme konstatovat, že spalování agropelet v automatických kotlech je bezesporu zajímavou alternativou k běžně používaným

způsobům vytápění. Na trhu se vyskytuje dostatečné množství kvalitních agropelet, jež jsou svým provozem levnější variantou než pelety dřevní, avšak s vyšší vstupní investicí na pořízení kotle [22].

## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] JIROUŠ, František. *Efektivní spalování paliv*. Praha: Český svaz zaměstnavatelů v energetice, c2013. ISBN 9788026053934.
- [2] PASTOREK, Zdeněk, Jaroslav KÁRA a Petr JEVIČ. *Biomasa: obnovitelný zdroj energie*. Praha: FCC Public, 2004. ISBN 80-865-3406-5.
- [3] Biom: *odborný časopis a informační zpravodaj Českého sdružení pro biomasu CZ Biom*. Č. 03/2014 (březen 2014). Praha: CZ BIOM, 2014. Vychází čtvrtletně. ISSN 1801-2655.
- [4] Státní fond životního prostředí ČR : Kotlíkové dotace [online]. 2016-04-07 [cit. 2016-05-04]. Dostupné z WWW: < <https://www.sfzp.cz/sekce/815/kotlikove-dotace/> >.
- [5] Zpráva o využívání obnovitelných zdrojů energie v roce 2014 [online]. Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR, 2016. Zveřejněno dne: 12.1.2016. [cit. 2016-04-13]. Dostupné z <<http://download.mpo.cz/get/54506/62316/647573/priloha001.pdf>>.
- [6] DRAHOKOUPILOVÁ, L. *Obnovitelné zdroje energie v ČR*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 28s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jan Fiedler, Dr.
- [7] ČSN EN ISO 17225-6 Tuhá biopaliva - Specifikace a třídy paliv - Část 6: Tříděné nedřevní pelety
- [8] JIROUŠ, František. *Efektivní spalování paliv*. Praha: Český svaz zaměstnavatelů v energetice, c2013. ISBN 9788026053934.
- [9] VÁGNEROVÁ, Milena. *Znečišťující látky v ovzduší* [online]. In: . Ekologické centrum Most: Výzkumný ústav pro hnědé uhlí a.s, s. 10 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.ohk-most.cz/Files/OHK/Most/VUHU-Nezkracenaverze.pdf>
- [10] ČSN ISO 1928 Tuhá paliva - Stanovení spalného tepla kalorimetrickou metodou v tlakové nádobě a výpočet výhřevnosti
- [11] ČSN EN 12880 Charakterizace kalů – Stanovení veškerých látek a obsahu vody
- [12] TZB-info : Kotle - 1. část [online]. 2012-03-19 [cit. 2016-05-04]. Dostupné z WWW: < <http://vytapani.tzb-info.cz/teorie-a-schemata/8382-kotle-1-cast> >. ISSN 1801-4399.
- [13] SKÁLA, Zdeněk a Tadeáš OCHODEK. *Energetické parametry biomasy: projekt GAČR 101/04/1278*. V Brně: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007. Knihovnicka.cz. ISBN 9788021434936.
- [14] 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
- [15] DLOUHÝ, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. Vyd. 3. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2007, 212 s. : il. ; 30 cm. ISBN 9788001037577.
- [16] NIELSEN, H.P., F.J. FRANDBSEN, K. DAM-JOHANSEN a L.L. BAXTER. The implications of chlorine-associated corrosion on the operation of biomass-fired boilers. *Progress in Energy and Combustion Science* [online]. Elsevier Ltd,



- 2000, 26(3), 283-298 [cit. 2016-05-11]. DOI: 10.1016/S0360-1285(00)00003-4. ISSN 03601285.
- [17] *Vlastnosti popelů z biomasy v závislosti na procesu spalování* [online]. s. 53 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: [http://media0.nolimit.cz/files/media0:50fdb8172a111.pdf.upl/Biomasa\\_-\\_popel.pdf](http://media0.nolimit.cz/files/media0:50fdb8172a111.pdf.upl/Biomasa_-_popel.pdf)
- [18] PETŘÍKOVÁ, Vlasta, PUNČOCHÁŘ, Miroslav: Biomasa – alternativní palivo z hlediska chemického složení. *Biom.cz* [online]. 2007-07-16 [cit. 2016-05-11]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/biomasa-alternativni-palivo-z-hlediska-chemickeho-slozeni>>. ISSN: 1801-2655.
- [19] PEKÁREK, V., M. PUNČOCHÁŘ, M. BUREŠ, R. GRABIC a E. FIŠEROVÁ. Effects of sulfur dioxide, hydrogen peroxide and sulfuric acid on the de novo synthesis of PCDD/F and PCB under model laboratory conditions. *Chemosphere* [online]. Elsevier Ltd, 2007, 66(10), 1947-1954 [cit. 2016-05-12]. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2006.07.073. ISSN 0045-6535.
- [20] TZB-info : Emise prachu z malých spalovacích zařízení na tuhá paliva a metody jejich stanovení [online]. 2013-02-04 [cit. 2016-05-05]. Dostupné z WWW: <<http://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/9536-emise-prachu-z-malych-spalovacich-zarizeni-na-tuha-paliva-a-metody-jejich-stanoveni>>. ISSN 1801-4399.
- [21] SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2009/125/ES ze dne 21. ŘÍJNA 2009 o stanovení rámce pro určení požadavků na ekodesign výrobků spojených se spotřebou energie. 2009.
- [22] Firemní WWW stránky VERNER a.s.: Kotel VERNER A251 [online]. [cit. 2016-05-05]. Dostupné z WWW: < <http://www.kotle-verner.cz/produkty/automaticke-kotle/verner-a251>>.
- [23] TZB-info : Peletové vytápěcí soustavy pro rodinné domy [online]. 2012-01-11 [cit. 2016-05-05]. Dostupné z WWW: < <http://oze.tzb-info.cz/peletky/6170-peletove-vytapeci-soustavy-pro-rodinne-domy> >. ISSN 1801-4399.
- [24] STUPAVSKÝ, Vladimír: Kotel na pelety - peletový kotel pro ústřední vytápění. *Biom.cz* [online]. 2010-01-01 [cit. 2016-05-05]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/kotel-na-pelety-peletovy-kotel-pro-ustredni-vytapani>>. ISSN: 1801-2655.
- [25] Firemní WWW stránky BLAZE HARMONY s.r.o.: Peletový hořák Blaze Harmony XS [online]. [cit. 2016-05-05]. Dostupné z WWW: < <http://www.blazeharmony.com/cs/www/horak-na-pelety>>.
- [26] KLOBUŠNÍK, Lubomír. *Pelety: palivo budoucnosti*. České Budějovice: Sdružení Harmonie, 2003. ISBN 8023919563.
- [27] Dům & Byt : Inteligentní kotle a čisté teplo [online]. 2007-12-26 [cit. 2016-05-05]. Dostupné z WWW: < [http://www.dumabyt.cz/rubriky/interier/bydlime/inteligentni-kotle-a-ciste-teplo\\_19713.html?clanek\\_id=19713](http://www.dumabyt.cz/rubriky/interier/bydlime/inteligentni-kotle-a-ciste-teplo_19713.html?clanek_id=19713)>.
- [28] Brikety a pelety v roce 2013 – výsledky statistického zjišťování MPO [online]. Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR, 2014. Zveřejněno dne: 16.12.2014. [cit. 2016-05-10]. Dostupné z < <http://www.mpo.cz/dokument154839.html>>.
- [29] STUPAVSKÝ, Vladimír, HOLÝ, Tomáš: Brikety z biomasy - dřevěné, rostlinné, směsné brikety. *Biom.cz* [online]. 2010-01-01 [cit. 2016-04-14]. Dostupné z WWW:

- <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/brikety-z-biomasy-drevene-rostlinne-smesne-brikety>>. ISSN: 1801-2655.
- [30] Moderní využití biomasy: Technologické a logistické možnosti. In: *Moderní využití biomasy: Technologické a logistické možnosti* [online]. 2006 [cit. 2016-02-13]. Dostupné z: <http://www.mpo-efekt.cz/dokument/02.pdf>
- [31] STUPAVSKÝ, Vladimír: Pelety z biomasy - dřevěné, rostlinné, kůrové pelety. *Biom.cz* [online]. 2010-01-01 [cit. 2016-04-14]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/pelety-z-biomasy-drevene-rostlinne-kurove-pelety>>. ISSN: 1801-2655.
- [32] KOTT, Jiří: Výroba pelet z biomasy - technické a ekonomické aspekty. *Biom.cz* [online]. 2010-12-20 [cit. 2016-04-14]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyroba-pelet-z-biomasy-technicke-a-ekonomicke-aspekty>>. ISSN: 1801-2655.
- [33] Česká peleta: Normy pro pelety a brikety [online]. [cit. 2016-05-06]. Dostupné z WWW: < <http://www.ceska-peleta.cz/pelety-brikety-drevo/normy-pro-pelety-a-brikety/> >.
- [34] Firemní WWW stránky Družstvo EKOVER [online]. [cit. 2016-05-12]. Dostupné z WWW: < <http://www.ekover.cz/> >.
- [35] JANSA, O. Porovnání vlastností alternativních pelet. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 66 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Marek Baláš, Ph.D.
- [36] PETŘÍKOVÁ, Vlasta : Rostliny pro energetické účely alternativní palivo z hlediska chemického složení. *Biom.cz* [online]. Praha: Česká energetická agentura. [cit. 2016-05-12]. Dostupné z < <http://biom.cz/upload/6e01d6d4c4835ec93cda508772f3bf6e/rostliny-pro-energeticky-ely.pdf> >.
- [37] PETŘÍKOVÁ, Vlasta: Nejnovější zkušenosti s pěstováním energetického šťovíku - Uteuša. *Biom.cz* [online]. 2003-12-17 [cit. 2016-05-12]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/nejnovejsi-zkusenosti-s-pestovanim-energetickeho-stoviku-uteusa>>. ISSN: 1801-2655.
- [38] CZ Biom, : Nakládání s digestátem, možnost využití jako kvalitní hnojivo. *Biom.cz* [online]. 2014-12-18 [cit. 2016-04-13]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/nakladani-s-digestatem-moznost-vyuziti-jako-kvalitni-hnojivo>>. ISSN: 1801-2655.
- [39] ČSN EN 15169 Charakterizace odpadů – Stanovení ztráty žiháním v odpadech, kalech a sedimentech.
- [40] ČSN ISO 1928 Tuhá paliva - Stanovení spalného tepla kalorimetrickou metodou v tlakové nádobě a výpočet výhřevnosti.
- [41] RĚDR, Miroslav a Miroslav PŘÍHODA. *Základy tepelné techniky*. Praha: SNTL, 1991, 677 s. ISBN 8003003660.
- [42] Elementar Analysensysteme GmbH [manuál]. *Návod k obsluze elementární analyzátor Vario MACRO cube*. ©2009 [cit. 2016-05-20].
- [43] PARR INSTRUMENT COMPANY [manuál]. *Parr 6100 Oxygen Bomb Calorimeter - operating instruction manual*. ©2010 [cit. 2016-05-20].

- [44] BRUMMER, Vladimír. *Kalorimeter Parr 6100 - kondenzovaný návod*.
- [45] Firemní WWW stránky ENVITON [online]. [cit. 2016-05-12]. Dostupné z WWW: < <http://enviton.cz/>>.
- [46] TZB-info : náklady na vytápění dřevními peletami [online]. 2010-02-22 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z WWW: < <http://oze.tzb-info.cz/biomasa/6263-naklady-na-vytapeni-drevnimi-peletami> >. ISSN 1801-4399.

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

### Použité zkratky:

ČR – Česká Republika  
EU – Evropská unie  
FAME – bionafta  
OZE – obnovitelné zdroje energie  
PCDD - polychlorované dibenzo-p-dioxiny  
PCDF - polychlorované dibenzofurany  
TCD – tepelně vodivostní detektor  
TGA – termická analýza (gravimetrie)  
TOC (OGC) – celkový organický uhlík  
TZL – tuhé znečišťující látky  
USA – Spojené státy americké

### horní indexy:

#### Symbol Význam

---

a vztaženo k vzorku v původním stavu  
dr vztaženo k sušině  
daf vztaženo k hořlavině

### Použité symboly:

Symbol	Význam	Jednotka
$A$	obsah popele	[% hm.]
$B$	balastní podíl	[% hm.]
$C$	koncentrace uhlíku	[% hm.]
$H$	koncentrace vodíku	[% hm.]
$H^{a,red}$	redukováná koncentrace vodíku	[% hm.]
$H_{H_2O}$	hmotnostní podíl vodíku ve vodě	[% hm.]
$HHV$	spalné teplo	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]
$HHV_{teor}$	teoretická hodnota spalného tepla určená empirickými vzorci	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]
$LHV$	výhřevnost původního vzorku	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]
$O^{a,red}$	redukováná koncentrace kyslíku	[% hm.]
$O_{H_2O}$	hmotnostní podíl kyslíku ve vodě	[% hm.]
$M(H)$	molární hmotnost vodíku	[kg.mol <sup>-1</sup> ]
$M(H_2)$	molární hmotnost molekuly vodíku	[kg.mol <sup>-1</sup> ]
$M(H_2O)$	molární hmotnost vody	[kg.mol <sup>-1</sup> ]
$M(O)$	molární hmotnost kyslíku	[kg.mol <sup>-1</sup> ]
$M(O_2)$	molární hmotnost molekuly kyslíku	[kg.mol <sup>-1</sup> ]
$m_a$	hmotnost prázdné misky	[g]
$m_b$	hmotnost misky s navážkou vzorku	[g]
$m_c$	hmotnost misky s vysušeným vzorkem	[g]

$m_d$	hmotnost misky se zbytkem po žihání	[g]
$N$	koncentrace dusíku	[% hm.]
$O$	koncentrace kyslíku	[% hm.]
$r_{H_2O}^{20^\circ C}$	výparné teplo vody při 20 °C, hodnota=2 454	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]
$S$	koncentrace síry	[% hm.]
$w_{daf}$	obsah hořlaviny	[% hm.]
$w_{dr}$	obsah sušiny ve vzorku	[% hm.]
$w_w$	obsah vody ve vzorku	[% hm.]
$W_{LOI}$	ztráta žiháním	[% hm.]
$x_H$	koncentrace spalitelného vodíku	[% hm.]

## 10 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Vývoj výroby tepla a elektřiny z biomasy mimo domácnosti [3].....	14
Obr. 2 Graf závislosti výhřevnosti a spalného tepla dřevního odpadu na vlhkosti [8] .....	17
Obr. 3 Graf intenzity uvolňování prchavé hořlaviny ze smrkové kůry při různých teplotách a časových intervalech 3, 7, 12 min [2].....	18
Obr. 4 Schéma automatického kotle na pelety [27].....	22
Obr. 5 Peletový hořák [23].....	22
Obr. 6 Rotační peletový hořák Blaze Harmony XS [25] .....	23
Obr. 7 Kotelna s odděleným skladem pelet [19].....	23
Obr. 8 Big bag [18] .....	23
Obr. 10 Peleta EKOVER S [32] .....	27
Obr. 9 Peleta EKOVER [32].....	27
Obr. 12 Peleta EKOVER F [32] .....	28
Obr. 11 Peleta EKOVER O [32].....	28
Obr. 9 Peleta EKOVER [32].....	28
Obr. 10 Peleta EKOVER S [32] .....	28
Obr. 13 Šťovíkové pole v prvním roce o zasetí [2] .....	29
Obr. 14 Sklizeň šťovíku [34] .....	29
Obr. 15 Sláma .....	31
Obr. 16 Krmný šťovík.....	31
Obr. 17 Digestát .....	32
Obr. 18 Dřevo.....	32
Obr. 20 Schéma zapojení, 1 - analyzátor, 2 - váhy, 3 - tiskárna, 4 - počítač [39] .....	35
Obr. 19 Vario MACRO cube [39] .....	35
Obr. 22 Schéma uložení kalorimetru[7] .....	38
Obr. 21 Kalorimetr Parr 6100 [40].....	38
Obr. 23 Části kalorimetru [44].....	39
Obr. 26 Celkový poměr hořlaviny, vody a popele v měřeném vzorku.....	46
Obr. 27 Graf výhřevnosti původního vzorku testovaných pelet .....	51

## 11 SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Limity 5. emisní třídy pro kotle na tuhá paliva (při 10 % podílu O<sub>2</sub>), platné od 1. 1. 2020 [14]</i> .....	21
<i>Tab. 2 Základní bilance nedřevních pelet na českém trhu, hodnoty uvedené v tisících tun [28]</i> .....	24
<i>Tab. 3 Dělení biomasy vhodné ke spalování [2]</i> .....	25
<i>Tab. 4 Licenční paliva EKOVER [34]</i> .....	27
<i>Tab. 5 Zkouška stanovení sušiny a obsahu vody a zkouška ztráty žíháním – naměřené hodnoty</i> .....	44
<i>Tab. 6 Výsledky stanovení sušiny a obsahu vody</i> .....	44
<i>Tab. 7 Výsledky ztráty žíháním a obsahu popele v sušině</i> .....	45
<i>Tab. 8 Ztráty žíháním a obsahu popele v původním vzorku</i> .....	45
<i>Tab. 9 Balastní podíl</i> .....	46
<i>Tab. 10 Elementární prvková analýza v původním vzorku – naměřené hodnoty</i> .....	47
<i>Tab. 11 Koncentrace C, H, N, S, O v původním vzorku</i> .....	48
<i>Tab. 12 Koncentrace C, H, N, S, O v původním vzorku, sušině a hořlavíně</i> .....	48
<i>Tab. 13 Porovnání prvkové bilance měřených vzorků s dostupnými palivovými listy [13]</i> .....	49
<i>Tab. 14 Výsledky měření spalného tepla kalorimetrickou metodou</i> .....	50
<i>Tab. 15 Porovnání spalného tepla původního vzorku, sušiny a hořlaviny</i> .....	50
<i>Tab. 16 Porovnání výhřevnosti původního vzorku, sušiny a hořlaviny</i> .....	51
<i>Tab. 17 Srovnání teoretické hodnoty spalného tepla v hořlavíně se spalným teplem vypočteným z kalorimetrického měření</i> .....	52
<i>Tab. 18 Teoretické spalné teplo v původním vzorku, sušině a hořlavíně</i> .....	52

## **12 SEZNAM PŘÍLOH**

**Příloha č. 1:** Palivový list vzorku agropelety ze slámy

**Příloha č. 2:** Palivový list vzorku agropelety ze šťovíku

**Příloha č. 3:** Palivový list vzorku agropelety z digestátu

**Příloha č. 4:** Palivový list vzorku agropelety ze dřeva



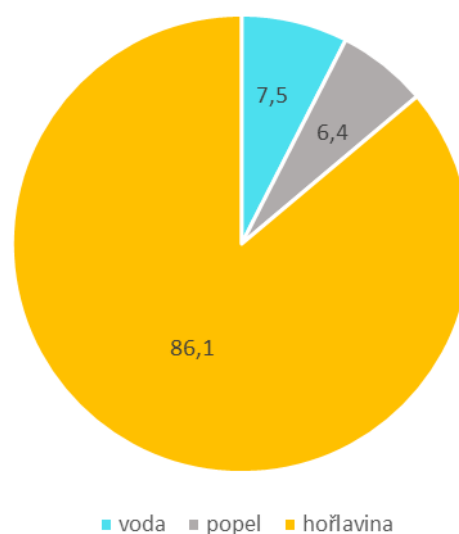
## 13 PŘÍLOHY

### 13.1 Příloha č. 1: Palivový list vzorku agropelety ze slámy

	Vzorek	Slaměná peleta		
	Parametr	Vzorek v dodaném stavu	Vzorek bezvodý	Hořlavina vzorku
Hrubý rozbor	Obsah vody	7,5	0	0
	Obsah popela*	6,4	6,9	0
	Obsah hořlaviny	86,1	93,1	100
Elementární prvkové složení	Uhlík C	42,20	45,62	48,99
	Vodík H	6,15	5,74	6,17
	Dusík N	0,83	0,89	0,96
	Síra prchavá S	0,15	0,17	0,18
	Kyslík O**	44,31	40,70	43,71
Energetická bilance	Teoretické spalné teplo výpočtem***	16580	17926	19248
	Spalné teplo	17064	18448	19809
	Výhřevnost	15714	17188	18457

Doplňující parametry	
Sušina vzorku	92,5
Ztráta žiháním v sušině	93,1
Ztráta žiháním v původním vzorku	93,6
Balastní podíl, tj. voda + popel	13,9
Podíl hořlaviny v sušině	93,1

Hrubý rozbor vzorku



### 13.2

\*ztráta žiháním při 550 °C

\*\*teoretická hodnota stanovená dopočtem

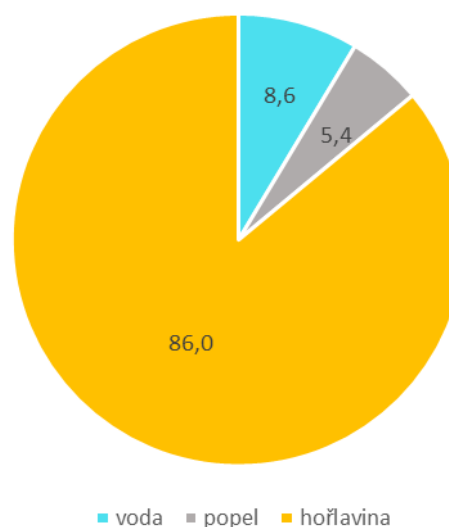
\*\*\*průměr z 9 empirických vzorců

## Příloha č. 2: Palivový list vzorku agropelety ze šťovíku

	Vzorek	Peleta ze šťovíku		
	Parametr	Vzorek v dodaném stavu	Vzorek bezvodý	Hořlavina vzorku
Hrubý rozbor	Obsah vody	8,6	0	0
	Obsah popela*	5,4	5,9	0
	Obsah hořlaviny	86,0	94,1	100
Elementární prvkové složení	Uhlík C	43,20	47,26	50,20
	Vodík H	6,06	5,58	5,92
	Dusík N	1,36	1,49	1,58
	Síra prchavá S	0,29	0,32	0,34
	Kyslík O**	43,73	39,49	41,95
Energetická bilance	Teoretické spalné teplo výpočtem***	16860	18445	19594
	Spalné teplo	17013	18611	19771
	Výhřevnost	15684	17388	18471

Doplňující parametry	
Sušina vzorku	91,4
Ztráta žíháním v sušině	94,1
Ztráta žíháním v původním vzorku	94,6
Balastní podíl, tj. voda + popel	14,0
Podíl hořlaviny v sušině	94,1

Hrubý rozbor vzorku



\*ztráta žíháním při 550 °C

\*\*teoretická hodnota stanovená dopočtem

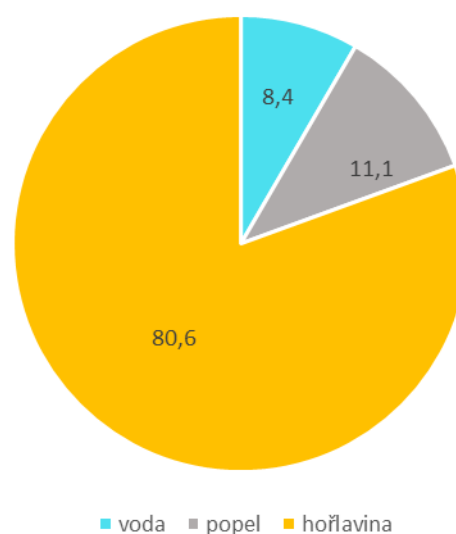
\*\*\*průměr z 9 empirických vzorců

### 13.3 Příloha č. 3: Palivový list vzorku agropelety z digestátu

	Vzorek	Peleta z digestátu		
	Parametr	Vzorek v dodaném stavu	Vzorek bezvodý	Hořlavina vzorku
Hrubý rozbor	Obsah vody	8,4	0	0
	Obsah popela*	11,1	12,1	0
	Obsah hořlaviny	80,6	87,9	100
Elementární prvkové složení	Uhlík C	41,90	45,74	52,02
	Vodík H	6,47	6,04	6,87
	Dusík N	1,71	1,87	2,13
	Síra prchavá S	0,32	0,34	0,39
	Kyslík O**	38,54	33,94	38,60
Energetická bilance	Teoretické spalné teplo výpočtem***	17624	19236	21877
	Spalné teplo	17017	18574	21124
	Výhřevnost	15598	17249	19617

Doplňující parametry	
Sušina vzorku	91,6
Ztráta žíháním v sušině	87,9
Ztráta žíháním v původním vzorku	88,9
Balastní podíl, tj. voda + popel	19,4
Podíl hořlaviny v sušině	87,9

Hrubý rozbor vzorku



\*ztráta žíháním při 550 °C

\*\*teoretická hodnota stanovená dopočtem

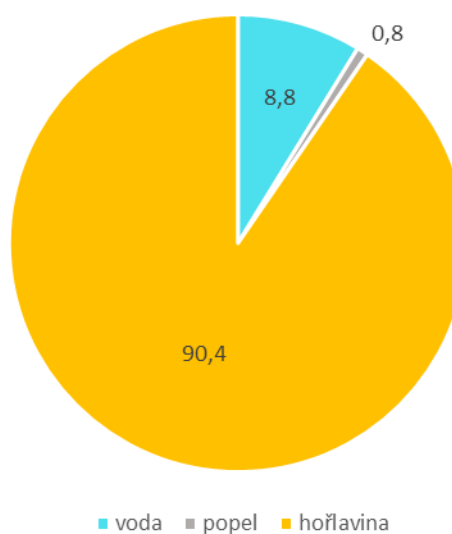
\*\*\*průměr z 9 empirických vzorců

### 13.4 Příloha č. 4: Palivový list vzorku dřevěné pelety

	Vzorek	Dřevěná peleta		
	Parametr	Vzorek v dodaném stavu	Vzorek bezvodý	Hořlavina vzorku
Hrubý rozbor	Obsah vody	8,8	0	0
	Obsah popela*	0,8	0,9	0
	Obsah hořlaviny	90,4	99,1	100
Elementární prvkové složení	Uhlík C	45,67	50,06	50,50
	Vodík H	6,52	6,07	6,13
	Dusík N	0,69	0,76	0,77
	Síra prchavá S	0,96	1,06	1,07
	Kyslík O**	45,36	41,18	41,54
Energetická bilance	Teoretické spalné teplo výpočtem***	18153	19897	20071
	Spalné teplo	18331	20092	20267
	Výhřevnost	16900	18760	18924

Doplňující parametry	
Sušina vzorku	91,2
Ztráta žiháním v sušině	99,1
Ztráta žiháním v původním vzorku	99,2
Balastní podíl, tj. voda + popel	9,6
Podíl hořlaviny v sušině	99,1

Hrubý rozbor vzorku



\*ztráta žiháním při 550 °C

\*\*teoretická hodnota stanovená dopočtem

\*\*\*průměr z 9 empirických vzorců