

Česká zemědělská univerzita v Praze
Technická fakulta

**Tuhá biopaliva a jejich tepelně-emisní vlastnosti pro
energetické využití**

Bakalářská práce

Vedoucí práce: doc. Ing. Jan Malat'ák, Ph.D.

Autor práce: Jakub Kučera

Praha 2018

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jakub Kučera

Technika a technologie zpracování odpadů

Název práce

Tuhá biopaliva a jejich tepelně-emisní vlastnosti pro energetické využití

Název anglicky

Solid biofuels and their heat-emission properties for energy use

Cíle práce

Cílem bakalářské práce je seznámit se současnou problematikou technických zařízení pro využití tuhých biopaliv pro energetické využití. Uskutečnit analýzu, jak technických zařízení pro energetické využití, tak stanovit tepelně-emisní vlastnosti tuhých biopaliv.

Metodika práce vychází z určených klasifikačních, jakostních a specifikačních rámců tuhých biopaliv pro energetické účely a charakteristiky souvisejících právních předpisů, technologie termického zpracování a legislativních podmínek zpracování a využití tuhých biopaliv.

Praktická část práce zahrnuje uskutečnění prvkové a stechiometrické analýzy vybraných vzorků tuhých biopaliv. Po zhodnocení technologie termického zpracování vybraných vzorků následuje zhodnocení tepelně-emisních a ekonomických ukazatelů.

Metodika

- 1 Úvod
- 2 Cíl práce
- 3 Metodika práce
- 4 Přehled řešené problematiky
- 5 Praktická část práce
- 6 Výsledky a jejich hodnocení
- 7 Závěr a doporučení
- 8 Seznam použitých zdrojů
- 9 Přílohy

Doporučený rozsah práce

30-40

Klíčová slova

Spalovací zařízení; biopalivo; prvkový rozbor; stechiometrická analýza; spaliny

Doporučené zdroje informací

Juchelková, D.: Likvidace a využití odpadů. Ostrava, VŠB TU Ostrava, 2000. ISBN 80-7078-747-3

Malařák, J.; Jevič, P.; Vaculík, P.: Účinné využití tuhých biopaliv v malých spalovacích zařízeních s ohledem na snižování emisí znečišťujících látek. 2010, Powerprint, Praha, pp. 240, ISBN 978-80-87415-02-3

Muller, M.: Zpracovny nekovového odpadu. ČZU, Praha, 2008, 154 s.

Obroučka, K.: Termické zneškodňování odpadů. VŠB Ostrava, Ostrava 1997, 140 s.

Pastorek, Z.; Kára, J.; Jevič, P.: Biomasa – obnovitelný zdroj energie, nakladatelství FCC Public, Praha 2004, 284 str., ISBN 80-86534-06-5

Směrnice Evropského Parlamentu a Rady 2009/28/EC o podpoře užívání energie z obnovitelných zdrojů a o změně a následném zrušení směrnic 2001/77/ES a 2003/30/ES. Štrasburk, 23.4.2009 (OR. en)

Předběžný termín obhajoby

2017/18 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Jan Malařák, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra technologických zařízení staveb

Elektronicky schváleno dne 19. 1. 2018

doc. Ing. Jan Malařák, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 30. 1. 2018

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 30. 03. 2018

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Tuhá biopaliva a jejich tepelně-emisní vlastnosti pro energetické využití vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby. Jsem si vědom, že moje bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí. Jsem si vědom že, na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.“

dne 1. 4. 2018

Podpis autora

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu této práce doc. Ing. Janu Malatřákovi, Ph.D. za vstřícnost a odborné konzultace bakalářské práce a dále své rodině za podporu.

Abstrakt

Cílem bakalářské práce je zhodnotit tuhá biopaliva a jejich tepelně-emisní vlastnosti pro energetické využití. Práce je rozdělena na dvě části, na teoretickou část a na praktickou část. V teoretické části byla provedena rešerše tuhých biopaliv, zaměřující se na popis jednotlivých druhů paliva, jejich vlastnosti a možnosti úpravy do konečné podoby vhodné pro spalování. Dále je uveden rozbor jednotlivých prvků obsažených v palivech, energetický potenciál biomasy a jednotlivé technologie termického zpracování biomasy. Praktická část práce zahrnuje uskutečnění prvkové a stechiometrické analýzy vybraných vzorků tuhých biopaliv. Po zhodnocení technologie termického zpracování vybraných vzorků následuje zhodnocení tepelně-emisních a ekonomických ukazatelů.

Klíčová slova

Spalovací zařízení, biopalivo, prvkový rozbor, stechiometrická analýza, spaliny

Solid Biofuels and Their Thermal-emission Properties for Energy Use

Summary: The aim of the bachelor thesis is to evaluate solid biofuels and their thermal-emission properties for energy use. The thesis is divided into two parts, the theoretical part and the practical part. In the theoretical part, the research of solid biofuels was carried out, focusing on description of individual types of fuel, their properties and possibilities of modification to the final form suitable for combustion. In addition, the analysis of individual elements contained in fuels, the biomass energy potential and individual biomass thermal processing technologies are presented. The practical part of the thesis involves the realization of elementary and stoichiometric analysis of selected samples of solid biofuels. The evaluation of the thermal processing technology of selected samples is followed by evaluation of thermo-emission and economic indicators.

Key words

Combustion equipment, biofuel, elemental analysis, stoichiometric analysis, flue gas

Obsah

1	ÚVOD.....	8
2	CÍL PRÁCE.....	9
3	METODIKA PRÁCE.....	10
4	PŘEHLED ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY.....	11
4.1	ENERGETICKÁ SITUACE V ČESKÉ REPUBLICE	11
4.2	CHARAKTERISTIKA BIOMASY	12
4.2.1	Základní rozdělení biomasy.....	12
4.2.2	Dřevní biomasa.....	12
4.2.3	Ovocná biomasa	14
4.3	ENERGETICKÝ POTENCIÁL	16
4.3.1	Energetický potenciál ze zemědělské půdy	16
4.3.2	Energetický potenciál lesní dendromasy	17
4.3.3	Energetické potenciál využití biologicky rozložitelného komunálního odpadu	18
4.3.4	Celkový energetický potenciál pro Českou republiku.....	18
4.4	MECHANICKÁ ÚPRAVA PEVNÝCH BIOPALIV	19
4.4.1	Stříhací zařízení	19
4.4.2	Drťící zařízení	19
4.4.3	Štěpkovače.....	20
4.4.4	Peletovací a briketovací lisy	22
4.4.5	Paketování	23
4.5	MECHANICKÁ ÚPRAVA ENERGETICKÝCH STÉBELNIN.....	23
4.6	ZAŘÍZENÍ NA SPALOVÁNÍ BIOMASY	25
4.6.1	Kotle malých výkonů	25
4.6.2	Kotle středních výkonů.....	27
4.6.3	Kotle velkých výkonů.....	28
4.6.4	Zplyňování.....	28
4.7	LEGISLATIVA	29
4.8	VLASTNOSTI TUHÝCH BIOPALIV	30
4.8.1	Základní složení a vlastnosti tuhých biopaliv.....	30
4.8.2	Výhřevnost a spalné teplo tuhých biopaliv.....	31
4.8.3	Obsah vody v tuhých biopalivech	32
4.8.4	Obsah popela v tuhých biopalivech.....	33
4.8.5	Prchavá hořlavina v tuhém biopalivu	34

4.8.6	Obsah síry v tuhém biopalivu.....	34
4.8.7	Obsah chloru v tuhém palivu.....	34
5	PRAKTICKÁ ČÁST	35
5.1	Popis měřených vzorků.....	35
5.2	Popis použitých zařízení	35
5.3	Spalné teplo a výhřevnost tuhých paliv	36
5.4	Stechiometrie spalovacích procesů	38
5.5	Výpočty spotřeby vzduchu a množství spalin	38
5.6	Spalování tuhých a kapalných paliv	41
6	VÝSLEDKY A JEJICH HODNOCENÍ.....	45
7	ZÁVĚR A DOPORUČENÍ	54
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	55
9	Seznam tabulek.....	59
10	Seznam obrázků.....	59

1 ÚVOD

S narůstající světovou populací a zvyšujícími se životními nároky společnosti stoupá spotřeba energie v celosvětovém měřítku a v České republice tomu není jinak.

Kromě poškozování životního prostředí a s tím souvisejícími klimatickými změnami dochází k nárůstu cen ropy a zemního plynu. Tyto zdroje již nepostačují k pokrytí vzrůstající poptávky po energii. Za pomoci obnovitelných zdrojů energie by bylo možné během několika desítek let celkově nahradit stávající zdroje energie. (Quashning, 2010) Nejvyšší přínosem biomasy jsou její obnovitelnost, při racionálním využívání jde o nevyčerpatelný zdroj energie. Jde o CO₂ neutrální palivo, to znamená, že emise tohoto skleníkového plynu vzniklé energetickým využitím jsou rovny jeho spotřebě při růstu nově narůstající biomasy. Oproti fosilním palivům mají paliva z biomasy nižší hodnoty ostatních znečišťujících emisí vznikajících při spalování. (Weger, 2009)

2 **CÍL PRÁCE**

Cílem bakalářské práce je seznámit se současnou problematikou technických zařízení pro využití tuhých biopaliv pro energetické využití. Uskutečnit analýzu, jak technických zařízení pro energetické využití, tak stanovit tepelně-emisní vlastnosti tuhých biopaliv. Metodika práce vychází z určených klasifikačních, jakostních a specifikačních rámců tuhých biopaliv pro energetické účely a charakteristiky souvisejících právních předpisů, technologie termického zpracování a legislativních podmínek zpracování a využití tuhých biopaliv. Praktická část práce zahrnuje uskutečnění prvkové a stechiometrické analýzy vybraných vzorků tuhých biopaliv. Po zhodnocení technologie termického zpracování vybraných vzorků následuje zhodnocení tepelně-emisních a ekonomických ukazatelů.

3 METODIKA PRÁCE

Přehled řešené problematiky tuhých biopaliv a jejich tepelně-emisních vlastností pro energetické využití bude založen na analýzách a studiu odborných zdrojů. Ke zpracování bude čerpána dostupná odborná literatura. Veškerá literatura bude uvedena na seznamu použitých zdrojů. Práce bude doplněna o obrázky a schémata, která usnadní pochopení dané problematiky. Praktická část bakalářské práce bude realizována formou hodnocení prvkové analýzy a stechiometrických výpočtů měřených vzorků, konkrétně řepkové slámy, pšeničné slámy, pelety z pšeničné slámy o průměru 10 mm, topolové kůry a pro porovnání s tradičním fosilním palivem bude měřeno hnědé uhlí Bílina Benekov. Závěry bakalářské práce budou formulovány na základě teoretických poznatků a skutečných výsledků měřených vzorků paliva v praktické části.

4 PŘEHLED ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

4.1 ENERGETICKÁ SITUACE V ČESKÉ REPUBLICE

Výroba elektrické energie v České republice je v současné době založena přibližně ze 40 % na uhlí a z 20 % na jaderném palivu a ropě jakožto primárních energetických zdrojích. Z důvodu vysokého podílu fosilních zdrojů v energetice se vyznačuje ČR vysokou bilancí měrných emisí, jako jsou emise SO₂, NO_x, CO₂. Pro trvale udržitelný rozvoj v energetice je nutné zvýšit množství získané energie z obnovitelných zdrojů a snížení energetické náročnosti a spotřeby. V tab. 1 jsou znázorněny vývoje zdrojů energie v ČR v období 1990-2015. (Petraš, 2008)

Tab. 1 Vývoj primárních energetických zdrojů v ČR v období 1990-2015.

Primární energetické zdroje [PJ]		1990	1995	2000	2005	2010
Černé uhlí	PJ	440,9	318,1	255,4	231,1	218,4
Hnědé uhlí	PJ	876,1	630,6	650,8	616,6	550,5
Zemní plyn	PJ	220,1	274,3	314,0	322,5	337,9
Ropa a ropné produkty	PJ	378,4	338,1	330,0	414,4	389,3
Jaderné palivo	PJ	135,9	132,1	146,8	268,2	303,4
Elektrina (saldo)	PJ	-2,5	1,5	-36,1	-45,5	-53,8
Ostatní paliva	PJ	0,5	1,4	3,5	7,1	8,3
Obnovitelné zdroje energie	PJ	38,4	50,3	56,2	74,7	116,4
Primární energetické zdroje celkem	PJ	2087,9	1746,4	1720,5	1889,1	1870,3

Primární energetické zdroje [PJ]		2011	2012	2013	2014	2015
Černé uhlí	PJ	214,2	199,8	204,4	195,3	185,6
Hnědé uhlí	PJ	544,3	521,8	481,5	469,4	484,1
Zemní plyn	PJ	285,1	287,1	290,8	258,8	271,4
Ropa a ropné produkty	PJ	378,4	373,0	358,9	379,8	360,2
Jaderné palivo	PJ	306,4	328,5	333,1	328,4	279,7
Elektrina (saldo)	PJ	-61,4	-61,6	-60,8	-58,7	-45,1
Ostatní paliva	PJ	9,1	9,3	9,0	10,4	10,7
Obnovitelné zdroje energie	PJ	125,3	134,3	149,6	152,2	163,5
Primární energetické zdroje celkem	PJ	1801,5	1792,2	1766,4	1735,7	1710,1

(Primární energetické zdroje, str. 1)

4.2 CHARAKTERISTIKA BIOMASY

Biomasa je biologicky rozložitelná část produktů z lesnické a zemědělské činnosti a rovněž odpadů vznikajících při průmyslové činnosti, nebo jako součást smíšeného komunálního odpadu. (Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2015/1513, 2015) Základním zdrojem biomasy jsou rostliny, které jsou schopné s využitím fotosyntézy produkovat sacharidy a bílkoviny. V nich je uložen uhlík a uhlíková vazba, která obsahuje energii. (Weger, 2009)

4.2.1 Základní rozdělení biomasy

Rozdělení tuhých biopaliv je založeno na původu a zdroji biopaliva. Podle původu jsou paliva rozdělena do hlavních skupin následovně:

- a) dřevní biomasa
- b) bylinná biomasa
- c) ovocná biomasa
- d) směsi a příměsi

Příklady biomasy jako paliva na bázi dřevin jsou dle normy uvedeny v obr. 1, na bázi ovocné biomasy v obr. 2 a na bázi stébelnin a bylin na obr. 3. (ČSN EN ISO 17225-1)

4.2.2 Dřevní biomasa

Lesní, plantážové a jiné původní dřevo

Jde o dřevo původem z lesů, parků, zahrad a plantáží. Může být upravováno zmenšením velikosti částic, odstraněním kůry, zvlhčením a sušením.

Odpady z dřevozpracujícího průmyslu

Jedná se o chemicky ošetřené dřevní zbytky vzniklé například při chemickém ošetřování dřeva, při jeho lepení a barvení. Tyto chemické ošetření nesmějí obsahovat těžké kovy a organické halogenové sloučeniny. Dále se jedná o chemicky neošetřené dřevní zbytky, jako jsou zbytky po řezání klád, po prořezávce lesa nebo po odstranění kůry z kmene.

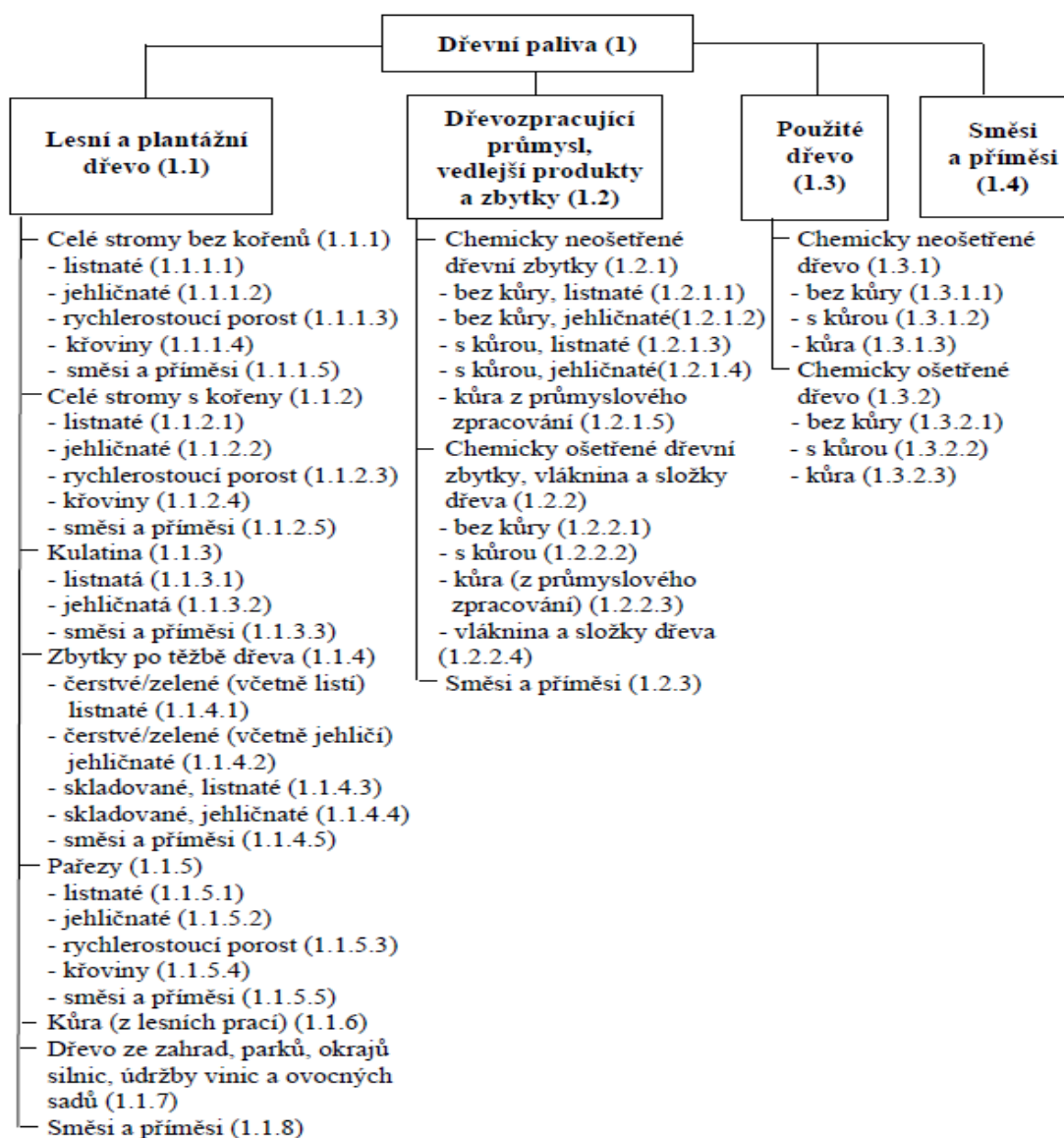
Použité dřevo

Zahrnuje dřevo od zákazníků a společností a je děleno na chemicky ošetřené a neošetřené. Stejně jako u kategorie odpadů z dřevozpracujícího průmyslu nesmí obsahovat těžké kovy a organické halogenové sloučeniny. (Jevič a kol., 2005)

Homogenní směsi a směsi

Tato kategorie zahrnuje směsi a příměsi dřevní biomasy ze skupiny 1.1 až 1.3. Viz obr. 1. Homogenní směsi vznikají úmyslným mísením a směsi neúmyslným mísením materiálu. (ČSN EN ISO 17225-1)

Obr. 1 Klasifikační schéma dřevních paliv podle původu a zdrojů v souladu ČSN EN ISO 17225-1.



4.2.3 Ovocná biomasa

Ovoce ze sadů a zahradnictví

V této skupině se nachází ovoce ze stromů a křovin a díle plody z bylin.

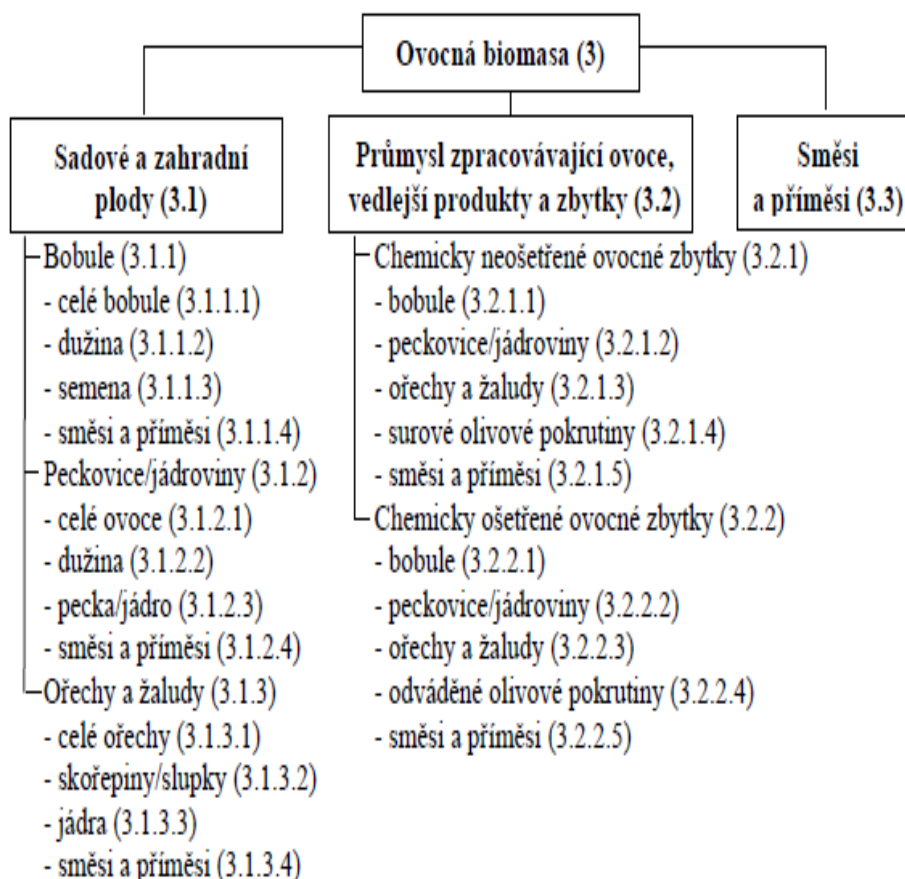
Vedlejší produkty a zbytky z potravinářského průmyslu a průmyslu zpracovávajícího ovoce

Jedná se o zbytkový materiál po průmyslové úpravě a manipulaci. Jako jsou například vylisované zbytky u výroby olivového oleje.

Homogenní směsi a příměsi

Homogenní směsi vznikají úmyslným mísením a směsi neúmyslným mísením materiálu. Jedná se směsi bylinné biomasy ze skupin 3.1 až 3.2 uvedené na obr. 2. (ČSN EN ISO 17225-1)

Obr. 2 Klasifikační schéma ovocné biomasy v souladu s ČSN EN ISO 17225-1.



4.2.4 Bylinná biomasa

Bylinná biomasa ze zemědělství a zahradnictví

Jde o bylinný materiál ze zahrad, parků, zemědělských a zahradních polí. Tento materiál je možné sušit a lze ho upravovat jen zmenšením velikosti částic. (Jevič a kol., 2005)

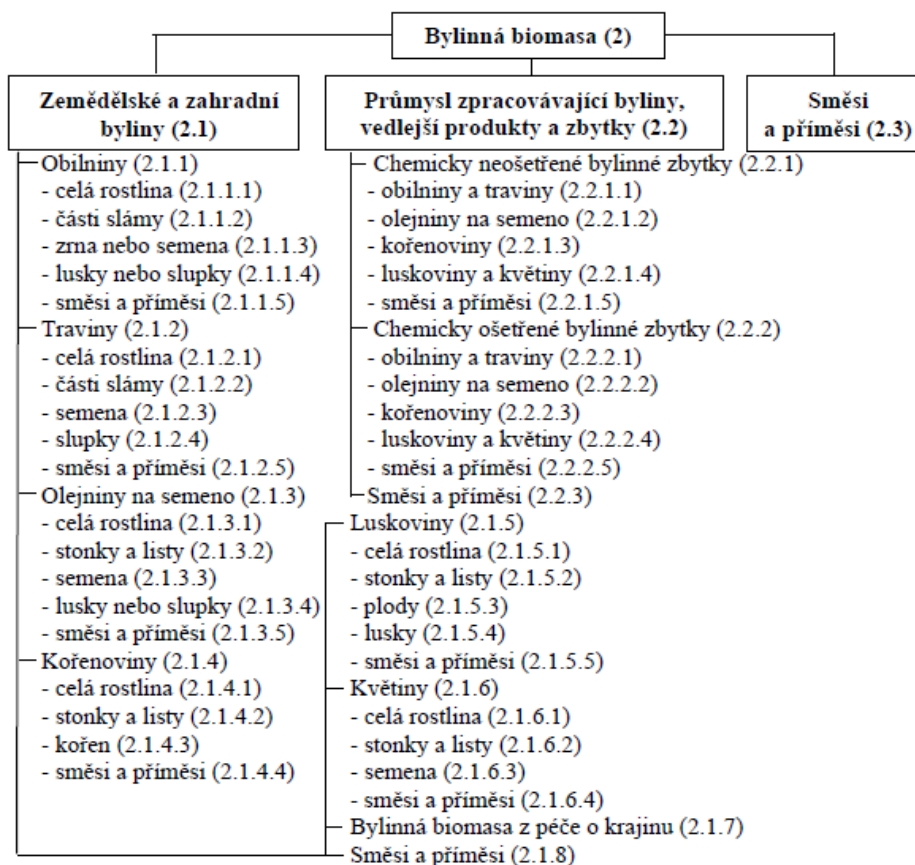
Vedlejší produkty a zbytky z potravinářského průmyslu a průmyslu zpracovávajícího byliny

Jsou materiály z bylinné biomasy, které zůstaly po průmyslové úpravě a manipulaci. Jde například o zbytky surové zeleniny z potravinářského průmyslu a z výroby cukru z cukrové řepy.

Homogenní směsi a příměsi

Homogenní směsi vznikají úmyslným mísením a směsi neúmyslným mísením materiálu. Jedná se směsi bylinné biomasy ze skupin 2.1 až 2.2 uvedené na obr. 3. (ČSN EN ISO 17225-1)

Obr. 3 Klasifikační schéma bylinné biomasy v souladu s ČSN EN ISO 17225-1.



4.3 ENERGETICKÝ POTENCIÁL

Dle Akčního plánu pro biomasu v ČR na období 2012–2020 schváleného vládou ČR, při zachování 100 % potravinové soběstačnosti a při zohlednění nepoužitelné plochy (např. chráněné krajinné oblasti) je k dispozici plocha 1 120 000 hektarů pro možné energetické využití.

Podle druhu původu rozdělujeme biomasu na zemědělskou, lesní a odpadní. (Ministerstvo zemědělství, 2012)

4.3.1 Energetický potenciál ze zemědělské půdy

Při ploše 1 120 000 hektarů půdy možné k využití pro záměrné pěstování biomasy je očekáván střední energetický potenciál 161,4 PJ.rok⁻¹, z něhož je 44 % získaných z vedlejších produktů, jako jsou plevy, pokrutiny a exkrementy hospodářských zvířat, 40 % z biomasy z orné půdy a 16 % z trvalých travních porostů. (viz. tab. 2) (Ministerstvo zemědělství, 2012)

Tab. 2 Energetický potenciál ze zemědělské půdy.

Původ biomasy	Výměra	Střední hodnota	
	tis.[ha]	[PJ.rok ⁻¹]	[%]
Orná půda pro energetické využití	680	64,6	40
Trvalé travní porosty	440	26,1	16
Vedlejší produkty	*	70,7	44
Celkem	1120	161,4	100

(Ministerstvo zemědělství, str. 14)

Vedlejší produkty

Jsou důležitou součástí potenciálu zemědělské biomasy. Jde převážně o slámu obilovin a řepky, dále o exkrementy hospodářských zvířat, vedlejší produkty z výroby biopaliv a vedlejší produkty z čištění obilí. Při stanovování využitelného energetického potenciálu byla zohledněna potřeba ponechání podílu slámy pro zachování obsahu organické složky v půdě (koeficienty 0,65 a 0,45). V současné době je energetické využití slámy z řepky nízké a proto představuje určitou energetickou rezervu pro budoucí využití. Celkový energetický potenciál

vedlejších produktů je 71 PJ.rok⁻¹ a nejdůležitější součástí tvoří zbytková obilná sláma s potenciálem 45,3 PJ.rok⁻¹

Pro ukázkou uvedena tab. 3. (Ministerstvo zemědělství, 2012)

Tab. 3 Energetický potenciál vedlejších produktů.

Druh vedlejšího produktu	Technický potenciál [PJ]	Koeficienty pro stanovení využitelného potenciálu	Využitelný potenciál [PJ]
Zbytková obilná sláma	69,7	0,65	45,3
Zbytková sláma řepky	9,8	0,45	4,4
Produkty z čištění a zpracování obilovin	3	1	3
Výpalky, pokrutiny	14	1	14
Exkrementy hospodářský zvířat	4	1	4
Celkem	100,5	-	70,7

(Ministerstvo zemědělství, str. 12)

4.3.2 Energetický potenciál lesní dendromasy

Celkový energetický potenciál bez palivového dřeva využitého pro domácnosti je odhadován na střední hodnotu 28,4 PJ.rok⁻¹, z něhož je 32 % z odpadu z dřevozpracujících výroby, 31% z odpadů z dalšího zpracování dřeva, 18 % z kůry stromů, 17 % z lesních těžebních zbytků (zpracovávají se bez kořenů a pařezů, protože tyto části jsou ekonomicky nerentabilní). Palivové dříví pro průmyslové využití zaujímá jen 2 % z celkového energetického potenciálu, z důvodu jeho většinové spotřeby v domácnostech (spotřeba domácností je odhadována na 18 PJ.rok⁻¹). (viz. tab. 4) (Ministerstvo zemědělství, 2012)

Tab. 4 Energetický potenciál z lesní dendromasy.

Druh dendromasy	Střední hodnota	
	[PJ.rok ⁻¹]	[%]
Odpad z dřezpracující výroby	9	32
Odpady z dalšího zpracování dřeva	9	31
Kůra	5	18
Lesní těžební zbytky	4,8	17
Palivové dříví průmyslové	0,55	2
Celkem	28,4	100
Palivové dříví domácnosti	18	-

(Ministerstvo zemědělství, 2012, str. 17)

4.3.3 Energetický potenciál využití biologicky rozložitelného komunálního odpadu

Podle vyhlášky ministerstva životního prostředí je nutno snížit množství biologicky rozložitelného odpadu ukládaného na skládky do roku 2020 na 35 % množství biologicky rozložitelného odpadu uloženého v roce 1995. (Vyhláška č.294/2005 Sb.) Mezi biologické odpady patří odpady vzniklé na zahradách a kuchyňské odpady rostlinného původu, neznečištěné odpadem živočišného původu. (Vyhláška č. 321/2014 Sb.) Biologicky rozložitelný odpad tvoří podle analýz 30-40 % směsného komunálního odpadu. Jedná se o biodegradabilní odpad. Z důvodu vyššího obsahu vody má horší energetické využití. (Směrnice Rady 1999/31/ES) Potenciál biologicky rozložitelného odpadu byl stanoven dle plánu Akčního plánu pro biomasu v ČR na období 2012–2020 na hodnotu 25 PJ.rok⁻¹.

4.3.4 Celkový energetický potenciál pro Českou republiku.

Při aktuálním využitím potenciálu biomasy 94 PJ.rok⁻¹ je zjištěný střední energetický potenciál 214,7 PJ.rok⁻¹ více než dvojnásobný. Pro přehlednost uvedena tab. 5. (Ministerstvo zemědělství, 2012)

Tab. 5 Celkový energetický potenciál pro Českou republiku.

Druh biomasy	Střední hodnota	
	[PJ.rok ⁻¹]	[%]
Biomasa zemědělská	161,4	75,1
Lesní dendromasa	28,3	13,2
biologicky rozložitelný komunální odpad	25	11,7
Celkem	214,7	100

(*Ministerstvo zemědělství ČR, 2012, str. 22*)

4.4 MECHANICKÁ ÚPRAVA PEVNÝCH BIOPALIV

Biomasu určenou pro spalování většinou nelze spalovat přímo a je potřeba ji mechanicky upravit. (Malat'ák a Vaculík, 2008) Mechanickou úpravu biomasy určené pro energetické využití spálením lze rozdělit na úpravu pevné biomasy a stébelnin. (Ochodek, 2006)

Mezi pevná biopaliva patří například dřevo. V počátku mechanické úpravy se dřevo rozměrově upravuje za pomoci sekacích, drtících a stříhacích zařízení.

Jako koncová technologie pro úpravu rozměru a tvaru výsledného biopaliva je využíváno briketování, paketování a peletování. (Malat'ák a Vaculík, 2008; Pastorek a kol., 2004)

4.4.1 Stříhací zařízení

Využívají se pro zpracování odpadního dřeva, které není vhodné pro štěpkování. Výsledním produktem je klasické kusové palivové dřevo. Zařízení pracuje na principu jednožové gilotiny, kdy je stříh zajištěn tlakem o ostří protinože. Pomocí podavače se zajišťuje posuv materiálu o 25 až 30 cm. (Ochodek, 2006) Součástí bývá i svazovací zařízení. Jednožové stříhací zařízení jsou využívána soukromými výrobci. Ve velkých kotelnách se využívají na homogenizaci odpadové dřeva zařízení s větším počtem nožů v řadě vzdálených od sebe přibližně 50 cm. (Pastorek a kol., 2004)

4.4.2 Drtící zařízení

Drtiče jsou používány pro úpravu dřeva a dřevního odpadu, které není možné nasekat za pomoci sekacího zařízení. Jde například o dřevo malých rozměrů, pařezy, křoviny a stavební

odpady. (Ilavsky a kol., 1991) Drtiče mají větší spotřebu energie a nerovnoměrnou velikost výstupních částic proto jsou využívány v případech, kdy nejsou kladeny požadavky na rozměry výstupních částic. (Zemánek, 2001)

Drtiče podle rychlosti otáčení rozdělujeme na nízkootáčkové a vysokootáčkové.

a) Nízkootáčkové

Jejich využití je pro drcení nábytkářského odpadu, který se vyznačuje rozměrovou nehomogenitou. Rozdělujeme je na jednoválcové a dvouválcové. Jednoválcové jsou tvořeny válcem s noži umístěnými po obvodu. Podle tvaru nožů je tvarován i protinůž. Dvouválcové drtiče (mají-li válce otáčející se proti sobě) nemusejí být vybaveny protinoží.

b) Vysokootáčkové

Využívají se pro zpracování odpadové lesní dendromasy. Rozdělují se na diskové používané pro drcení pařezů a těžebních surovin a na bubnové používané pro drcení křovin, kůry, větví a podobného materiálu. (Pastorek a kol., 2004)

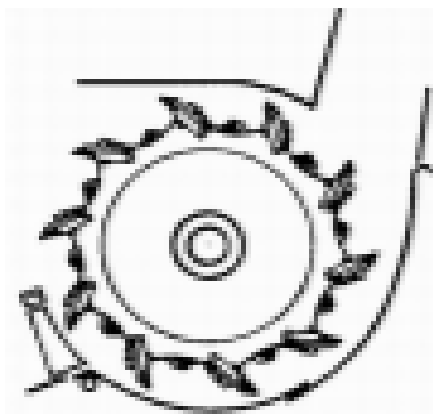
4.4.3 Štěpkovače

Štěpkovací zařízení slouží k beztržskému zpracování dřeva. Podle účelu použití rozdělujeme štěpkovače na mobilní a stacionární. Podle dávkování dřeva na mechanicky dávkované a ručně dávkované. Podle sekacího orgánu na bubnové, šnekové a diskové. (Ilavsky a kol., 1991)

a) Bubnové štěpkovače

Jsou využívány pro menší výkony a suroviny menších rozměrů například lesního odpadu. Sekací nože jsou umístěny po obvodu rotujícího válce. Schéma sekacího ústrojí bubnového štěpkovače na obr. 4. (Ilavsky a kol., 1991)

Obr. 4 Schéma sekacího ústrojí bubnového štěpkovače.

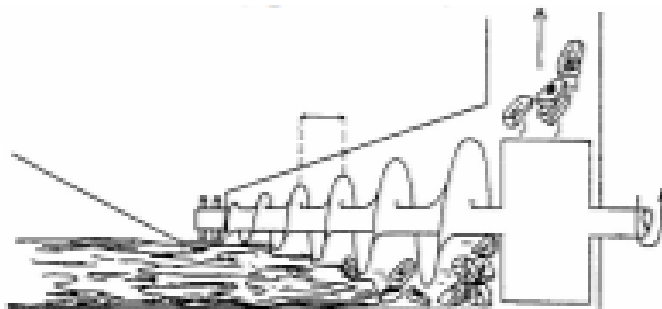


(Simanov, 2008, str.14)

b) Šnekové štěpkovače

Sekací ústrojí má tvar šroubovice, fungující na stejném principu jako kuchyňský mlýnek na maso. Slouží k sekání kmínků a stonků na palivovou štěpku o rozměrech 10 x 10 cm s průměrem okolo 1cm. Princip šnekového štěpkovače je znázorněn na obr. 5. (Ilavsky a kol., 1991)

Obr. 5 Schéma sekacího ústrojí šnekového štěpkovače.

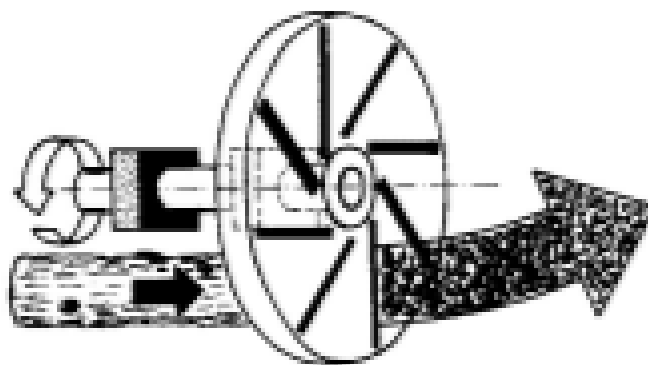


(Simanov, 2008, str.14)

c) Diskové štěpkovače

Patří mezi nejrozšířenější zařízení s nejvyšším výkonem pro výrobu štěpky. Využívají se pro štěpkování dříví v celých délkách například stromků z prořezávek a probírek lesa. Jsou schopné sekát dřevo do průměru 50 cm a jejich výkonnost se pohybuje v rozmezí 250 až 300 m³.h⁻¹. Schéma sekacího ústrojí diskové sekačky obr. 6. (Ilavsky a kol., 1991)

Obr. 6 Schéma sekacího ústrojí diskového štěpkovače.



(Simanov, 2008, str.14)

4.4.4 Peletovací a briketovací lisy

Pro peletovací a briketovací technologii se dá využít dřevní a rostlinné biomasy, peletovat lze i čistírenské kaly. (Malat'ák a Vaculík, 2008)

Důležitým parametrem při lisování biomasy bez použití pojiva je vlhkost. Ta by neměla přesáhnout hranici 20 %, jinak dochází k rozpadnutí výsledného produktu. Doporučená hodnota vlhkosti je do 15 %. Peletová a briketová výroba je energeticky náročná, proto je vhodné vyrábět z materiálu, který je již vysušen a fragmentován v průběhu jiného technologického procesu.

U peletovacích a briketovacích metod rozdělujeme tři systémy zpracování:

a) *Pístové hydraulické nebo mechanické lisy*

Jsou univerzálními stroji pro tvarování pilin, slámy, papíru a pazdří. Jejich součástí je většinou i drtič v kombinaci se dvěma lisy. Celkový příkon linky s dopravníky je kolem 50 kW s výkonností do 0,5 t.h⁻¹. (Pastorek a kol., 2004)

b) *Šnekové lisy jednovřetenové a dvouřetenové*

Tyto lisy jsou využívány pro lisování pilin, pro využití na lisování stébelnin nejsou vhodné. Výsledné brikety se vyznačují svou kvalitou, vysokým stupněm zhutnění a dlouhou trvanlivostí. Celkový příkon těchto zařízení je kolem 50-70 kW. Je-li v k lince zapojeno i sušení surovin, může být celkový příkon vyšší. Výkonnost se pohybuje kolem 0,5 t.h⁻¹. (Ilavsky a kol., 1991)

c) *Protlačovací, granulační lisy*

Rozdělují se na typy s kruhovou, vertikální matricí a horizontální deskovou raznicí. Celkový příkon dosahuje až 150 kW a výkonnost dosahuje hodnot i vyšších než 1 t.h⁻¹. (Ilavský a kol., 1991)

4.4.5 Paketování

Jednou z možností homogenizace lesního odpadu je paketování. Jde o proces, při kterém se lisuje do balíku podobně jako u principu lisování slámy, ale za použití většího lisovacího tlaku z důvodu většího kladeného odporu. (Ochodek a kol., 2007)

4.5 MECHANICKÁ ÚPRAVA ENERGETICKÝCH STÉBELNIN

Stejně jako u pevných paliv je třeba energetické stébelniny mechanicky zpracovat pro efektivnější manipulaci a skladování a pro následné energetické využití. (Ochodek a kol., 2006)

a) *Lisy na slámu*

Ke sklizení energetických stébelnin (např. sláma obilnin a olejnin, len a konopí) se používá nejčastěji sběracích lisů na balíky válcového nebo hranatého tvaru. Další užívanou variantou jsou kompaktní lisy, které materiál nejprve nařezou, dále ho slinují a svážou do požadovaného tvaru a velikosti. Hranatých balíků se využívá ve větších kotlích, které se nacházejí například v teplárnách. Válcové balíky se používají naopak pro menší kotle. (Ilavský a kol., 1992; Ochodek a kol., 2006)

b) *Lisy na válcové balíky*

Díky nízké pořizovací ceně se jedná o nejpoužívanější typ sběracího lisu. Dnešním předpokladem je možnost změny velikosti lisovací komory a tím i změna velikosti balíků podle druhu lisovaného materiálu a řezacího ústrojí. (Koloničný a Hase, 2011) Lisovací stroj je třeba schopný vytvářet dle potřeby balíky o průměru menším než 1 m až po 1,8 m. (Ilavský a kol., 1992)

c) *Lisy na hranaté balíky*

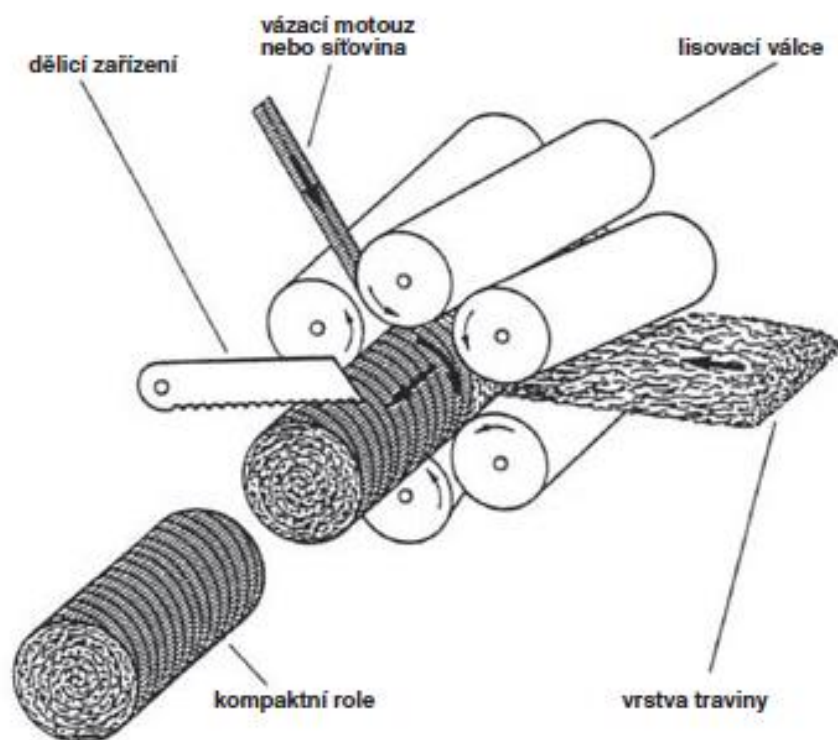
Tyto lisy mají řezací ústrojí umístěno za sběračem. Za lisem je umístěn mechanizovaný vozík pro dva nebo čtyři balíky. Za pomoci tenzometrického čidla je v kabině řidiče zobrazována aktuální vlhkost materiálu. Výhodou hranatých balíků je, že díky jejich tvaru se skladují

mnohem lépe, než balíky válcové. Nevýhodou je vyšší cena lisu na hranaté balíky. (Koloničný a Hase, 2011)

d) *Svinovací lisy*

Metoda svinování byla v historii využívána pro výrobu lan a povřísel. Svinováním se vytvářejí dlouhé provazce válcového tvaru s vysokým stupněm stlačení. Stupeň stlačení se přibližuje stupni stlačení na briketovacích lisech. Průměry svinutých válců jsou od 30 do 80 cm. Ty se poté přídavnou pilou řezou na požadovanou délku. Pokud je výrobek vyroben ze suchého materiálu, může být odvezen z pole nebo louky rovnou k energetickému využití ve vhodném kotli. Pracovní schéma svinovacího lisu je zobrazeno na obr. 7. (Ilavská kol., 1992)

Obr. 7 Pracovní schéma svinovacího lisu.



(Pastorek a kol., 2004, str. 51)

4.6 ZAŘÍZENÍ NA SPALOVÁNÍ BIOMASY

Podle technického řešení a výkonu lze rozdělit zařízení na kotle malých, středních a velkých výkonů.

4.6.1 Kotle malých výkonů

Kotle pro spalování biomasy mají výkon 20 až 60 kW. Tyto kotle slouží převážně pro spalování dřeva. Spalovací proces má čtyři fáze:

1. Fáze sušení, z paliva dochází k odpařování vody.
2. Pyrolýza, uvolňování plynných složek paliva.
3. Fáze spalování plynných složek paliva.
4. Fáze spalování pevných látek, zejména uhlíku.

Při zahřívání dřeva se odpařuje voda. Poté pomocí dodávaného tepla dochází k uvolňování spalitelných plynných složek. Po dosažení zápalné teploty a za předpokladu dostatečného přísunu kyslíku, se plyn vznítí a uvolní se teplo.

Vlastností dřeva je, že 75-85 % plynných látek uvolněných pyrolýzou nehoří na roštu, ale mezi roštem a komínem. Z toho důvodu vyplývají následující konstrukční požadavky:

- a) Pod roštem je přiváděna jen menší část kyslíku potřebného k okysličení pevných zbytků paliva.
- b) Větší část kyslíku je přiváděna za rošt do proudu unikajících plynů.
- c) Prostor bezprostředně nad roštem, nebo za ním, musí být konstruován jako prostor udržující žár a nelze ho využít jako výměník tepla, z důvodu udržení plynů a přiváděného kyslíku na zápalné teplotě.

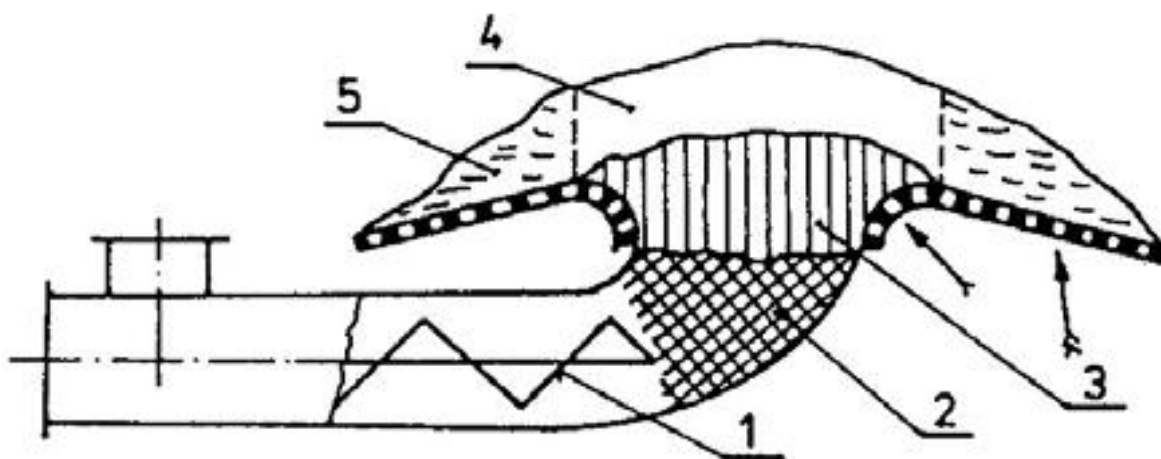
Z uvedených požadavků vyplývá, že efektivní a ekologicky neškodné spalování je možné jen ve speciálních topeništích. V topeništích pro fosilní paliva je spalování možné, ale vykazují se nízkým využitím spalného tepla a emisemi z nedokonalého spalování. Výkon topeniště je ovlivněn suchostí vstupního materiálu, velikostí povrchu materiálu který hoří a množstvím materiálu který hoří současně. Z tohoto důvodu záleží v jaké velikosti je dřevo spalováno, jestli se jedná například o špalky nebo štěpku či drť.

Většina malých spalovacích kotlů má spodní odhořívání paliva. Od běžných kotlů se odlišují principem spalování. Svou konstrukcí umožňují pyrolytickou destilaci, při které dochází k zplyňování veškerých spalitelných složek paliva. Schéma spalovacího zařízení se spodním přívodem paliva na obr. 8.

Spalování probíhá ve třech zónách

1. Zóna - probíhá vysoušení a zplyňování dřevní hmoty.
2. Zóna - dochází k hoření dřevního plynu na trysce za přívodu předehřátého sekundárního vzduchu.
3. Zóna - dochází k dohořívání v nevychlazeném spalovacím prostoru.

Obr. 8 Schéma spalovacího zařízení se spodním přívodem paliva.



Vysvětlivky:

1. *přívod paliva;*
2. *pásma sušení;*
3. *pásma uvolňování prchavé hořlaviny;*
4. *pásma vyhořívání prchavé hořlaviny;*
5. *pásma vyhořívání koksového zbytku.*

<-< primární spalovací vzduch,

<-<< sekundární spalovací vzduch

(Pastorek a kol., 2004, str. 100)

Tento systém spalování zaručuje kotlům vysokou účinnost. Topný výkon je možné plynule regulovat v rozmezí 40 až 110 %. (Pastorek a kol., 2004)

4.6.2 Kotle středních výkonů

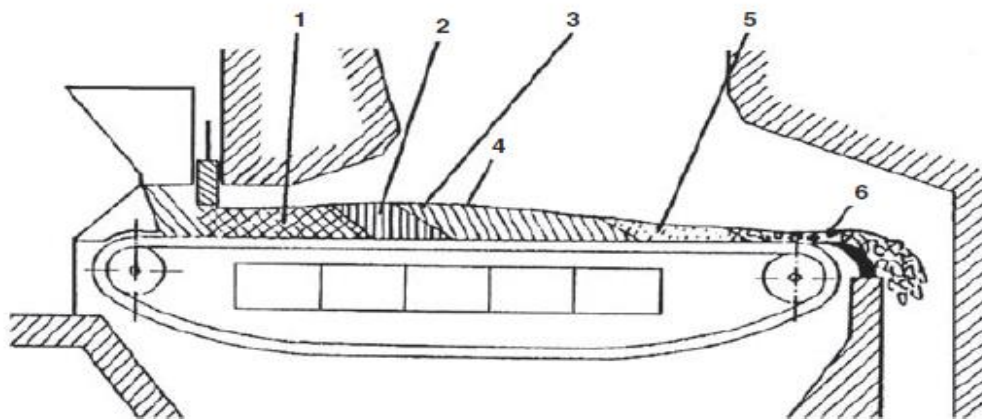
Výkon těchto kotlů se pohybuje mezi 100 kW a 5 MW. Bývají vybaveny posuvným, pásovým nebo řetězovým roštěm. Využívají se pro ústřední vytápění. Vzhledem k automatizaci procesu spalování se používá palivo v podobě dřevní štěpky, odřezků, špalíků, hoblin či pilin. K dopravě paliva do spalovací komory se nejčastěji využívá šnekových dopravníků a podávacího zařízení, které přivádí palivo zdola. Jedná se tedy o spodní přívod paliva a odhořívání shora. (Murtinger a Beranovský, 2006)

Pásový rošty:

Rošt je upevněn na příčné tyče unášené za pomoci postraních tažných řetězů.

Rošt je při provozu tepelně namáhán v horní části, spodní část je ochlazována přiváděným vzduchem. Proto je pásový rošt vhodnější pro výhřevnější palivo až s 18 MJ.kg^{-1} oproti posuvným roštům. Spalování paliva na pásovém roštu je znázorněno na obr. 9.

Obr. 9 Schéma spalování paliva na pásovém roštu.



1 – sušení čerstvého paliva,

(Pastorek a kol., 2004, str. 102)

2 – odplynění a vzněcování paliva,

3 – hoření tuhé hořlaviny, 5 – dohořívání škváry,

4 – vrstva paliva,

6 – škvára

Posuvné rošty:

Jsou elektricky, pneumaticky nebo hydraulicky ovládané stupňovité roštové plochy skloněné pod úhlem 15 až 18 °. Při pohybu paliva z jednoho stupně roštu na další dochází k převrácení a míchání vzníceného a nevzníceného paliva. Na konci roštu je umístěna škvárová výsypka, do které odpadává vyhořelá škvára. Posuvné rošty jsou vhodné k použití u vlhkého typu biopaliva nebo paliva obsahujícího anorganické příměsi s výhřevností 10,2 až 14,6 MJ.kg⁻¹.

Řetězové rošty:

Jedná se nekonečný pás z plochých deskovitých roštníček. Kotle s řetězovým a pásovým roštem jsou využívány méně než posuvné rošty a kotle se spodním přívodem paliva. Důvodem je vyšší pořizovací cena. (Pastorek a kol., 2004)

4.6.3 Kotle velkých výkonů

Kotlů o výkonu nad 5 MW je využíváno pro centralizované zásobování tepla, velmi často se společnou výrobou tepla a elektřiny, díky které se celková účinnost zařízení zvýší. Odborníci předpokládají, že díky masovému rozšíření tepláren s kogenerací by mohla být v budoucnu nahrazena část velkých elektráren spalujících uhlí. Pro výrobu elektřiny se využívá parních a plynových turbín nebo motorů. (Trnobranský, 1996)

4.6.4 Zplyňování

Zplyňování je termochemickou přeměnou biomasy při přívodu omezeného množství kyslíku a vyšších teplotách pohybujících se v rozmezí 800 až 900 °C. Doba setrvání biomasy v reaktoru trvá sekundy až desítky sekund a prakticky všechno organický materiál je přeměněn na plyn. Zplyňování probíhá ve čtyřech základních pochodech:

1. Sušení
2. Pyrolýza
3. Redukce
4. Oxidace

Tyto pochody mohou probíhat souběžně při použití fluidních generátorů nebo postupně například při použití sesuvných generátorů. (Pohořelý a Jeremiáš, 2010)

Pro zplyňování biomasy jsou v současnosti využívány dva způsoby, zplyňování ve fluidních generátorech a zplyňování v generátorech s pevným ložem. Při obou těchto způsobech probíhá zplyňování při atmosférickém tlaku. (Ochodek, 2005)

Zplyňování v generátorech s pevným ložem

Tato metoda je jednodušší a méně finančně náročná oproti fluidním generátorům, ale je využitelná jen pro malé tepelné výkony. Proces zplyňování probíhá při atmosférickém tlaku a za nižších teplot kolem 500 °C. Vzduch proudí buď ve směru dolů (v souproudu) nebo ve směru nahoru (v protiproudu) vzhledem ke směru postupu zplyňovaného paliva. Popelové zbytky jsou odváděny ze spodní části reaktoru. Největší nevýhodou této metody je značná tvorba dehtových látek, fenolů a jejich následné odstraňování. (Jakubes a kol., 2006)

Zplyňování ve fluidních generátorech

U tohoto typu zplyňování probíhá proces při vyšších teplotách 850 až 950 °C, tím je minimalizován obsah dehtových látek a vyšších uhlovodíků v plynu. Tyto generátory se využívají pro velké výkony v řádech stovek MW. (Kolát a kol., 2007)

Mezi hlavní výhody tohoto procesu dále patří vysoká výhřevnost, vyšší přenos tepla a hmoty z paliva, větší různorodost použitého paliva a netavící se popel. Fluidní generátor může pracovat se směsí různých paliv, což se hodí pro zemědělské zbytky a dřevo. (Ochodek a kol., 2007)

4.7 LEGISLATIVA

Při spalování organických paliv dochází ke vzniku CO₂ a H₂O. V závislosti na obsahu sloučenin v biomase a podmínkách procesu jeho spalování, vzniká množství dalších látek, které jsou označovány jako znečišťující. Jedná se především o oxid uhelnatý, který vzniká při nedokonalém spalování. Při dodržení dostatečného množství vzduchu a spalovací teploty oxiduje CO na CO₂ a jeho emise jsou minimální. Dále jde o oxidy dusíku NO_x vznikající z dusíku obsaženém v palivu při spalovacích teplotách 700 až 900 °C. Další znečišťující látkou je oxid siřičitý. Biomasa se vyznačuje nízkým obsahem síry, proto jsou jeho emise velmi nízké. (Pastorek, 2004) Při spalování vznikají také tuhé znečišťující látky, jedná se o prachové částice o rozměrech 0,1 μm až 0,5 mm. Nejdůležitějším právním předpisem týkajícím se povoleného množství emisí vzniklých při spalovacím procesu je zákon k ochraně ovzduší č. 201/2012 Sb., zákon rozděluje emisní normy podle tepelného výkonu kotle. (Zákon č. 201/2012 Sb.) Od roku 2018 k novelizaci zákona vyhláškou 415/2012 Sb. a dochází k výraznému zpřísnění všech emisních limitů, zejména v oblasti tuhých znečišťujících látek. Pro příklad tab. 6kde jsou uvedeny specifické emisní limity pro stacionární zdroje uvedené do provozu 20. prosince 2018 nebo později. (Vyhláška č.415/2012Sb.)

Tab. 6 Specifické emisní limity.

Druh paliva	Specifické emisní limity [mg.m ⁻³]											
	> 0,3 až < 1 MW				1-5 MW				> 5-50 MW			
	SO ₂	NO _x	TZL	CO	SO ₂	NO _x	TZL	CO	SO ₂	NO _x	TZL	CO
Pevné palivo - biomasa	-	600	100	400	133 ²⁾	333	33	500	133 ²⁾	200	13 ³⁾	300 ¹⁾

Vysvětlivky:

¹⁾ Platí v případě spalování výlisků z biomasy. Pro spalování ostatních druhů biomasy platí emisní limit 500 mg.m⁻³.

²⁾ Emisní limit neplatí pro spalování výlučně dřevní biomasy

³⁾ V případě spalovacích stacionárních zdrojů o celkovém jmenovitém tepelném příkonu do 20 MW včetně platí emisní limit 20 mg.m⁻³

(Vyhláška č.415/2012Sb., část II)

4.8 VLASTNOSTI TUHÝCH BIOPALIV

4.8.1 Základní složení a vlastnosti tuhých biopaliv

Při hodnocení jakosti paliva nebo určení typu spalovacího zařízení je nutné znát jeho charakteristické vlastnosti, jako jsou například procentuální hmotnostní podíl vody, síry, prchavé hořlaviny, popelovin v palivu, jeho výhřevnost a spalné teplo, charakteristické teploty popele, spékavost popele a fyzikálně-mechanické vlastnosti. Tuhé palivo je tvořeno třemi základními složkami: celkový obsah vody, popelovin a hořlaviny. (Rybín, 1985)

Toto složení je možné vyjádřit vztahem: W+H+C+S+O+N+A =100 %, přičemž W, H, C, S, O, N, A jsou procentuální hmotnostní podíly vody, vodíku, uhlíku, síry, kyslíku, dusíku a popelovin původního paliva. Voda s popelem jsou nehořlavou součástí paliva, která je považována za nežádoucí z důvodu snižování výhřevnosti paliva. Hořlavou částí paliva jsou vodík, uhlík, síra a dusík. Exotermických reakcí se vzdušným kyslíkem se účastní pouze vodík, uhlík, síra a kyslík jako okysličovadlo. Níže jsou uvedeny spalovací reakce hořlavých prvků se vzduchem:



Dusík se spalováních reakcí neúčastní. Odchází s kouřovými plyny nebo dochází k jeho sloučení s kyslíkem a vznikají škodlivé emisní složky NO a NO₂. *Uhlík* je při spalování hlavním zdrojem tepelné energie, v palivu je obsažen v podobě organických sloučenin. *Vodík* má příznivé vlastnosti na výhřevnost paliva díky tomu, že při jeho hoření se vyvine až 4 krát více tepla na jednotku hmotnosti než u uhlíku. *Síra* zvyšuje výhřevnost, ale v palivu je nežádoucím prvkem neboť produkty síry (SO₃, SO₂) jsou nežádoucími emisemi. *Kyslík* je také nežádoucím prvkem z důvodu, že váže vodík a uhlík na hydroxiny, vodu a oxidy. Výsledné kouřové plyny jsou směsí vzdušného dusíku, CO₂, H₂O, SO₂, SO₃, NO, NO₂, vodní páry a dalších prvků. (Rybín, 1985; Malat'ák a Vaculík 2008)

4.8.2 Výhřevnost a spalné teplo tuhých biopaliv

Spalné teplo je množství uvolněného tepla dokonalým spálením měrné jednotky paliva při ochlazení vzniklých spalin na teplotu 0 °C za předpokladu, že pára, která vzniká při spalování, zcela zcondenzuje. V provozních podmínkách však spaliny odcházejí při vyšší teplotě než 100 °C a voda se mění v páru. Z tohoto důvodu se při tepelných výpočtech častěji používá výhřevnost paliva. *Výhřevnost paliva* je množství tepla, které je uvolněno při dokonalém spálení paliva a ochlazení spalin na 0 °C, při kterém vlhkost paliva zůstane ve spalinách v podobě vodní páry. Hodnota výhřevnosti je nižší než hodnota spalného tepla o množství tepla, které bylo potřebné k ohřevu vody z původní teploty na 100 °C a také o skupenské teplo vypařování vody. (Obroučka, 2001) Na výhřevnost paliva má tedy zásadní vliv obsah vody, jelikož zmenšuje obsah sušiny a značná část energie se spotřebuje na její odpaření bez využití. Celkové množství tepla potřebného na odpaření vody je přibližně 2,5 MJ na 1 kg vlhkosti. Na výhřevnost má také vliv činnost hub, plísní a mikroorganismů. Pro příklad- pokud spalujeme palivo, jehož obsah vody je 50% spotřeba paliva je oproti vysušenému dřevu bezmála dvojnásobná. Proto je nutné dbát na vysušení dřeva. Pro příklad uvedena tab. 7.

Tab. 7 Vliv obsahu vody na výhřevnost.

Obsah vody (%)	Dřevo
	Výhřevnost (MJ.kg ⁻¹)
0	18,5
10	16,4
20	14,3
30	12,2
40	10,1
50	8,0
60	6,0

(Pastorek a kol., 2004, str. 84)

U vysušeného dřeva pocházejícího z listnatých stromů se výhřevnost pohybuje kolem 18 MJ.kg⁻¹ a u jehličnatých 19 MJ.kg⁻¹. Stejných hodnot výhřevnosti dosahují paliva z travin a slámy obilovin. Jde o necelou polovinu výhřevnosti ropných paliv. (Pastorek a kol., 2004)

4.8.3 Obsah vody v tuhých biopalivech

V každém tuhém biopalivu je obsažena voda. Jedná se o nežádoucí složku, neboť je nehořlavá a tím snižuje výhřevnou hodnotu paliva. Obsah vody se mění v průběhu času a platí, že starší palivo obsahuje méně vody než mladší. (Malat'ák a Vaculík, 2008)

Pro palivo určené ke spalování tedy platí, že čím méně obsahuje vody, tím je vhodnější. Snižování vlhkosti v biomase se docílí jeho sušením, vždy ale bude mít nejméně 10 % vlhkosti. Dřevo i štěpka, které jsou dobře skladované pod střechou a provětrané mají kolem 30 % vlhkosti. Vlhkost uskladněných balíků slámy se pohybuje v rozmezí 14 až 16 %. V praxi se určuje vlhkost dvěma způsoby- podle energetického a dřevozpracujícího průmyslu, který je největším dodavatelem biopaliv. Proto je nutné znát, o který způsob se jedná. Pro porovnání tab. 8. (Pastorek, 2004)

$$\text{Dřevozpracující průmysl: } W_d = \frac{H_1 - H_2}{H_2} \cdot 100, \quad (\%) \quad (4.8.4)$$

Kde:

H_1 je hmotnost surového dřeva (kg), H_2 je hmotnost vysušeného vzorku (kg),

Energetický obsah vody : $W_d = \frac{H_1 - H_2}{H_1} \cdot 100, \quad (\%) \quad (4.8.5)$

Tab. 8 Porovnání energetického a dřevařského určení vlhkosti paliva.

Vlhkost W (%)	Dřevařská vlhkost Wd (%)
0	0
10	11
20	25
30	43
40	67
50	100
60	150

(Pastorek a kol., 2004, str. 83)

4.8.4 Obsah popela v tuhých biopalivech

Tuhé palivo obsahuje minerální látky, které se nazývají popeloviny. Ty jsou tvořeny převážně kaolitem, křemičitany vápníku, železa a hořčíku, kysličníkem křemičitým, uhličitánem vápenatým a železitým, pyritem a síranem vápenatým. (Drake a Hubard, 1963) Při dokonalém spalování tuhého paliva v oxidační atmosféře za teploty 800 °C dochází k rozkladu popelovin na těkavé zplodiny. Zbylému tuhému zbytku se říká popel. Podobně jako u vody jde o složku, která snižuje výhřevnost paliva. (Obroučka, 2001) Popel je tvořen převážně oxidy, Fe₂O₃, SiO₂, MnO, Al₂O₃, FeO, CaO, MgO, K₂O, Na₂O, SO₃ a P₂O, dále prvky jako například Pb, As, Zn, Be, Ni, Ge. (Rybín, 1985) Paliva z biomasy mají nízký obsah popela (např. dřevní odpad má přibližně o 86 % méně popele než hnědé uhlí). Z toho vyplývá, že při spalování dřevního odpadu jsou nižší emise pevných částic a oproti uhlí, které vyžaduje kontinuální odebrání popela, postačí jednorázové odebrání popele po určitém časovém úseku. (Trnoblanský, 1996)

4.8.5 Prchavá hořlavina v tuhém biopalivu

Prchavá hořlavina je tvořena plynnými hořlavými látkami, které se uvolňují z paliva při jeho zahřátí za nepřístupu vzduchu. Obsah a průběh jejího uvolňování je při spalovacím procesu důležitou hodnotou. Stanovení prchavé hořlaviny v palivu se určuje podle normy ČSN 44 1351. Prchavá hořlavina stabilizuje proces spalování a napomáhá ke vznícení paliva. (Malat'ák a Vaculík, 2008) Na obsah prchavé hořlaviny má vliv stáří paliva, u geologicky starého paliva, jako je například černé uhlí, je její obsah malý, čím je palivo mladší tím je jeho obsah vyšší, jako například u dřeva. Je tedy zřejmé, že mladší palivo se díky vyššímu podílu prchavé hořlaviny snadněji zapaluje než palivo starší. (Trnobranský, 1996) Dojde-li k nevyhoření prchavé hořlaviny, například z důvodů nedostatečně velkého ohniště, odchází s kouřovými plyny. Taková ztráta se nazývá ztráta chemickým nedopalem. Pokud se tyto plyny ochladí pod spalovací teplotu, začnou se tvořit saze, které se usazují na výhřevných plochách, což je nežádoucí. (Malat'ák a Vaculík, 2008; Trnobranský, 1996)

4.8.6 Obsah síry v tuhém biopalivu

Síru obsaženou v palivu rozdělujeme na organickou a anorganickou. Organická síra je spalitelná a je součástí hořlaviny paliva. Vyšší obsah síry v tuhých palivech je nežádoucí a může vést k poškození kotlů. Podle praxe se za vyšší obsah považují hodnoty vyšší než 1,8% síry z celkové hmotnosti paliva. (Rybín, 1985) Při spalovacím procesu se spalitelná síra přeměňuje na oxid siřičitý SO_2 . Pokud je spalovací teplota okolo $500\text{ }^\circ\text{C}$ a jsou v přítomnosti katalyticky působící látky, tak se jeho část přemění na oxid sírový SO_3 a ten s vodní párou vytvoří kyselinu sírovou, která působí korozivně na železné části spalovacího zařízení. Výhodou biopaliv je, že obsahují velmi malé množství síry. (Malat'ák a Vaculík, 2008)

4.8.7 Obsah chloru v tuhém palivu

Chlór se v palivu řadí mezi nežádoucí prvky, z důvodu tvorby dioxinů a kyseliny chlorovodíkové. Dioxiny vznikají při nesprávném nastavení spalovacích podmínek. Při inhalaci jsou jedovaté i v malých dávkách. Kyselina chlorovodíková vzniká při reakci s vodou ve spalinách a působí korozivně. (Baláš, 2009)

5 PRAKTICKÁ ČÁST

5.1 Popis měřených vzorků

V laboratoři analýzy organických materiálů byl proveden rozbor následujících paliv: Řepková sláma, pšeničná sláma, pelety z pšeničné slámy o průměru 10 mm, topolová kůra a pro porovnání hnědé uhlí.

Řepková sláma - Je hlavní olejninou pěstovanou v České republice. V roce 2017 bylo 393 tis. ha. osevní plochy a hektarový výnos činil 3,46 t.ha¹. Řepková sláma se vyznačuje vysokou výhřevností až 16 MJ.kg⁻¹. (Liška, 2016; EkoWATT, 2007)

Pšeničná sláma - V roce 2017 bylo v České republice 832,1 tis. ha. osevní plochy a průměrný výnos činil 5,59 t.ha⁻¹. Z celkové produkce pšenice je 95,8 % pšenice ozimé a 4,2 % pšenice jarní. Pšenice je na trhu dominantní rostlinou a z celkové nabídky obilovin tvoří 63,8%. Pro technické využití bylo v roce 2017 využito 125 tis. tun. Pšeničná sláma se vyznačuje oproti řepné slámě menší výhřevností cca 15,5MJ.kg⁻¹. (Kůst a Záruba, 2017; EkoWATT, 2007)

Pelety z pšeničné slámy - Vznikají lisováním slámy. Jejich výhřevnost se pohybuje v rozmezí 14 až 17 MJ.kg⁻¹. (EkoWATT, 2007)

Topolová kůra - Topol patří mezi rychle rostoucí dřeviny pěstované pro energetické účely. Těžená ve čtyřletých cyklech kdy po 8 letech je výnos 16,87 t.ha⁻¹.rok¹. (Celjak, 2012)

Hnědé uhlí - Těžba probíhá povrchovým způsobem, v České republice se v roce 2016 vytěžilo 38,528 mil. tun. Množství vytěženého uhlí se každým rokem snižuje, v roce 1990 bylo vytěženo 77,166 mil. tun hnědého uhlí, z toho vyplývá, že těžba hnědého uhlí je na ústupu. (Danišová, 2017) Vzorek hnědého uhlí pocházel z povrchového dolu Bílina, jednalo se o typ Ořech 2, který je vhodný pro spalování v kotlích značky Benekov. Dle distributora je průměrná výhřevnost v původním stavu (při 29 % vody) 17,6 MJ.kg⁻¹.

5.2 Popis použitých zařízení

Laboratoř analýzy organických materiálů

Laboratoř technické fakulty je vybavena základní analytickou přístrojovou technikou, umožňující stanovit tepelně technické parametry vzorků organických materiálů a paliv potřebných pro jejich hodnocení z hlediska možného využití jejich energetického potenciálu.

Jedná se zejména o stanovení obsahu vlhkosti, popela, prchavé hořlaviny, pevného uhlíku, teploty vznícení, hodnoty spalného tepla a elementárního složení (C, H, S, N). Znalost těchto základních parametrů je potřebná zejména z důvodů zajištění kontinuity procesů nejen při termickém zpracování organických materiálů, ale také při hodnocení biologických procesů v provozních podmínkách zemědělsko-lesnického, potravinářského a průmyslového zpracování organických surovin.

Poloautomatický kalorimetr LECO AC-600

Spalné teplo a výhřevnost je jedním z nejdůležitějších kvalitativních parametrů tuhých i kapalných paliv, jako je uhlí, koks, topné oleje, biomasa, či odpadní materiály určené k energetickému využití (spalování). Výhřevnost vzorku je stanovena přesným měřením tepla uvolněného ze vzorku řízeným spalováním v uzavřeném prostředí. Uvolněné teplo je úměrné výhřevnosti analyzovaného materiálu.

Elementární analyzátor CHN628 + S

Základem každého výpočtu nejen tepelné práce energetického zařízení je prvkový rozbor spalovaného vzorku paliva. Prvkové složení paliv má vliv na veškeré stechiometrické výpočty, výpočty tepelných účinností a ztrát spalovacích zařízení a významně ovlivňuje tepelnou práci energetických zařízení. U veškerých druhů vzorků pro energetické využití se používá tzv. elementární (prvková) analýza, kterou se zjišťuje procentuální hmotnostní podíl uhlíku, vodíku, kyslíku, síry a dusíku. Elementární analýza je základní metodou pro posouzení vhodnosti využití organických materiálů ve zpracovatelském zařízení (např. bioplynová stanice či kompostárna apod.) nebo při vyhodnocení jakosti vzorků.

Analyzátor LECO TGA (Termogravimetrický analyzátor) - 701

Od aplikací z potravinářství, krmiv pro hospodářská i potrawy pro domácí zvířata až po aplikace pro analýzu uhlí, nerostných surovin, cementu, všude v těchto průmyslových odvětvích se využívá termogravimetrických analýz – tedy analýz váhových úbytků měřených materiálů v závislosti na narůstající teplotě v řízeném prostředí. Tato metoda je běžná pro analýzu obsahu některých prvků, celkové vlhkosti, popelu, prchavých hořlavin, či ztráty žíháním v široké škále organických, anorganických i syntetických materiálů pro různé oblasti použití.

5.3 Spalné teplo a výhřevnost tuhých paliv

Při procesu spalování se hořlavé látky z paliva slučují s kyslíkem a vznikají produkty spalování, nazývané spaliny. Při tomto procesu dochází k uvolňování určitého množství

tepla, které se u tuhých paliv vztahuje na hmotnostní jednotku $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ za normálních podmínek: $t = 0^\circ\text{C}$, $p = 101,3 \text{ kPa}$, (označení m^3_{N}). V technické praxi se uvolněné teplo vyjadřuje jako výhřevnost Q_i^r paliva nebo jako spalné teplo Q_s^r . (Jevič a kol., 2001)

Spalné teplo je množství tepla, které je uvolněno při dokonalém spálení měrné jednotky paliva kg , m^3_{N} , za předpokladu, že se spaliny ochladí na 0°C a veškerá pára která vzniklá při spalování zkondenzuje. (Obroučka, 1997)

Protože při spalování paliva ve spalovacích zařízeních odchází spaliny, které mají vyšší teplotu než 100°C a voda se tedy mění v páru, je při tepelných výpočtech častěji používána výhřevnost paliva Q_i^r .

Výhřevnost paliva je množství tepla, které je uvolněno při dokonalém spálení paliva a ochlazení spalin na 0°C , při kterém vlhkost paliva zůstane ve spalinách v podobě vodní páry. Výhřevnost paliva je tedy nižší než spalné teplo o množství tepla potřebné k ohřevu vody z původní teploty paliva na 100°C a také skupenské teplo vypařování vody. Celkové množství tepla se uvažuje přibližně 2500 kJ na 1 kg vlhkosti. (Jevič a kol., 2001)

V technické praxi se počítá s výhřevností paliva, protože při spalování tuhých paliv v topeništích odchází odpařená voda současně se spalinami do komína o vyšší teplotě, než je rosný bod vodní páry, tak že nedojde k její kondenzaci a odnáší s sebou část tepla v podobě výparného tepla. (Rybín, 1985).

Závislost mezi spalným teplem Q_s^r a výhřevností Q_i^r lze vyjádřit vztahem podle ISO 1928 (441352)

$$Q_i^r = Q_s^r - (0,02442 \cdot 1000) \cdot (\sigma(w_i^r) + 8,94 \cdot \sigma(H_i^r)), \text{ (kJ}\cdot\text{kg}^{-1}, \text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}_{\text{N}}) \quad (5.1)$$

kde: $\sigma(w_i^r)$ je obsah vody v analytickém vzorku (%),

8,94 .. koeficient pro přepočet vodíku na vodu,

$\sigma(H_i^r)$.. obsah vodíku v analytickém vzorku (%),

0,02442 .. je hodnota, která odpovídá energii spotřebované na ohřev a vytápění 1% vody při teplotě 25°C .

Přepočet výhřevnosti Q_i^r při obsahu veškeré vody $\sigma(w_i^r)$ na jiný obsah veškeré vody $\sigma(w_{ii}^r)$ se provádí podle vzorce:

$$Q_{in}^r = \frac{100 - \sigma(W_{ii}^r)}{100 - \sigma(W_i^r)} \cdot (Q_i^r + 0,02442 \cdot \sigma(W_i^r)) - 0,02442 \cdot \sigma(W_{ii}^r), \text{ (kJ.kg}^{-1}, \text{kJ.m}^{-3}\text{N)} \quad (5.2)$$

kde: $\sigma(W_{ii}^r)$ je obsah veškeré vody, na kterou provádíme přepočítání (%),

$\sigma(W_i^r)$.. obsah veškeré vody v původním vzorku (%),

Q_i^r .. výhřevnost původního vzorku (kJ.kg⁻¹, kJ.m⁻³N).

Nejpřesnější metoda pro určení spalného tepla je měření v kalorimetrech. (ČSN 1928) V technické praxi je určeno spalné teplo a výhřevnost výpočtem, k čemuž se využívá výsledků elementární nebo technické analýzy paliva. (Jevič a kol., 2001)

5.4 Stechiometrie spalovacích procesů

Stechiometrické výpočty spalovacích procesů, doplňují charakteristiky paliva a jsou základem pro jakýkoliv tepelný výpočet. Jsou důležité pro řešení celé řady problémů návrhové praxe a při kontrole práce stávajících spalovacích zařízení. Při těchto výpočtech se stanoví:

- množství a složení spalin,
- výhřevnost paliva (odpadu),
- měrná hmotnost spalin,
- množství kyslíku (vzduchu) potřebného k dokonalému spalování paliva (odpadu),
- adiabatická, teoretická a praktická spalná teplota (Jevič a kol., 2001)

5.5 Výpočty spotřeby vzduchu a množství spalin

Podle podmínek pro spalovací proces, rozeznáváme:

1. *Dokonalé spalování*, dochází při něm k spálení všech hořlavých složek v palivu, takže ve vzniklých spalinách již nejsou obsaženy.

Dokonalé spalování s teoretickým přebytkem vzduchu (L_{\min}), které se dá vypočítat ze stochiometrických vztahů spalovacích rovnic, je možné dosáhnout jen při zcela dokonalém smísení paliva se vzduchem za ideálních spalovacích podmínek. V praktickém provozu však je pro zajištění dokonalého spalování spotřeba vzduchu vyšší než teoretická a závisí na druhu paliva, spalovacího zařízení a oblasti spalování. Jde tedy o přebytek spalovacího vzduchu, který je menší, čím dokonaleji je palivo smíseno se vzduchem. Poměr mezi teoretickou a skutečnou spotřebou vzduchu je nazýván součinitelem přebytku vzduchu n a je roven:

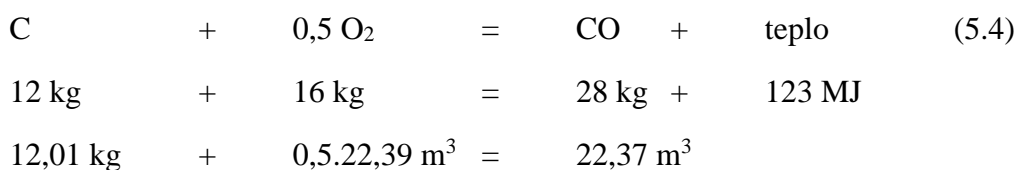
$$n = \frac{L_{skut}}{L_{\min}} = \frac{O_{skut}}{O_{\min}} \doteq \frac{20,95}{20,95 - O_2} \doteq \frac{CO_{2\max}}{CO_2} \quad (5.3)$$

Přebytek vzduchu je nutný pro zaručení dokonalé spalování. Velký přebytek vzduchu je však nežádoucí z důvodu, že čím více vzduchu se spalování zúčastní, tím více tepla je odnášeno spalinami a klesá spalná teplota. Proto je nutné používat optimální přebytek vzduchu. (Jevič a kol., 2001)

2. *Nedokonalé spalování*, při němž je určitá část hořlavých látek obsažena ve spalinách.

Tento způsob spalování vzniká vždy při hodnotě $n < 1$. Může však i nastat i v případě, že $n > 1$ nebo $n = 0$, dojde-li k nedokonalému smísení paliva s oxidačním činidlem.

Základní stechiometrický vztah pro nedokonalé spalování uhlíku je:



Při spalování uhlíku na CO se spotřebuje poloviční objem kyslíku, než při jeho dokonalém spalování na CO₂. Výhřevnost CO je 12 645 kJ.m⁻³. V důsledku značně vyšší rychlosti reakce hoření vodíku proti průběhu hoření uhlíku je ztráta nespáleným vodíkem nulová. Obsah kyslíku ve spalinách je měřítkem přebytku vzduchu jen v případě, že spalování je dokonalé. Pokud obsahují spaliny oxid uhličitý CO₂ i oxid uhelnatý CO, jedná se o *spalování smíšené*.

Výpočet spotřeby vzduchu a množství spalin je možno uskutečnit těmito způsoby:

- 1) Analytický způsob podle údajů elementární analýzy pomocí stechiometrických rovnic.
- 2) Pomocí grafických metod.
- 3) Za pomoci přibližných vzorců, odlišných pro různé druhy paliv (na základě výhřevnosti),

Při spalování odpadních látek se používá pouze první z uvedených způsobů, tedy za pomoci stechiometrických výpočtů. U těchto výpočtů spalování se zjednodušuje zaokrouhlením molekulových objemů a molekulových hmotností. Jako oksyličovadlo se dále uvažuje suchý vzduch o zjednodušeném složení:

- a) Objemově: kyslík 21% O₂, dusík 78,05% N₂. Z toho složení lze vypočítat poměr kyslíku, dusíku a vzduchu ze vztahu:

$$\text{O}_2 : \text{N}_2 : \text{vzduch} = \frac{21}{21} : \frac{78,05}{21} : \frac{100}{21} = 1 : 3,716 : 4,76 \quad (5.5)$$

b) Hmotnostně: kyslík 23,2% O₂, dusík 75,47% N₂. Obdobně určíme poměr vztahem:

$$O_2 : N_2 : \text{vzduch} = \frac{23,2}{23,2} : \frac{75,47}{23,2} : \frac{100}{23,2} = 1 : 3,253 : 4,31 \quad (5.6)$$

V tab. 9 je uvedeno hmotnostní a objemové složení suchého vzduchu bez vodní páry a vzácných plynů.

Tab. 9 Objemové a hmotnostní složení suchého vzduchu.

Plyn	Objemové složení (%)	Hmotnostní složení (%)
O ₂	21,000	23,200
N ₂	78,050	75,474
Ar	0,920	1,280
CO ₂	0,030	0,046

Ke spalování používaný atmosférický vzduch však obsahuje určité množství vodní páry, které je závislé:

- a) na teplotě vzduchu t_v
- b) na relativní vlhkosti vzduchu φ .

Objem vodní páry připadající na 1 m³ suchého vzduchu o teplotě t_v :

$$v_{H_2O} = \varphi \cdot \frac{p_s}{p_c - p_s \cdot \varphi}, \quad (\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (5.7)$$

kde: p_s je tlak vodní páry na mezi sytosti při teplotě t_v (kPa),

p_c .. celkový tlak vlhkého vzduchu (kPa).

Součinitel, který vyjadřuje objemové množství vodní páry obsažené ve vzduchu, má při dané relativní vlhkosti a teplotě vzduchu velikost:

$$v = 1 + \varphi \cdot \frac{p_s}{p_c - \varphi \cdot p_s}. \quad (5.8)$$

Hodnota součinitele bývá přibližně $v=1,04$.

Při přesných výpočtech potřebného objemu spalovacího vzduchu a objemových množství produktů spalování se vychází z molekulové hmotnosti jednotlivých prvků hořlaviny. Molekulové hmotnosti prvků jsou uvedeny v tab. 10. (Jevič a kol., 2001)

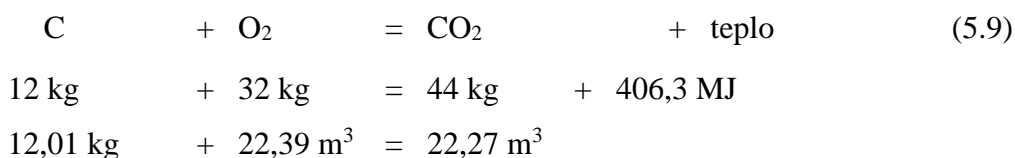
Tab. 10 Molekulové hmotnosti prvků v hořlavině.

Prvek	Kilomol	
	Hmotnostní (kg)	Objemový (m ³)
Vodík H	2,016	22,39
Uhlík C	12,01	22,39
Kyslík O	32,00	22,39
Síra S	32,06	22,39
Dusík N	28,02	22,39

5.6 Spalování tuhých a kapalných paliv

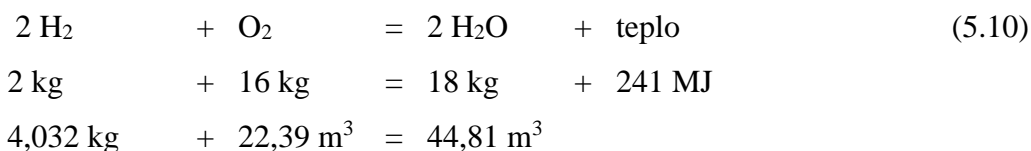
Za použití molekulových hmotností jednotlivých prvků lze vyjádřit vztahy pro oxidační reakce při spalování stechiometrickými rovnicemi:

Spalování uhlíku na oxid uhličitý:



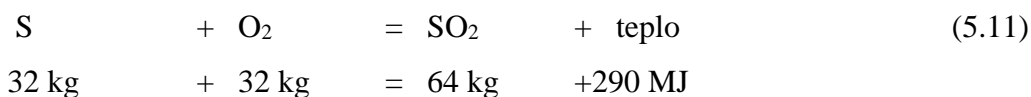
Výhřevnost 1 kg čistého uhlíku je 33,85 MJ.kg⁻¹.

Spalování vodíku na vodní páru:



Výhřevnost 1 kg vodíku je 120,5 MJ.kg⁻¹.

Spalování síry na oxid siřičitý:



$$32,06 \text{ kg} + 22,39 \text{ m}^3 = 21,89 \text{ m}^3$$

Výhřevnost 1 kg síry je $9,0625 \text{ MJ.kg}^{-1}$.

Pro převod ostatních prvků a vlhkosti (vody) do plynné fáze platí:

Pro dusík:

$$\begin{aligned} 2 \text{ N} &= \text{N}_2 & (5.12) \\ 28,013 \text{ kg} &= 28,013 \text{ kg} \\ 28,013 \text{ kg} &= 22,40 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Pro kyslík:

$$\begin{aligned} 2 \text{ O} &= \text{O}_2 & (5.13) \\ 31,999 \text{ kg} &= 31,999 \text{ kg} \\ 31,999 \text{ kg} &= 22,39 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Pro vlhkost platí:

$$\begin{aligned} \text{H}_2\text{O}_{\text{kap}} &= \text{H}_2\text{O}_{\text{pára}} & (5.14) \\ 18,015 \text{ kg} &= 18,015 \text{ kg} \\ 18,015 \text{ kg} &= 22,41 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Všechny objemy a hmotnosti spalovacího vzduchu a spalin v rovnicích (5.9) až (5.14) jsou udávány za tzv. normálních podmínek tj. při teplotě $t=0 \text{ }^\circ\text{C}$ a tlaku $p=101,325 \text{ kPa}$. (Jevič a kol., 2001)

Objemové spalování (hodnoty reálných molárních objemů plynů)

K výpočtům byly použity rovnice (5.7), (5.9) až (5.14). V praxi se pro přepočty používá hodnot reálných molárních objemů plynů.

Teoretické množství kyslíku pro dokonalé spalování:

$$O_{\min} = \frac{22,39}{12,01} \cdot C + \frac{22,39}{4,032} \cdot H + \frac{22,39}{32,06} \cdot S - \frac{22,39}{31,99} \cdot O, \text{ (m}^3_{\text{N.kg}}\text{)} \quad (5.15)$$

Teoretické množství vzduchu pro dokonalé spalování:

$$L_{\min} = O_{\min} \cdot \frac{100}{21}, \text{ (m}^3_{\text{N.kg}}\text{)} \quad (5.16)$$

Skutečné množství vzduchu pro dokonalé spalování:

$$L_{skut} = O_{min} \cdot \frac{100}{21} \cdot n, \quad (\text{m}^3_{\text{N.kg}^{-1}}) \quad (5.17)$$

Teoretické objemové množství suchých spalin:

$$v_{sp_{min}}^s = \frac{22,27}{12,01} \cdot C + \frac{21,89}{32,06} \cdot S + \frac{22,40}{28,013} \cdot N + 0,7805 \cdot L_{min}, \quad (\text{m}^3_{\text{N.kg}^{-1}}) \quad (5.18)$$

kde: C, O, H, N, S, W jsou poměrná množství uhlíku, kyslíku, vodíku, dusíku, síry a veškeré vody v původním palivu (kg.kg^{-1}),

n .. součinitel přebytku vzduchu ().

Objemové množství vlhkých spalin:

$$v_{sp}^v = v_{CO_2} + v_{SO_2} + v_{H_2O} + v_{N_2} + v_{O_2} + v_{Ar}, \quad (\text{m}^3_{\text{N.kg}^{-1}}) \quad (5.19)$$

Objemové množství suchých spalin:

$$v_{sp}^s = v_{CO_2} + v_{SO_2} + v_{N_2} + v_{O_2} + v_{Ar}, \quad (\text{m}^3_{\text{N.kg}^{-1}}) \quad (5.20)$$

kde: $v_{CO_2} = \frac{22,27}{12,01} \cdot C + 0,0003 \cdot L_{skut}$

$$v_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot S$$

$$v_{H_2O} = \frac{44,81}{4,032} \cdot H + \frac{22,41}{18,015} \cdot W + (v-1) \cdot L_{skut}, \quad (\text{m}^3_{\text{N.kg}^{-1}}) \quad (5.21)$$

$$v_{N_2} = \frac{22,40}{28,013} \cdot N + O_{min} \cdot \frac{78,05}{21} \cdot n$$

$$v_{O_2} = O_{min} \cdot (n-1)$$

$$v_{Ar} = 0,0092 \cdot L_{skut}$$

Vyjádření jednotlivých složek spalin v %:

Teoretická objemová koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách:

$$CO_{2_{\max}} = \frac{22,27}{12,01} \cdot C \cdot 100, \quad (\%) \quad (5.22)$$

Teoretická objemová koncentrace oxidu siřičitého v suchých spalinách:

$$SO_{2_{\max}} = \frac{21,89}{32,06} \cdot S \cdot 100, \quad (\%) \quad (5.23)$$

Objemová koncentrace složek spalin ve vlhkých spalinách:

$$CO_2 = \frac{v_{CO_2}}{v_{sp}^v} \cdot 100, \quad (\%) \quad (5.24)$$

$$H_2O = \frac{v_{H_2O}}{v_{sp}^v} \cdot 100, \quad (\%) \quad (5.25)$$

$$SO_2 = \frac{v_{SO_2}}{v_{sp}^v} \cdot 100, \quad (\%) \quad (5.26)$$

$$N_2 = \frac{v_{N_2}}{v_{sp}^v} \cdot 100, \quad (\%) \quad (5.27)$$

$$O_2 = \frac{v_{O_2}}{v_{sp}^v} \cdot 100. \quad (\%) \quad (5.28)$$

6 VÝSLEDKY A JEJICH HODNOCENÍ

V tab. 11 jsou výsledné hodnoty prvkové analýzy jednotlivých vzorků. Jde o průměrné hodnoty, každý jednotlivý vzorek byl měřen třikrát pro přesnější výsledek a zmenšení chyby měřením.

Tab. 11 Výsledné průměrné hodnoty měření prvkové analýzy vzorků paliva.

Vzorek	Obsah vody (% hm.)	Popel (% hm.)	Hořlavina prchavá (% hm.)	Hořlavina neprchavá (% hm.)	Spalné teplo (MJ.kg ⁻¹)	Výhřevnost (MJ.kg ⁻¹)	Uhlík C (% hm.)	Vodík H (% hm.)	Dusík N (% hm.)	Síra S (% hm.)	Kyslík O (% hm.)	Chlór Cl (% hm.)
Značka	W _t ^r	A ^r	V ^r	(NV) ^r	Q _s ^d	Q _i ^r	C _t ^r	H _t ^r	N _t ^r	S _t ^r	O _t ^r	Cl _t ^r
Řepková sláma	9,37	4,98	68,85	16,8	16,705	15,34	41,38	5,2	0,57	0,11	38,09	0,15
Pšeničná sláma	13,1	5,08	66,43	15,39	16,03	14,66	40,67	4,89	0,09	0,11	35,75	0,1
Pelety z pšeničné slámy (10mm)	7,31	3,99	72,15	16,55	17,96	16,53	46,54	5,71	0,19	0,09	35,97	0,2
Topolová kůra	53,57	2,61	41,08	2,74	9,104	6,99	20,14	3,69	0,2	0,01	19,77	0,01
Hnědé uhlí Bílina Benekov	9,94	6,26	40,45	43,35	25,98	24,96	61,43	4,79	0,81	0,29	16,45	0,03

VÝHŘEVNOST

Absolutně nejvyšší hodnotu výhřevnosti dosáhlo hnědé uhlí s hodnotou 24,96 MJ.kg⁻¹ tato naměřená hodnota je vyšší než udává dodavatel díky nižšímu obsahu vody ve vzorku. Nejnížší průměrnou výhřevnost měl vzorek topolové kůry 6,99 MJ.kg⁻¹. Bylo to největší měrou zapříčiněno velkou vlhkostí daného vzorku. Nejvyšší hodnotu vykazovaly pelety z

pšeničné slámy s hodnotou $16,53 \text{ MJ.kg}^{-1}$, hodnoty výhřevnosti dle literatury 14 až 17 MJ.kg^{-1} jsou tedy odpovídající s výsledkem měření. Řepková sláma s $15,34 \text{ MJ.kg}^{-1}$ a pšeničná s $14,66 \text{ MJ.kg}^{-1}$ také korespondují s hodnotami uvedenými v literatuře, viz. podkapitola 5.1.

OBSAH VODY

Voda obsažená v palivu má zásadní vliv na tepelné vlastnosti tuhého paliva. U všech vzorků kromě topolové kůry (53,57 % hm.) byl obsah vody velice nízký, což se pozitivně projevilo na výhřevnosti paliv. Vysoký obsah vody v topolové kůře byl dán její čerstvostí. Opačný případ nastal u vzorku hnědého uhlí, kde dodavatel udává že průměrná výhřevnost je $17,6 \text{ MJ.kg}^{-1}$ při 29 % hm. podílu vody. Z důvodu že koncentrace vody ve vzorku byla jen 9,94 % hm., byla průměrná hodnota výhřevnosti $24,96 \text{ MJ.kg}^{-1}$. Literatura udává, že obsah vody v slámě řepky a obilné slámě se pohybuje okolo 10 %

OBSAH POPELA

Vedle vody má zásadní vliv na tepelné vlastnosti tuhého paliva také obsah popele. Biomasa vykazuje nižší koncentrace popele než hnědé uhlí. Nejmenší podíl popele v biomase má dřevní biomasa (topolová kůra 2,61 % hm.). Z výsledků vyplývá, že rostlinná biomasa má oproti dřevní biomase větší množství popele, což může vyvolat zvýšené množství emisí tuhých zbytků a větší požadavek na odvod tuhých zbytků po procesu spalování. Dle odborné literatury se obsah popele v kůře pohybuje průměrně v rozmezí 3-4 % a v slámě okolo 5 %. Z výsledků měření jsou tyto hodnoty odpovídající. (Ochecová, 2015)

OBSAH KYSLÍKU

Z průměrných hodnot měřených vzorků vyplývá, že řepná a pšeničná sláma ale také pelety z pšeničné slámy mají podobný obsah vzduchu (35,97- 38,09 % hm.). Topolová kůra a hnědé uhlí mají oproti tomu nízké procentuální zastoupení kyslíku.

UHLÍK

Uhlík je nejpodstatnější složkou při uvolňování tepelné energie. Nejmenší koncentrace uhlíku je v topolové kůře, konkrétně 20,14 % hm., u ostatních vzorků biomasy se hodnota pohybuje nad 40 % hm. Referenční hnědé uhlí obsahuje 61,43 % uhlíku.

DUSÍK

Množství dusíku ve vzorcích tuhého biopaliva je nejnižší u pšeničné slámy (0,09 % hm.) a nejvyšší u řepkové slámy (0,57 % hm.). Hnědé uhlí oproti pšeničné slámě dosahuje 9 ti násobné hodnoty (0,81 % hm.).

CHLOR

Koncentrace chlóru v palivu má z důvodu korozivního chování vliv na výběr spalovacího zařízení. Nejnižší koncentraci chlóru vykazuje dřevní biomasa (topolová kůra) s 0,01 hm., rostlinná biomasa vykazuje až dvacetinásobnou koncentraci v původním palivu. V porovnání s dřevěným uhlím jde o řádově srovnatelnou hodnotu. V odborné literatuře je uvedeno že, chlór se dostává do biomasy z hnojiva a jeho hodnoty jsou ve slámě do 0,5% a ve dřevě cca 0,005%. (Jandačka a kol., 2007)

SÍRA

Průměrné hodnoty koncentrace síry ve vybraných vzorcích biomasy jsou velice nízké až třikrát menší oproti hnědému uhlí. Nejnižší průměrnou hodnotu vykazuje topolová kůra s 0,01 % hm. v původním stavu. Vyplývá tedy, že dřevní biomasa je co do obsahu síry vhodnějším palivem než rostlinná biomasa a hnědé uhlí. Průměrné hodnoty síry z naměřených vzorků korespondují s literaturou, která rovněž uvádí, že biomasa vykazuje v porovnání s fosilními palivy nízké hodnoty (řepková sláma cca 0,3 %, obilní sláma až 0,2 %.). (Jandačka a kol., 2007)

Stechiometrická analýza (Objemová)

Specifické emisní limity jsou vztaženy k celkovému jmenovitému tepelnému příkonu a na normální stavové podmínky a suchý plyn při referenčním obsahu kyslíku v odpadním plynu 6 % v případě pevných paliv s výjimkou biomasy, 11 % v případě biomasy. (Vyhláška č. 415/2012 Sb.) K optimálnímu spalování dřevních paliv a rostlinné biomasy by mělo docházet při hodnotě součinitele přebytku vzduchu $n = 2,1$ (tj. při 11% obsahu kyslíku ve spalinách).

Stechiometrická analýza řepkové slámy

Skutečné množství vzduchu pro dokonalé spalování Řepkové slámy je $7,98 \text{ m}^3\text{N.kg}^{-1}$.

Objemové množství suchých spalin u řepkové slámy bylo $7.96 \text{ m}^3\text{N.kg}^{-1}$. Teoretická objemová koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách je 20,60 %. Teoretická objemová koncentrace oxidu siřičitého v suchých spalinách ($\text{SO}_{2\text{max}}$) byla 0,02 %. Toto množství je shodné s objemovou koncentrací změřenou ve vzorku pšeničné slámy. Hodnoty jsou uvedeny v tab. 12.

Tab. 12 Stechiometrická analýza, objemová koncentrace (řepková sláma).

<i>Objemové spalování</i>				
O_{min}	Teoretické množství kyslíku pro dokonalé spalování	0,79	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.15
L_{min}	Teoretické množství vzduchu pro dokonalé spalování	3,78	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.16
L_{skut}	Skutečné množství vzduchu pro dokonalé spalování	7,98	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.17
n	Součinitel přebytku vzduchu	2,11		
v^{v}_{sp}	Objemové množství vlhkých spalin	8,97	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.19
v^s_{sp}	Objemové množství suchých spalin	7,96	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.20
v^s_{spmin}	Teoretické objemové množství suchých spalin	3,73	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.18
v_{CO_2}	Objemové množství CO_2	0,77	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.21
v_{SO_2}	Objemové množství SO_2	0,00	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.21
v_{H_2O}	Objemové množství H_2O	1,01	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.21
v_{N_2}	Objemové množství N_2	6,23	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.21
v_{O_2}	Objemové množství O_2	0,88	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.21
v_{Ar}	Objemové množství Ar	0,07	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.21
<i>Vyjádření jednotlivých složek spalin v %</i>				
CO_{2max}	Teoretická objemová koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách	20,60	%	5.22
SO_{2max}	Teoretická objemová koncentrace oxidu siřičitého v suchých spalinách	0,02	%	5.23
CO_2	Oxid uhličitý	9,67	%	5.24
SO_2	Oxid siřičitý	0,01	%	5.26
H_2O	Voda	12,73	%	5.25
N_2	Dusík	78,32	%	5.27
O_2	Kyslík	11,08	%	5.28

Stechiometrická analýza pšeničné slámy

Skutečné množství vzduchu potřebného pro dokonalému spálení vzorku pšeničné slámy je $7,84 \text{ m}^3\text{N.kg}^{-1}$. Objemové množství suchých spalin u pšeničné slámy bylo $7,81 \text{ m}^3\text{N.kg}^{-1}$. Teoretická objemová koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách je 20,63 %. Objemové množství SO_2 je zanedbatelné (0,02 %), je to dáno velice nízkým obsahem síry ve vzorku pšeničné slámy. Z výsledků vyplývá, že pšeničná i řepková sláma má podobné emisní vlastnosti. Hodnoty jsou uvedeny v tab. 13.

Tab. 13 Stechiometrická analýza, objemová koncentrace (pšeničná sláma).

Objemové spalování				
O_{min}	Teoretické množství kyslíku pro dokonalé spalování	0,78	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.15
L_{min}	Teoretické množství vzduchu pro dokonalé spalování	3,72	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.16
L_{skut}	Skutečné množství vzduchu pro dokonalé spalování	7,84	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.17
n	Součinitel přebytku vzduchu	2,11		
v_{sp}^v	Objemové množství vlhkých spalin	8,83	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.19
v_{sp}^s	Objemové množství suchých spalin	7,81	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.20
v_{spmin}^s	Teoretické objemové množství suchých spalin	3,66	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.18
v_{CO_2}	Objemové množství CO_2	0,76	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.21
v_{SO_2}	Objemové množství SO_2	0,00	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.21
v_{H_2O}	Objemové množství H_2O	1,02	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.21
v_{N_2}	Objemové množství N_2	6,12	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.21
v_{O_2}	Objemové množství O_2	0,87	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.21
v_{Ar}	Objemové množství Ar	0,07	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.21
Vyjádření jednotlivých složek spalin v %				
CO_{2max}	Teoretická objemová koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách	20,63	%	5.22
SO_{2max}	Teoretická objemová koncentrace oxidu siřičitého v suchých spalinách	0,02	%	5.23
CO_2	Oxid uhličitý	9,68	%	5.24
SO_2	Oxid siřičitý	0,01	%	5.26
H_2O	Voda	13,05	%	5.25
N_2	Dusík	78,31	%	5.27
O_2	Kyslík	11,08	%	5.28

Stechiometrická analýza pelet z pšeničné slámy (10 mm)

Skutečné množství vzduchu potřebného pro dokonalému spálení vzorku paliva (pelety z pšeničné slámy (10 mm)) je $9,38 \text{ m}^3\text{N.kg}^{-1}$. Objemové množství suchých spalin u pelet bylo $9.31 \text{ m}^3\text{N.kg}^{-1}$. Teoretická objemová koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách je 19.91 %. Objemové množství SO_2 je zanedbatelné (0,01 %) je to dáno velice nízkým obsahem síry ve vzorku. Hodnoty jsou uvedeny v tab. 14.

Tab. 14 Stechiometrická analýza, objemová koncentrace (pelety z pšeničné slámy).

<i>Objemové spalování</i>				
O_{min}	Teoretické množství kyslíku pro dokonalé spalování	0,93	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.15
L_{min}	Teoretické množství vzduchu pro dokonalé spalování	4,45	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.16
L_{skut}	Skutečné množství vzduchu pro dokonalé spalování	9,38	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.17
n	Součinitel přebytku vzduchu	2,11		
v_{sp}^v	Objemové množství vlhkých spalin	10,41	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.19
v_{sp}^s	Objemové množství suchých spalin	9,31	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.20
v_{spmin}^s	Teoretické objemové množství suchých spalin	4,34	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.18
v_{CO_2}	Objemové množství CO_2	0,87	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.21
v_{SO_2}	Objemové množství SO_2	0,00	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.21
v_{H_2O}	Objemové množství H_2O	1,10	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.21
v_{N_2}	Objemové množství N_2	7,32	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.21
v_{O_2}	Objemové množství O_2	1,04	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.21
v_{Ar}	Objemové množství Ar	0,09	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.21
<i>Vyjádření jednotlivých složek spalin v %</i>				
CO_{2max}	Teoretická objemová koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách	19,91	%	5.22
SO_{2max}	Teoretická objemová koncentrace oxidu siřičitého v suchých spalinách	0,01	%	5.23
CO_2	Oxid uhličitý	9,30	%	5.24
SO_2	Oxid siřičitý	0,01	%	5.26
H_2O	Voda	11,82	%	5.25
N_2	Dusík	78,64	%	5.27
O_2	Kyslík	11,13	%	5.28

Stechiometrická analýza topolové kůry

Skutečné množství vzduchu potřebného pro dokonalému spálení vzorku topolové kůry je 4,44 m³N.kg⁻¹ z měřených vzorků jde o nejnižší hodnotu. Objemové množství suchých spalin u vzorku bylo 4,38 m³N.kg⁻¹. Teoretická objemová koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách je 18.5 %. Objemové množství SO₂ je zanedbatelné, je to dáno velice nízkým obsahem síry ve vzorku topolové kůry. Topolová kůra vykazuje z měřených vzorků biomasy nejnižší koncentrace oxidu uhličitého a oxidu siřičitého. Nevýhodou však byla nejnižší výhřevnost z důvodu vysoké vlhkosti. Hodnoty jsou uvedeny v tab. 15.

Tab. 15 Stechiometrická analýza, objemová koncentrace (topolová kůra).

<i>Objemové spalování</i>				
O_{min}	Teoretické množství kyslíku pro dokonalé spalování	0,44	m ³ N.kg ⁻¹	5.15
L_{min}	Teoretické množství vzduchu pro dokonalé spalování	2,11	m ³ N.kg ⁻¹	5.16
L_{skut}	Skutečné množství vzduchu pro dokonalé spalování	4,44	m ³ N.kg ⁻¹	5.17
n	Součinitel přebytku vzduchu	2,11		
v_{sp}^v	Objemové množství vlhkých spalin	5,63	m ³ N.kg ⁻¹	5.19
v_{sp}^s	Objemové množství suchých spalin	4,38	m ³ N.kg ⁻¹	5.20
v_{spmin}^s	Teoretické objemové množství suchých spalin	2,02	m ³ N.kg ⁻¹	5.18
v_{CO_2}	Objemové množství CO ₂	0,37	m ³ N.kg ⁻¹	5.21
v_{SO_2}	Objemové množství SO ₂	0,00	m ³ N.kg ⁻¹	5.21
v_{H_2O}	Objemové množství H ₂ O	1,25	m ³ N.kg ⁻¹	5.21
v_{N_2}	Objemové množství N ₂	3,47	m ³ N.kg ⁻¹	5.21
v_{O_2}	Objemové množství O ₂	0,49	m ³ N.kg ⁻¹	5.21
v_{Ar}	Objemové množství Ar	0,04	m ³ N.kg ⁻¹	5.21
<i>Vyjádření jednotlivých složek spalin v %</i>				
CO_{2max}	Teoretická objemová koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách	18,50	%	5.22
SO_{2max}	Teoretická objemová koncentrace oxidu siřičitého v suchých spalinách	0,00	%	5.23
CO_2	Oxid uhličitý	8,57	%	5.24
SO_2	Oxid siřičitý	0,00	%	5.26
H_2O	Voda	28,67	%	5.25
N_2	Dusík	79,28	%	5.27
O_2	Kyslík	11,22	%	5.28

Stechiometrická analýza hnědého uhlí Bílina Benekov

K optimálnímu spalování hnědého uhlí by mělo docházet při hodnotě součinitele přebytku vzduchu $n = 1,4$ (tj, při 6% obsahu kyslíku ve spalinách). Skutečné množství vzduchu potřebného pro dokonalému spálení vzorku paliva Hnědého uhlí Bílina Benekov je $8,65 \text{ m}^3\text{N.kg}^{-1}$. Objemové množství suchých spalin u vzorku hnědého uhlí bylo $8,5 \text{ m}^3\text{N.kg}^{-1}$. Teoretická objemová koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách je 19,07 %. Teoretická objemová koncentrace oxidu siřičitého v suchých spalinách ($\text{SO}_{2\text{max}}$) bylo z naměřených vzorků nejvyšší 0,03 %. Hodnoty jsou uvedeny v tab. 16.

Tab. 16 Stechiometrická analýza, objemová koncentrace (Hnědé uhlí Bílina Benekov).

<i>Objemové spalování</i>				
O_{min}	Teoretické množství kyslíku pro dokonalé spalování	1,30	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.15
L_{min}	Teoretické množství vzduchu pro dokonalé spalování	6,18	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.16
L_{skut}	Skutečné množství vzduchu pro dokonalé spalování	8,65	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.17
n	Součinitel přebytku vzduchu	1,40		
v_{sp}^v	Objemové množství vlhkých spalin	9,51	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.19
v_{sp}^s	Objemové množství suchých spalin	8,50	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.20
v_{spmin}^s	Teoretické objemové množství suchých spalin	5,97	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.18
v_{CO_2}	Objemové množství CO_2	1,14	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.21
v_{SO_2}	Objemové množství SO_2	0,00	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.21
v_{H_2O}	Objemové množství H_2O	1,00	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.21
v_{N_2}	Objemové množství N_2	6,76	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.21
v_{O_2}	Objemové množství O_2	0,52	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.21
v_{Ar}	Objemové množství Ar	0,08	$\text{m}^3\text{N.kg}^{-1}$	5.21
<i>Vyjádření jednotlivých složek spalin v %</i>				
CO_{2max}	Teoretická objemová koncentrace oxidu uhličitého v suchých spalinách	19,07	%	5.22
SO_{2max}	Teoretická objemová koncentrace oxidu siřičitého v suchých spalinách	0,03	%	5.23
CO_2	Oxid uhličitý	13,43	%	5.24
SO_2	Oxid siřičitý	0,02	%	5.26
H_2O	Voda	11,79	%	5.25
N_2	Dusík	79,51	%	5.27
O_2	Kyslík	6,11	%	5.28

Ekonomické srovnání

Dle výzkumného ústavu zemědělské techniky neexistuje objektivně sledovaná nákupní cena slámy. Pro výpočet nákladů se nejčastěji využívá metody postavené na základě krmné hodnoty zrna a slámy. Využitím této metody jsou vypočtené náklady na tunu slámy pocházející z pšenice přibližně 565 Kč a náklady na tunu slámy z řepky 610 Kč. V těchto nákladech jsou započítány dotace, které sehrávají významnou roli. Bez dotací by se náklady na energetickou biomasu pohybovaly ve vyšších hodnotách, než jsou ceny běžných energeticky využívaných paliv. (Abrham a kol., 2015) Do nákladů na energetickou biomasu se ještě musí promítnout náklady na mechanickou úpravu, skladování, dopravu atd. V porovnání s cenou hnědého uhlí, která se průměrně pohybuje v rozmezí 3000-5000 Kč.t⁻¹ v závislosti na typu a dodavateli. Je energetické využití biomasy rentabilní.

7 ZÁVĚR A DOPORUČENÍ

Pro efektivní využití rostlinné biomasy a dřevní biomasy jako tuhých paliv je nutné, zaručit aby spalovací proces probíhal za optimálních podmínek. Z tohoto důvodu je nutné spalovat v daném spalovacím zařízení takové palivo, které je svými vlastnostmi k tomu určené. Dále je třeba dodržet skladovací postupy s ohledem na znečištění a vlhkost paliva z důvodu ovlivnění tepelně- emisních vlastností. Z ekologického pohledu vyplývá, že biomasa má nižší emisní vlastnosti než fosilní palivo a to je jedním z jejích největších přínosů. Biomasu je možné považovat za obnovitelný zdroj energie, pokud její energetické využití je nižší než náklady na její získání a zpracování.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

BALÁŠ, M. *Kotle a výměníky tepla*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 109 s. ISBN 978-80-214-3955-9.

DRAKE, P. F.; HUBARD, E. H. *Effect of Air Swirl on the Completeness of Combustion*. J. Inst. Fuel, 1963, 36: 389.

ILAVSKÝ, J. – ORAVEC, M. – MAJER, E.: *Využitie lesnej biomasy na energiu*. Zvolen, LVU 1991, s. 54.

ILAVSKÝ, J. – ORAVEC, M. – MAJER, E.: *Využitie lesnej biomasy na energiu*. Zvolen, LVU 1992, s. 191.

JANDAČKA, J.; Malcha, M.; Mikulík, M.: *Biomasa jako zdroj energie - Potenciál, druhy a vlastnosti paliv*. GEORG, Žilina, 2007, 241 s., ISBN: 978-80-969161-3-9

JEVIČ, P.; LUŇÁČEK, M.; MALAŤÁK, J.; SLADKÝ, V.; SOUČEK, J.; ŠEDIVÁ, Z.: *Energetické a surovinové využití plodin z marginálních oblastí*. (Výzkumná zpráva EP 09600006514), VÚZT, Praha, 2001, 61 s

JEVIČ, P.; HUTLA, P.; ŠEDIVÁ, Z.: *Udržitelná výroba a řízení jakosti tuhých paliv na bázi agrárních bioproduktů*. VÚZT, Praha 2008, 132 s., ISBN: 978-80-86-884-42-4

KOLAT, P.; ROUBÍČEK, V.; KOZACZKA, J.: *Pokročilé energetické technologie zplyňování biomasy a odpadů*. Ostrava: Vysoká škola báňská Technická univerzita Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1613-5.

KOLONIČNÝ, J.; HASE, V.: *Využití rostlinné biomasy v energetice*. 1.vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011.150 s. ISBN 978-80-248-2541-0.

KŮST, F.; ZÁRUBA, J.: *Situační a výhledová zpráva obilovin*. Ministerstvo zemědělství, 111 s. ISBN 978-80-7434-422-0

LIŠKA, M.: *Situační a výhledová zpráva olejnin*. Praha: Ministerstvo zemědělství, 2016, 66 s., ISBN 978-80-7434-360-5

MALAŤÁK, J.; VACULÍK, P.: *Biomasa pro výrobu energie*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008, 206 s. ISBN 978-80-213-1810-6

MINISTERSTVO ZEMĚDĚLSTVÍ ČR. *Akční plán pro biomasu v ČR na období 2012-2020*. Praha: Ministerstvo zemědělství, 2012. ISBN: 978-80-7434-074-1

MURTINGER, K.; BERANOVSKY, J.: *Energie z biomasy*. 1. vyd. Brno: ERA, 2006. 94 s. ISBN 80-7366-071-7.

OBROUČKA, K.: *Termické zneškodňování odpadů*. VŠB Ostrava, Ostrava 1997, 140 s. ISBN 80-7078-505-5

OBROUČKA, K.: *Termické odstraňování a energetické využívání odpadů*. VŠB TU Ostrava, Ostrava 2001, 143 s., ISBN: 80-248-0009-8

OCHODEK, T.: *Biomasa jako zdroj energie: Možnosti energetického využití biomasy: Sborník příspěvku*, VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2005, ISBN 80-248-0834-X

OCHODEK T.; KOLONIČNÝ, J.; BRANC, M.: *Technologie pro přípravu a energetické využití biomasy*. 1.vyd, Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2007. 229 s. ISBN 978-80-248-1426-1.

OCHODEK T.; KOLONIČNÝ, J.; JANÁSEK. P.: *Potenciál biomasy, druhy, bilance a vlastnosti paliv z biomasy*. 1.vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2006. 124 s. ISBN 80-248-1207-X.

PASTOREK, Z.; KÁRA, J.; JEVIČ, P.: *Biomasa obnovitelný zdroj energie*. 2004, FCC Public, Praha, 288 s., ISBN: 80-86534-06-5

PETRÁŠ, D., *Nízkoteplotní vytápění a obnovitelné zdroje energie*. 1. vyd.

Bratislava: Jaga, 2008, 207 s. Vytápění. ISBN 978-80-8076-069-4.

QUASHNING, VOLKER. *Obnovitelné zdroje energie*. Praha: Grada, 2010. ISBN: 978-80-247-3250-3

RYBÍN, M.: *Spalování paliv a hořlavých odpadů v ohništích průmyslových kotlů*. 1985, SNTL, Praha, 520 s., 04-227-85

TRNOBRANSKÝ, K.: *Energetické využití dřevních odpadů spalováním a zplyňováním. Topenářství a instalace*, 1996, č. 2, 51 s.

ZEMÁNEK, P.: *Speciální mechanizace, mechanizační prostředky pro kompostování*. 1. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2001. 114s. ISBN 80-7157-561-5.

SEZNAM INTERNETOVÝCH ZDROJŮ

ABRHAM, Z.; ANDERT, D.; HEROUT, M.: *ENERGETICKÉ VYUŽITÍ ZEMĚDĚLSKÉ BIOMASY* [cit. 2018-02-03]. Dostupné z:<<http://www.vuzt.cz/svt/vuzt/publ/P2015/060.pdf>>.

CELJAK, I.: *Náklady na produkci štěpky z rychle rostoucích topolů*. Biom.cz [online]. 2012-07-09 [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: <<https://biom.cz/cz/odborne-clanky/naklady-na-produkci-stepky-z-rychle-rostoucich-topolu>>. ISSN: 1801-2655.

DANIŠOVÁ, I.: *Za 25 let poklesla těžba uhlí o více než polovinu*. [online]. [cit. 2018-03-1]. Dostupné z WWW: <<http://www.statistikaamy.cz/2017/06/za-25-let-poklesla-tezba-uhli-o-vice-nez-polovinu/>>

EkoWATT: *Obnovitelné zdroje energie* [online]. [cit. 2018-03-17]. Dostupné z: <<http://ekowatt.cz/cz/informace/obnovitelne-zdroje-energie/energie-biomasy>>.

OCHECOVÁ, P.: *Popel z biomasy – významný zdroj živin*. Biom.cz [online]. 2015-01-19 [cit. 2018-03-3]. Dostupné z: <<https://biom.cz/cz/odborne-clanky/popel-z-biomasy-vyznamny-zdroj-zivin>>. ISSN: 1801-2655.

POHOŘELÝ, M., JEREMIÁŠ, M.: *Zplyňování biomasy – možnosti uplatnění*. Biom.cz [online]. 2010-11-24 [cit. 2018-03-17]. Dostupné z: <<https://biom.cz/cz/odborne-clanky/zplynovani-biomasy-moznosti-uplatneni>>. ISSN: 1801-2655.

PRIMÁRNÍ ENERGETICKÉ ZDROJE: *oddělení analýz a datové podpory koncepcí MPO* [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: <<http://www.mpo.cz/cz/energetika/statistika/primarni-energetickezdroje--166307>>.

JAKUBES, J., BELLINGOVÁ, H., ŠVÁB, M.: *Moderní využití biomasy, technologické a logistické možnosti*. [online]. 2006 [cit. 2018-03-11]. Dostupné z: <<https://www.mpo-efekt.cz/dokument/02.pdf>>.

SIMANOV, V.: *Výroba, zpracování a využití biomasy*. [online]. 2008 [cit. 2018-09-02]. Dostupné z: <http://www.rarsm.cz/download/cd3/vyroba_zpracovani_vyuziti_biomasy.pdf>.

WEGER, J.: *Biomasa jako zdroj energie*. Biom.cz [online]. 2009-02-02 [cit. 2018-02-13]. Dostupné z: <<https://biom.cz/cz/odborne-clanky/biomasa-jako-zdroj-energie>>. ISSN: 1801-2655.

SEZNAM NOREM A LEGISLATIVNÍCH PODKLADŮ

SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (EU) 2015/1513 ze dne 9. září 2015, kterou se mění směrnice 98/70/ES o jakosti benzínu a motorové nafty a směrnice 2009/28/ES o podpoře využívání energie z obnovitelných zdrojů

Vyhláška ministerstva životního prostředí č. 294/2005 Sb., *o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a o změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady*

Vyhláška č. 321/2014 Sb., *o rozsahu a způsobu zajištění odděleného soustředování složek komunálních odpadů*

Směrnice Rady 1999/31/ES ze dne 26. dubna 1999 o skládkách odpadů

Zákon č. 201/2012 Sb. Zákon o ochraně ovzduší

Vyhláška č. 415/2012 Sb. Vyhláška o přípustné úrovni znečištění a jejím zjištění a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší

ČSN EN ISO 17225-1 (838202) *Tuhá biopaliva - Specifikace a třídy paliv - Část 1: Obecné požadavky*, Praha, ČNI, 2015, 64 s.

ČSN ISO 1928 (441352) *Tuhá paliva - Stanovení spalného tepla kalorimetrickou metodou v tlakové nádobě a výpočet výhřevnosti*, Praha, ČNI, 2010, 56 s.

9 Seznam tabulek

Tab. 1 Vývoj primárních energetických zdrojů v ČR v období 1990-2015.	11
Tab. 2 Energetický potenciál ze zemědělské půdy.	16
Tab. 3 Energetický potenciál vedlejších produktů.	17
Tab. 4 Energetický potenciál z lesní dendromasy.	18
Tab. 5 Celkový energetický potenciál pro Českou republiku.	19
Tab. 6 Specifické emisní limity.	30
Tab. 7 Vliv obsahu vody na výhřevnost.	32
Tab. 8 Porovnání energetického a dřevařského určení vlhkosti paliva.	33
Tab. 9 Objemové a hmotnostní složení suchého vzduchu.	40
Tab. 10 Molekulové hmotnosti prvků v hořlavině.	41
Tab. 11 Výsledné průměrné hodnoty měření prvkové analýzy vzorků paliva.	45
Tab. 12 Stechiometrická analýza, objemová koncentrace (řepková sláma).	48
Tab. 13 Stechiometrická analýza, objemová koncentrace (pšeničná sláma).	49
Tab. 14 Stechiometrická analýza, objemová koncentrace (pelety z pšeničné slámy).	50
Tab. 15 Stechiometrická analýza, objemová koncentrace (topolová kůra).	51
Tab. 16 Stechiometrická analýza, objemová koncentrace (Hnědé uhlí Bílina Benekov).	52

10 Seznam obrázků

Obr. 1 Klasifikační schéma dřevních paliv podle původu a zdrojů v souladu ČSN EN ISO 17225-1.	13
Obr. 2 Klasifikační schéma ovocné biomasy v souladu s ČSN EN ISO 17225-1.	14
Obr. 3 Klasifikační schéma bylinné biomasy v souladu s ČSN EN ISO 17225-1.	15
Obr. 4 Schéma sekacího ústrojí bubnového štěpkovače.	21
Obr. 5 Schéma sekacího ústrojí šnekového štěpkovače.	21
Obr. 6 Schéma sekacího ústrojí diskového štěpkovače.	22
Obr. 7 Pracovní schéma svinovacího lisu.	24