

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH

Zemědělská fakulta

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2014

Bc. ZDENĚK ŠPAČEK, DiS.

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA

Studijní program: N4101 Zemědělské inženýrství
Studijní obor: Agroekologie
Katedra: Katedra aplikovaných rostlinných biotechnologií
Vedoucí katedry: prof. Ing. Jan, st. Moudrý, CSc.

DIPLOMOVÁ PRÁCE
Energetické využití zemědělské biomasy spalováním

Vedoucí diplomové práce: Mgr. Martin Šlachta, Ph.D.
Konzultant diplomové práce: prof. Ing. Ladislav Kolář, DrSc.

Autor: Bc. Zdeněk Špaček, DiS.

České Budějovice, duben 2014

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH

Fakulta zemědělská

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Zdeněk ŠPAČEK**
Osobní číslo: **Z12601**
Studijní program: **N4101 Zemědělské inženýrství**
Studijní obor: **Agroekologie**
Název tématu: **Energetické využití zemědělské biomasy spalováním**
Zadávající katedra: **Katedra aplikovaných rostlinných biotechnologií**

Zásady pro vypracování:

Spalování obnovitelných zdrojů je označováno za jeden z vhodných postupů z hlediska udržitelné energetické politiky a ochrany životního prostředí. Nicméně, produkce dehtu při spalování biomasy představuje potenciální environmentální zátěž.

Cílem práce bude (1) vypracovat rešerši literatury o využití biomasy ke spalování, o technologiích spalování, o jejich dopadu na životní prostředí a o využití různých druhů biomasy (lignocelulózová vs. celulózoligninová paliva). Dále bude (2) experimentálně změřen obsah dehtu v různých druzích biomasy (energetický šťovík, *Miscanthus*, seno, sláma) suchou destilací. Výsledky budou (3) statisticky vyhodnoceny a diskutovány s poznatky z odborné literatury a v kontextu dopadu na životní prostředí. Výsledky budou (4) publikovány v recenzovaném časopise.

Rozsah grafických prací: dle potřeby
Rozsah pracovní zprávy: 40-60 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

FRYDRYCH, J. a kol.: Energetické využití některých travních druhů. Praha, 2001, 34 s.

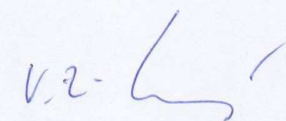
MALAŤÁK, J. , VACULÍK, P.: Biomasa pro výrobu energie. Česká zemědělská fakulta v Praze, Praha, 2008, 206 s.

PASTOREK, Z., KÁRA, J., JEVIČ, P.: Biomasa: obnovitelný zdroj energie. Praha, 2004, 286 s.

PETŘÍKOVÁ, V. a kol.: Energetické plodiny. Praha, 2006.

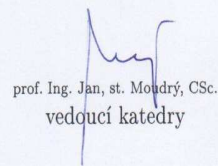
SCHULZ, H., EDER, B.: Biogas - Praxis: Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiele, Staufen bei Freiburg: Ökobach Verlag, 2001, 165 s.

Vedoucí diplomové práce: Mgr. Martin Šlachta, Ph.D.
Katedra aplikovaných rostlinných biotechnologií
Datum zadání diplomové práce: 15. února 2013
Termín odevzdání diplomové práce: 30. dubna 2014



prof. Ing. Miloslav Šoch, CSc.
děkan

JIHOČESKÁ UNIVERZITA
V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA
studijní oddělení
Studentská 13 ©
370 05 České Budějovice



prof. Ing. Jan, st. Moudrý, CSc.
vedoucí katedry

V Českých Budějovicích dne 11. března 2013

Prohlášení o autorství:

Prohlašuji, že diplomovou práci na téma: „Energetické využití zemědělské biomasy spalováním“ jsem vypracoval samostatně na základě vlastních zjištění a materiálů, které uvádím v seznamu použité literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své diplomové práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách.

V Chelčicích dne 1. dubna 2014

.....
Zdeněk Špaček, autor

Poděkování:

Rád bych touto cestou poděkoval panu Mgr. Martinu Šlachtovi, Ph.D., panu prof. Ing. Ladislavu Kolářovi, DrSc. a panu Ing. Josefu Marouškovi, Ph.D. za jejich cenné připomínky, ochotu, pomoc a trpělivost při zpracování mé diplomové práce.

SOUHRN

Diplomová práce se zabývá literárním rozbořem údajů o spalování lignocelulózové biomasy v porovnání s celulózoligninovou biomasou a vhodností jednotlivých technologií spalování v kontextu dopadu na životní prostředí. Dále se diplomová práce zabývá obsahem spalného tepla v jednotlivých palivech. Experimentálně byl změřen obsah dehtu (včetně ostatních kapalných produktů) v různých druzích biomasy suchou destilací a tyto výsledky byly statisticky vyhodnoceny a diskutovány s poznatky z odborné literatury. Na základě literárních dat byly zjištěny rozdíly u celulózoligninových paliv z hlediska výhřevnosti a spalného tepla, kdy se výhřevnost pohybovala v průměru od 15,3 MJ/kg do 16,8 MJ/kg a hodnoty spalného tepla byly 17,5 – 18,1 MJ/kg. Naopak u lignocelulózových paliv tyto rozdíly nejsou tak patrné a pohybují se v hodnotách kolem 19,5 MJ/kg spalného tepla a 18,4 MJ/kg průměrné výhřevnosti. Měření obsahu dehtu bylo provedeno v nejběžněji používaných biopalivech ze zemědělské výroby (pšeničná sláma, řepková sláma, seno, energetický šťovík, digestát z bioplynové stanice – dále jen BPS). Po statistickém zhodnocení byly zjištěny rozdílné hodnoty v obsahu dehtu u digestátu z BPS a u pšeničné slámy ($P < 0,05$; průměrně 29,58 % u digestátu a 40,48 % u slámy).

Klíčová slova

biomasa, spalování biomasy, výhřevnost, spalné teplo, obsah dehtu

ABSTRACT

This thesis deals with combustion of lignocelluloses biomass with comparison to cellulose-lignin biomass and with appropriateness of different combustion technologies in the context of the impact on the environment. Furthermore, the thesis deals with content of the heating value in the individual fuels. The heating value capacity was measured experimentally in different kinds of biomass by method of dry distillation and these results were statistically evaluated and and discussed with the findings taken from literature. On the basis of literature data, differences have been discovered in lignocelluloses fuels in

terms of calorific value and heating value, calorific values were in average from 15,3 MJ/kg to 16,8 MJ/kg and heating values were 17,5 – 18,1 MJ/kg. While in cellulose-lignin fuels these differences are not that big and are within values of 19,5 MJ/kg for heating value and an average calorific value is around 18,4 MJ/kg. Measuring of the content of tar and other residual fluid fractions in five the most commonly used bio-fuels from agricultural production (wheat straw, rape straw, hay, energy crops, digestate from biogas station). After statistical evaluation of data, it revealed the difference in content of tar between the wheat straw and digestate ($P < 0,05$; on average 40,48 % for wheat straw and 29,58 % for digestate).

Keywords

Biomass, biomass combustion, calorific value, heating value, content of tar

OBSAH

1	Úvod	10
2	Literární rešerše	12
	2.1 Rozdělení biomasy	12
	2.2 Spalování (pojem)	13
	2.3 Využití biomasy ke spalování	15
	2.3.1 Jednotlivé technologie spalování	15
	2.3.2 Spalovací zařízení	26
	2.3.3 Zplyňování biomasy	27
	2.4 Využití lignocelulózových a celulózoligninových paliv	30
	2.4.1 Lignocelulózová paliva	31
	2.4.1.1 Topoly	32
	2.4.1.2 Vrby	35
	2.4.2 Celulózoligninová paliva	36
	2.4.2.1 Kostřava rákosovitá	37
	2.4.2.2 Srha říznačka	38
	2.4.2.3 Chrastice rákosovitá	38
	2.4.2.4 Ozdobnice čínská	39
	2.4.2.5 Šťovík Uteuša	40
	2.4.2.6 Sláma	41
	2.5 Dopad spalování zemědělské biomasy na životní prostředí	44
	2.5.1 Emisní faktory CO ₂	45
	2.5.2 Emise těžkých kovů	45
	2.5.3 Emisní faktory CO	45
	2.5.4 Emisní faktory NO _x	46
	2.5.5 Emisní faktory PCDD/PCDF	46
	2.6 Dehet	48
3	Cíl práce	50
4	Metodika práce	51
5	Výsledky	57
6	Diskuze	62
7	Závěr	64
8	Seznam použité literatury	65

1 ÚVOD

Energetické využití zemědělské biomasy... Toto slovní spojení se v dnešní společnosti objevuje mnohem častěji, než tomu bylo před několika lety. S rostoucí spotřebou energie v průmyslu je to však logické. Hledají se nové možnosti využití energie a s tím spojené pěstování energetických plodin, zejména rychle rostoucích dřevin a výnosných travin. A to je pro dnešní společnost důležité, aby se pomocí těchto rostlin vyrobila nová energie, která poslouží v průmyslových i jiných odvětvích. U energetických plodin se zejména sledují tři aspekty, a to výnos suché hmoty (t/ha^{-1}), energetická výtěžnost (MJ/ha^{-1}) a ekonomické aspekty pěstování.

V rámci Evropy je rozvoj fytoenergetiky nerovnoměrný a doposud neexistuje stabilizovaný trh s biomasou coby energetickou komoditou. V Rotterdamu sice vznikla první burza pro energetickou biomasu navázaná na největší námořní přístav, obchoduje se zde však zejména s kapalnými biopalivy, pouze omezeně s tuhou biomasou (Stupavský, 2008).

V souvislosti s rostoucími požadavky na využívání biomasy v energetice, v dopravě jako součást pohonných hmot, i jako obnovitelné suroviny v průmyslu, je vhodné se zamyslet nad potenciálem, možnostmi a způsoby efektivního využívání biomasy v budoucnu. Současně je nezbytné vycházet z principů udržitelného rozvoje, správné zemědělské praxe a vytvářet tak podmínky pro dlouhodobě udržitelné využívání zemědělské půdy. Obecně lze říci, že hlavními kritérii by měla být výše přidané hodnoty v procesu zhodnocení biomasy a zhodnocení životního cyklu, tj. včetně návratu živin do půdy.

Zemědělskou biomasu tvoří cíleně pěstovaná biomasa, biomasa obilovin a olejnin, trvalé travní porosty, rychle rostoucí dřeviny pěstované na zemědělské půdě a rostlinné zbytky ze zemědělské prvovýroby i druhovýroby a údržby krajiny. Využívání zemědělské biomasy s sebou přináší výhody ve formě využití tradiční zemědělské techniky, snížení nezaměstnanosti, dále je šetrné k životnímu prostředí, pozitivně přispívá k údržbě krajiny, zadržení vody v krajině a v neposlední řadě dopomáhá efektivnímu nakládání se zemědělskými odpady a přebytky. Zemědělská biomasa je bezesporu nejkompexnější složkou potenciálu biomasy ČR. Tou se rozumí veškerá fytohmota pěstovaná na zemědělské půdě,

tedy nejen fytohmota vypěstovaná na orné půdě, ale také ze zahrad, ovocných sadů, chmelnic, vinic a trvalých travních porostů. Lesní biomasu, neboli dendromasu, tvoří palivové dřevo, zbytky z dřevozpracujícího průmyslu, prořezávek a probírek, palivové dřevo a lesní těžařské zbytky. Při využívání biomasy k energetickým účelům existují některé výhody oproti konvenčním palivům. Zdroj energie má obnovitelný charakter. Jsou menší negativní dopady na životní prostředí (emise CO₂ jsou na úrovni množství CO₂ přijatého při fotosyntéze, zatímco u fosilních paliv jsou emise CO₂, ale i dalších látek výrazně vyšší. Obvykle však není uváděn obsah dehtu, proto existuje málo informací o obsahu dehtu v biopalivech. Při energetickém využívání je zde (stejně jako v ostatních kategoriích) nutno zohlednit vysoké manipulační a dopravní nároky a lokální dostupnost zdroje (Stupavský, 2008).

Zbytková hmota zahrnuje široký rozsah druhů biomasy vznikající sekundárně při zpracování primárních zdrojů rostlinné nebo živočišné biomasy. Hlavní objem zbytkové pochází z průmyslu papíru a buničiny, z dřevovýroby, ze zpracování masa a ostatního potravinářského průmyslu a ze třídění komunálního odpadu. Patří sem také hmota z živočišné zemědělské výroby, tj. exkrementů chovných zvířat. Zbytkovou biomasu tvoří vedlejší produkty a zbytky z papírenského, potravinářského, živočišného průmyslu, stejně jako lihovarnické výpalky, čistírenské kaly, biologicky rozložitelné odpady, pokrutiny, mláto, apod. V poslední době se řeší i problematika jiného využití digestátu z bioplynových stanic, než rozmetání zpět na ornou půdu, případně louky a pastviny.

Samostatnou položkou ve využívání biomasy je průmyslové využití, které je jak energetické tak i neenergetické. Energetickému průmyslovému využití vládne průmysl výroby buničiny a papíru, neenergetické využití spočívá zejména ve výrobě stavebních desek a cihel. Předpokladem je, že význam biomasy poroste i pro chemický průmysl a pro další technické využití.

2 LITERÁRNÍ REŠERŠE

2.1 ROZDĚLENÍ BIOMASY

Kohout a kol. (2010) uvádí, že biomasu lze rozdělit do tří skupin dle využití a pěstování na zemědělskou, lesní a zbytkovou.

Zemědělskou biomasu, jak ji stanovuje vyhláška č. 5/2007 Sb. ve skupině 1 a 2, lze rozdělit na:

- cíleně pěstovanou biomasu
- biomasu obilovin, olejnin a přadných rostlin
- trvalé travní porosty
- rychle rostoucí dřeviny pěstované na orné půdě
- rostlinné zbytky ze zemědělské prvovýroby a údržby krajiny

Přínosem využití zemědělské biomasy je bezpochyby údržba krajiny, příspěvek k zadržení vody v krajině a efektivní využití zemědělských přebytků a odpadů ze zemědělství. Využití takovéto biomasy je ve většině případů šetrné i k životnímu prostředí. V oblastech s vysokou nezaměstnaností může nezaměstnanost snižovat tvorbou nových pracovních příležitostí. Je výhodná pro využití nevytížené zemědělské techniky, jak dále uvádí Kohout a kol. (2010). Poměrně novým zdrojem biomasy jsou porosty tzv. energetických rostlin. Tímto termínem jsou označovány botanické druhy dřevin, trvalek a bylin, jejich kultivary a sorty, přírodní a záměrní kříženci. Jejich růst a zejména objemové produkce (t/ha/rok) při intenzivním pěstování výrazně převyšuje průměrné hodnoty ostatních plodin ve sledované oblasti, dodává Havlíčková a kol. (2006).

Lesní biomasu, kterou stanovuje vyhláška č. 482/2005 Sb. ve skupině 3, lze rozdělit na:

- palivové dřevo
- zbytky z hospodaření v lesích

Zbytkovou dendromasu z lesnictví a dřevařského průmyslu lze využít jako palivo. Jedná se zejména o zbytkovou dřevní hmotu z těžby dřeva, probírek, palivové dřevo atd.

Zbytkovou biomasu stanovuje vyhláška č. 482/2005 Sb. ve skupině 4 a 5.

2.2 SPALOVÁNÍ BIOMASY

Spalování je konverze primární chemické energie obsažené v palivu (např. dřevní štěpky, sláma, seno, uhlí,...) na teplo (sekundární energii) oxidačním procesem. Spalování je proto technický pojem pro chemickou reakci mezi kyslíkem a spalitelnou složkou obsaženou v palivu, doprovázenou uvolněním energie. Motlík a Váňa (2002) dodávají, že tato technologie je dokonale zpracována a pro investory představuje minimální riziko. Produktem je tepelná energie, která se následně využije pro vytápění, technologické procesy nebo pro výrobu elektrické energie.

V současné době jsou v provozu i technologická zařízení, která využívají i kombinaci těchto využitelných možností a to zejména ve větších výrobních závodech, kde je primárně spotřebována tepelná energie ve formě plynné (páry) a následně je zbytkové teplo využíváno k vytápění budov či k výrobě elektrické energie.

Spalovací procesy probíhají za vysokých teplot (až 1 000 °C i více). Kyslík potřebný pro spalování pochází ze vzduchu přiváděného do spalovacího procesu. Ze spalovacího procesu se uvolňuje množství plynu, nazývaného spaliny a určité množství zbytků, jako je popel nebo škvára, v závislosti na vlhkosti a druhu spalované hmoty. Moudrý a Stražil (1999) dodávají, při vysokých teplotách dochází k rozkladu organického materiálu na hořlavé plyny, destilační produkty, uhlí a dále oxidací na oxid uhličitý a vodu. Součková a kol. (2006) popisují, že u všech forem energetické fytomasy je sledován především energetický zisk /jinak: výnos, výtěžnost) E :

$$E = Q \times S \text{ (GJ/ha)},$$

kde S je průměrný výnos hmoty v t/ha^{-1} a Q je spalné teplo v MJ/kg.

Dalším rozhodujícím parametrem fytomasy je výhřevnost suroviny Q (kWh/h). Výhřevnost je závislá především na obsahu vody w , na druhu dřeva (fytomasy) a také například na obsahu pryskyřice, která výhřevnost zvyšuje.

Obsah vody w je tedy hmotnostní podíl vody ve dřevu (fytomasy) vztažený na celkovou hmotnost čerstvého dřeva (fytomasy) vynásobený 100, tudíž je údaj uveden v %:

$$w = [(m_1 - m_2)/m_1] \times 100$$

Výhřevnost fytomasy (dřevní i bylinné) je běžně uváděna v kJ/kg nebo MJ/kg. Prosazuje se i jednotka kWh/kg paliva, protože se tím urychlí výpočet hodinové spotřeby paliva pro daný výkon kotle uvedeného v kW. Výhřevnost dřevní štěpky je uváděna kolem 14,9 MJ/kg (neplatí pro všechny dřeviny). Je nutné znát vždy obsah vody, protože výhřevnost s rostoucím obsahem vody výrazně klesá. Výhřevnost fytomasy je stanovena výpočtem na základě určeného spalného tepla a výsledků prvkového rozboru paliva.

Spalné teplo je určeno měřením v kalorimetrech (ČSN 44 1352). Závislost mezi spalným teplem Q_s^r a výhřevností Q_i^r lze vyjádřit vztahem podle ČSN 44 1352:

$$Q_i^r = Q_s^r - (0,02442 \times 1000) \times [\sigma(W_i^r) + 8,94 \times \sigma(H_i^r)],$$

kde: $\sigma(W_i^r)$ je obsah vody v analytickém vzorku (%),
 8,94 koeficient pro přepočítání vodíku na vodu
 $\sigma(H_i^r)$ obsah vodíku v analytickém vzorku (%),
 0,02442 hodnota, která odpovídá energii spotřebované na ohřev a vytápění 1% vody při teplotě 25°C.

Výhřevnost absolutně suché fytomasy – spalné teplo (obsah vody $w = 0\%$) se mezi druhy mírně liší, u měkkého dřeva se průměrně pohybuje mezi 14,76 MJ/kg (vrba) až 21, 1 MJ/kg, u tvrdého dřeva mezi 18,4 MJ/kg až 20,1 MJ/kg. Nepočítáme-li vliv vlhkosti, jsou rozdíly dány zejména poměrem ligninu, jehož výhřevnost je 25,5 MJ/kg, a celulózy, která má výhřevnost asi 18,8 MJ/kg. Např. řepková sláma se svojí výhřevností 15 – 17,5 GJ/t přibližuje lepším druhům hnědého uhlí. Není pro ní prakticky jiné využití, než v energetice. Pro živočišnou výrobu ani pro zaorání se příliš nehodí (Havlíčková a kol. 2006).

Častou námitkou proti spalování je, že veškerá sláma, která v daném roce na polích narostla, musí přijít zpět do půdy jako hnojivo. Ve skutečnosti je ve

slámě velmi málo živin – např. dusíku je ve slámě méně, než 1%. V současnosti s využívaným zaoráváním za účelem obohacení půdy humusem má význam jediné na těžších půdách, jinak jen při současném hnojení kejdou nebo jiným dusíkatým hnojivem. Bakterie, které rozkládají slámu, si potřebný dusík berou z půdní zásoby. Po jejich zániku mizí část dusíku v atmosféře, podobně jako CO₂ ze spálené slámy. Proto přiměřené využití slámy jako paliva, výhledově zhruba do 50%, nemůže ohrozit úrodnost půdy, jak uvádí Havlíčková a kol. (2006).

Motlík a Váňa (2002) uvádějí, že spalování biomasy většinou nevyžaduje předběžnou speciální úpravu paliva. Vzhledem k charakteru biomasy a jejímu proměnnému složení je nutno věnovat značnou pozornost optimálním podmínkám při spalování a při čištění výstupních spalin, kde je nutno především kontrolovat emise oxidu uhelnatého a tuhých látek. Spalování biomasy je v současnosti technicky dostatečně vyřešeno a to ve dvou koncepcích:

- spalování na roštu
- spalování ve fluidní vrstvě

Ochodek a kol. (2007) dodávají ještě spalování se spodním přívodem paliva.

2.3 VYUŽITÍ BIOMASY KE SPALOVÁNÍ

2.3.1 Jednotlivé technologie spalování

Spalování na roštu

Ochodek a kol. (2007) uvádějí, že princip spalování na roštu vychází z funkce roštu:

- zajištění přívodu spalovacího vzduchu do jednotlivých míst plochy roštu tak, aby spalování probíhalo při optimálním přebytku vzduchu,
- možnost postupného vysušení, zahřátí na zápalnou teplotu, hoření a dokonalé vyhoření paliva,
- shromažďování tuhých zbytků po spalování, popřípadě jejich odvod z ohniště a
- možnost měnit výkon zařízení.

Toman (2011) dodává, že litinový rošt jako jeden z prvních produktů rozvíjející se průmyslové revoluce ve svém důsledku umožnil její úspěšný start. Vynález uzavřeného topeniště s roštem zásadním způsobem změnil ne mechanismus, ale podmínky hoření paliva na roštu. Omezením spalovacího vzduchu z minimálně pětinásobku přebytku spalovacího vzduchu typického pro otevřená ohniště na pouhý dvojnásobek výrazně zvýšil praktickou spalovací teplotu plamene. Oxidační reakce hoření při zvýšené teplotě probíhaly rychleji a tím i dokonaleji. Rovněž rovnoměrnější přívod vzduchu přes rošt pod celou vrstvu hořícího paliva (nikoli pouze po obvodě) zlepšil podmínky mísení. Tato skutečnost je významná především pro zlepšení koncentrační podmínky hoření, neboť část spalovacího vzduchu přiváděná pod rošt umožní mísení prchavé hořlaviny se vzduchem v celé vrstvě paliva, čímž omezí termickou disociaci a vzniku tuhé fáze uhlíku ve prospěch plynné fáze.

Praktický důsledek je výrazně rychlejší průběh hoření homogenní směsi plynu oxidu uhelnatého, vodíku a uhlovodíků ve směsi se vzduchem, která se projeví nižší svítivostí plamene, a dokonalejším hořením s vyšší účinností a teplotou plamene. Důsledkem změněných a dokonalejších podmínek hoření byl nárůst účinnosti na 60 – 65 %, což je přibližně 5× více než u otevřených ohnišť.

Tyto nové bezesporu na tehdejší dobu převratné podmínky hoření však měly stále daleko k dokonalému hoření, jak dokumentují kouřící komíny obrazů a kreseb z průmyslové revoluce, Toman (2012).

Pro zdokonalené hoření v uzavřeném topeništi na roštu je však nutné respektovat určité podmínky odpovídající mechanismu hoření. Vlhké a studené palivo nesmí být přikládáno na vrstvu paliva na roštu, neboť hořící plynná směs se na studeném a vlhkém palivu ochladí pod 500 °C, čímž se zpomalí rychlost reakce, která se při výraznějším ochlazení zastaví a plamen uhasne. Prchavá hořlavina a oxid uhelnatý uvolňovaný hořícím palivem po ochlazení studeným vlhkým přiloženým palivem zhasne a zkondenzuje na mlhovinu, která se v odtahu topeniště a komínu s nižší teplotou již nevznítí.

Toman (2012) dále uvádí, že při přikládání je nutné respektovat postupné fáze hoření a přiložit vlhké a studené palivo na kraj roštu, vysušené palivo z předcházející dávky přiložení již předehřáté a vysušené posunout do střední části

roštu, kde bude hořet uvolňovanou prchavou hořlavinou dlouhým a svítivým plamenem. Tuhý zbytek prakticky bez prchavé hořlaviny musí být posunut ze střední části roštu na zadní závěrečnou část roštu, kde bude hořet krátkým a nesvítivým plamenem. Ze spodní strany tak bude ohřívát dlouhý a svítivý plamen prchavé hořlaviny probíhající nad ním do odtahu a komína. Na uvolněné místo ve střední části roštu bude posunuto vysušené a předeřtávané palivo z přední části roštu a na tuto uvolněnou část bude přiloženo nové palivo, což se potvrzuje i z praxe při spalování biomasy v horkovodních kotlích. Na pevném roštu jsou popsány operace náročné na čas, frekvenci přikládání a kusovost paliva, neboť např. u velkých polen přikládaných ve směru podélné osy roštu je popsán způsob přikládání prakticky nereálný. Při příčné orientaci polen je však možné jednotlivé fáze hoření oddělit postupným přikládáním a popsanou manipulací. Ve všech případech však mají být polena přikládána tak, aby vytvářela na roštu zhruba rovnoměrnou vrstvu, nikoli tedy chaoticky přeložená polena umožňující nerovnoměrné proudění vzduchu roštem a vrstvou paliva.

Z popsaných důvodů je běžné pro spalovací zařízení na tuhá paliva a dřevo využívat přerušovaného provozního režimu, při kterém má význam tzv. stáložárnost udržující na dně topeniště část dohořívajícího paliva ve stavu schopném vznítit a zapálit dřevo přikládané při následujícím přiložení. Periodický a časově neustálený teplotní i tepelný režim však má nepříznivé důsledky na dokonalost hoření, což se logicky projeví ve snížené účinnosti hoření.

Z technického hlediska výroby tepelné energie pro další užití či výrobu elektrické energie je vhodnější kontinuální přikládání paliva a udržování tak tepelného výkonu kotlů a celé technologie. Přerušování pravidelného přikládání způsobuje výkyvy výkonnostních parametrů a tím i výkyvy konečné výroby energie, což má za následek snížení ekonomických aspektů zařízení.

Roštové kotle - popis

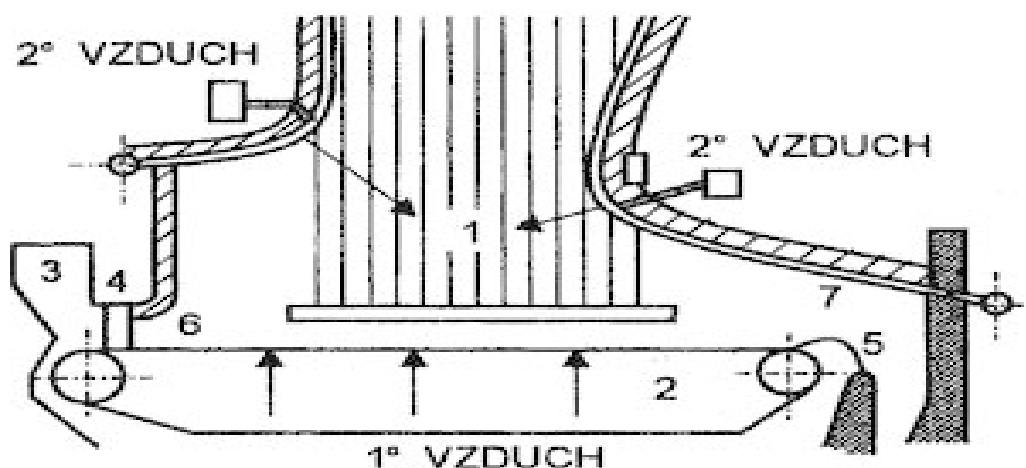
Baláš (2012) se věnuje problematice spalovacích zařízení a jejich jednotlivé rozdělení popisuje takto:

Slouží ke spalování kusových paliv v pevné vrstvě. Používají se v průmyslu i domácím vytápění. V současné době se nové roštové kotle na uhlí

téměř nestaví, je jich však velké množství v provozu. Nové roštové kotle se staví zejména pro spalování zejména biomasy (dřevo, sláma) a dále na spalování komunálních a průmyslových odpadů.

Základní částí roštového ohniště jsou patrné na obrázku 1. Ohniště (1) je ohraničeno roštem (2), přední a zadní klenbou (6) a (7) a stěnami ohniště. Palivo se na rošt dostává ze zásobníku (3) přes hradítko výšky paliva (4) na rošt. Pevný zbytek – škvára odchází přes škvárový jížek (5) do škvárové výsyvky. Kotle se vyznačují poměrně velkým množstvím škváry, až 60–70 % všech tuhých zbytků.

Obr. 1 Základní částí roštového ohniště



Zdroj: BALÁŠ a kol., 2012, Kotle na tuhá paliva

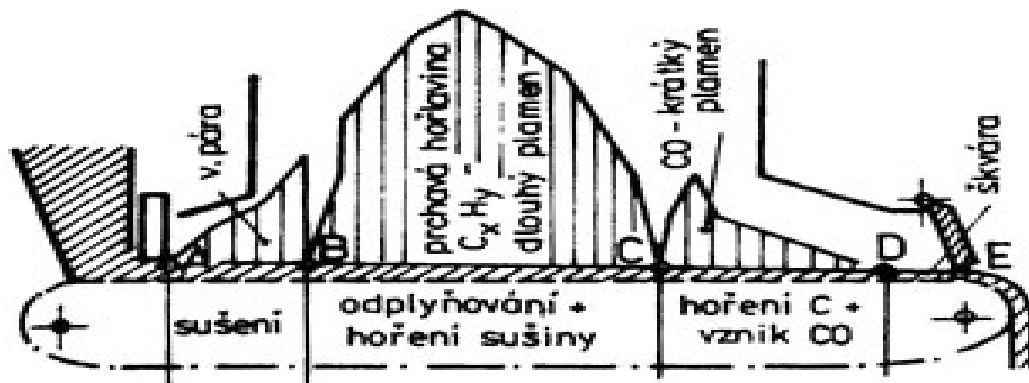
Palivo na roštu prochází těmito charakteristickými fázemi (obrázek 2.):

- sušení – palivo se ohřívá na cca 120 °C a vypuzuje se z něho povrchová a hygroskopická voda,
- odplyňování – uvolňování prchavé hořlaviny, které probíhá intenzivně při ohřátí nad 250 °C,
- hoření prchavé hořlaviny a zápal vrstvy tuhé hořlaviny,
- dohořívání tuhé fáze a chladnutí tuhých zbytků.

Aby všechny fáze spalování na roštu dokonale proběhly, je třeba část tepla uvolněného spalováním vrátit do reakce a umožnit tak zapálení dalšího paliva. Tato část tepla se nazývá poměrné vzněcovací teplo.

Maximální teploty v ohništi roštových kotlů jsou pro uhlí cca 1350–1450 °C podle druhu uhlí, pro biomasu pak 1000–1300 °C.

Obr. 2 Fáze spalování paliva na roštu

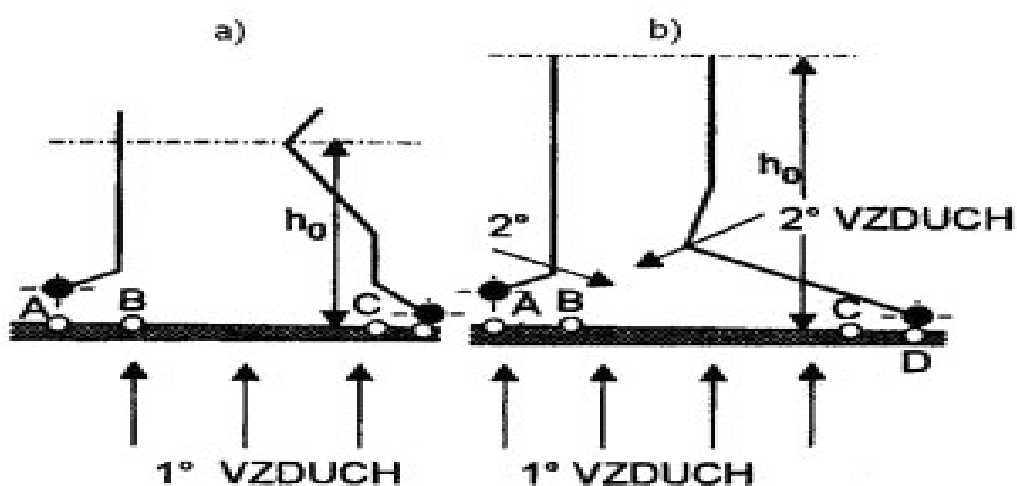


Zdroj: BALÁŠ a kol., 2012, Kotle na tuhá paliva

Spalování u roštových ohnišť probíhá jednak ve vrstvě na roštu (tuhý uhlík), jednak v prostoru nad vrstvou paliva (uvolněná prchavá hořlavina). Podíl hoření nad vrstvou paliva je tím větší, čím vyšší je obsah prchavé hořlaviny v palivu. Z tohoto pohledu rozeznáváme dvě základní konstrukční koncepce, které jsou patrné z obrázku 3.:

- roštové ohniště s jedním ohniskem hoření – pro paliva s nízkým podílem prchavé hořlaviny,
- roštové ohniště s dvěma ohnisky hoření – pro paliva s vysokým obsahem prchavé hořlaviny.

Obr. 3 Tvar ohniště roštového kotle, a) s jedním ohniskem hoření, b) s dvěma ohnisky hoření



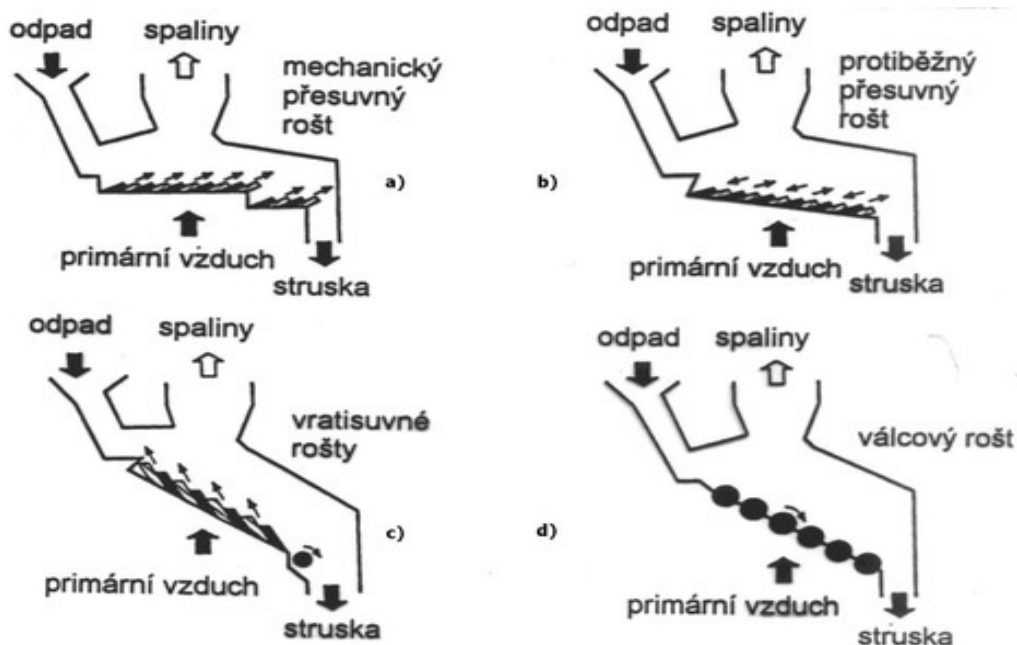
Zdroj: BALÁŠ a kol., 2012, Kotle na tuhá paliva

Ohniště typu a) jsou vhodná pro pevná paliva s malým obsahem prchavé hořlaviny (antracit, černé uhlí). Ohniště mají menší výšku (oproti typu b), který je vhodný pro paliva s větším obsahem prchavé hořlaviny (hnědé uhlí, rašelina, odpady, biomasa). Tato ohniště bývají seškrčená, aby při delším plamenu bylo zajištěno promísení prchavé hořlaviny se vzduchem. Tomu se napomáhá přivedením sekundárního, příp. terciárního vzduchu nad rošt. Jeho podíl je tím větší, čím vyšší je obsah prchavé hořlaviny.

Druhy roštů – popis (obrázek 4.)

- rošty s nehybnou vrstvou paliva (pevné rošty),
- rošty s občasným přemísťováním paliva (rošty stupňové a přesuvné),
- rošty s trvalým přemísťováním paliva (rošty pásové a řetězové).

Obr. 4 Typy posuvných roštů: a) vodorovný posuvný rošt, b) šikmý rošt s přímým posunem, c) šikmý rošt vrativý, d) rošt s válcovými roštnicemi



Zdroj: BALÁŠ a kol., 2012, Kotle na tuhá paliva

Pevné rovinné rošty s nehybnou vrstvou paliva

Nejstarší typ roštů. V současné době se tento rošt zachoval u malých kotlů na lokální vytápění, eventuálně u starších plamencových. Rošty jsou složeny z bezpropadových roštnic se spodním přívodem vzduchu. Palivo je přikládáno na žhavou vrstvu a je zapáleno spodním zápalem, sušení paliva, vypařování vody, odplyňování i hoření pevného uhlíku probíhá téměř současně. Nad rošt je třeba přivést sekundární vzduch pro dopálení uvolněné prchavé hořlaviny. Uvedené rošty mají velkou ztrátu mechanickým nedopalem ve škváře, úletu i propadu.

Rošty tohoto typu jsou tvořeny roštnicemi, kterými je možno pohybovat různými mechanismy. Patří sem rošty s výkyvnými roštnicemi, šikmé rošty s přímým posunem paliva, vratisuvné rošty a rošty s válcovými roštnicemi – obr. 4. Občasným, pravidelným či nepravidelným, pohybem roštnic dochází k rozrušování spečené vrstvy paliva, promíchávání paliva, posunu paliva a odvodu popele z ohniště.

Rošty s trvalým přemísťováním paliva

Jedná se o řetězové a pásové rošty tvořené nekonečným pásem, jehož horní plocha, na které spočívá vrstva paliva, tvoří rošt. Řetězový rošt je tvořen roštnicemi, které jsou články masivního Gallova řetězu. Pásový rošt má roštnice upevněny na příčných tyčích, které jsou unášeny dvěma postraními řetězy. V obou případech je rošt tepelně namáhán pouze v horní části, zatímco ve spodní části je chlazen. Z tohoto důvodu lze použít výhřevnější palivo, aniž by docházelo k opalu roštnic.

V současné době se nové roštové kotle staví především na spalování biomasy a různých druhů odpadů.

Spalování se spodním přívodem paliva

Jak uvádí Ochodek a kol. (2007), principiálně se jedná o systém, kdy je palivo přiváděno pod hořící vrstvu. U této koncepce je nezbytné reflexní keramické těleso, které odráží tepelné záření hořící vrstvy a plamene zpět do ohniště, a pomáhá tak při zapalování a stabilizaci hoření. Palivo je dopravováno šnekovým dopravníkem. Pomocí litinového kolena a retorty je směr pohybu

paliva převeden do vertikálního směru. Na retortu navazuje rošt, přičemž mezera mezi roštem a retortou dává prostor pro proudění spalovacího vzduchu.

Spalování ve fluidní vrstvě

Princip fluidního spalování byl poprvé vyzkoušen v USA začátkem 20.století (Milwaukee, 1918) a byl výjimečně zkoušen i u parních lokomotiv a lodí.

Zařízení na spalování za vysokých teplot (800 – 1000 °C) bez přímého využití tlaku. Využívají vznosu, který vzniká vhnáním spalovacího vzduchu ze spodu kotle do vrstvy zrnitého odpadu. Vznikne tak fluidní vrstva s velkým reakčním povrchem a velmi intenzivním průběhem spalování v celé vrstvě. Takto lze spalovat kapalným i pevným odpadem (nadrčeným nebo rozemletým na stejnou zrnitost).

Fluidní spalování je vhodné pro odpady s vyšším obsahem síry, neboť produkty jejího hoření lze s výhodou zachycovat prostřednictvím mletého vápna nebo vápence přidaného do spalovaného odpadu. Nelze naopak použít pro spékavé odpady, které způsobují slinování fluidní vrstvy (Slovník odborných výrazů, www.energetickyporadce.cz).

Základem fluidního lože je velké množství drobných trysek, skrz které je do komory vhnán vzduch. Těsně nad fluidním ložem jsou umístěny trubky, v nichž je ohříváno teplosměnné médium – voda.

V komoře je vrstva písku, která je na začátku procesu uvedena do turbulentního pohybu horkými spalinami ze zemního plynu či topného oleje, jež jsou do komory vhnány tryskami. Když teplota v komoře dosáhne 550°C, může být zahájeno přidávání dřeva do pískového lože. Dřevo začne hořet, což vede k dalšímu zvyšování teploty v komoře. Když pískové lože dosáhne teploty kolem 750°C, dojde k automatickému vypnutí startovacího hořáku. Pak je do komory vhnán již pouze studený vzduch.

Další spalování dřeva má za následek zvýšení teploty až na cca 850°C. Tato teplota je pak udržována odváděním tepla pomocí teplosměnných trubek, jež umožňují velice efektivní přenos tepla z horkého písku do ohřívání vody.

Aby bylo možné spalovat dřevo s různou vlhkostí, je nezbytné měnit rozsah aktivní teplosměnné plochy podle teploty fluidního lože. Tzn., když je

vlhkost dřeva vysoká a teplota fluidního lože klesá, což zaznamenají snímače teploty, zvedne regulační mechanismus teplosměnné trubky, čímž se zmenší plocha trubek v přímém kontaktu s vířícím pískem. Když se teplota fluidního lože zvyšuje, spouští regulační mechanismus trubky níže.

Jelikož vzduch proudící z trysek udržuje dřevo v průběhu spalování v neustálém pohybu, je zaručeno úplné dohoření. Vířící písek odškrabává popel ze dřeva, který stoupá do horní části kotle. Popel jde dále přes filtr, který jej směřuje dále na dopravník či do zásobníku popele.

Proces je ukončen po přerušení dodávky paliva. Po dvou minutách se zastaví přívod vzduchu a písek klesne na dno fluidního lože. Tím se chladící trubky uvolní od písku.

Kotel může opět zahájit provoz, aniž by bylo zapotřebí použít startovací hořák, během 30 minut po odstavení kotle. Stačí pouze obnovit vhánění vzduchu a dodávku dřeva.

Za kotlem je nainstalováno čištění spalin nastavené dle platných emisních norem pro výtopny na dřevo. Pro čištění spalin mohou být použita zařízení od multi-cyklónového filtru, až k úplnému tkaninovému filtru s předřazeným zachytávačem jisker.

Juchelková (2012) dodává, že u fluidních kotlů se výhřevnost klasických fosilních paliv z hlediska přestupů tepla a dimenzování teplosměnných ploch stává druhořadou záležitostí. Palivo přiváděné do ohniště se v řadě případů předem mísí s recirkulovaným inertem fluidní vrstvy a při přepočtu na skutečné množství popelovin v okamžiku vstupu paliva do ohniště je parametr výhřevnosti okrajovou záležitostí. Navíc fluidní kotle mají konvekční teplosměnné plochy, kde prostup tepla určuje množství a teplota spalin.

Hlavní výhody fluidních kotlů:

- spalování levného paliva
- zcela automatizovaný provoz
- jednoduchá konstrukce bez pohyblivých částí v topeništi
- nízká teplota spalování přispívá k delší životnosti kotle a nízké potřebě údržby

- vytápění dřevem, což je ohleduplné k životnímu prostředí
- nízké emise NO_x

Fluidní kotel dovoluje spalování drceného paliva, které může být u biomasy do 15 mm, částice intenzivně kmitají v rovnovážné poloze, což má za následek velké přestupy tepla $\alpha = 200 - 600 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, což je asi 2 – 3krát více, než u konvekčních ploch běžného kotle. Fluidní kotle se běžně konstruují po vyšší výkony, cca od 8 MW_t až po stovky MW_t. Rychlost fluidizace se pohybuje od 0,7 do 1,5 m/s a palivem může být velká škála biopaliv. Velký regulační rozsah 30 – 100 % P_{jm}, nízké spalovací teploty 800 – 900 °C (vhodné pro emise NO_x – do 200 mg/m³), možnost spalovat méněhodnotná paliva, odpady a sirnatá paliva patří k výhodám tohoto způsobu spalování, jak dále pokračují Ochodek a kol. (2007).

Fluidní kotle můžeme dělit podle několika kritérií:

Podle pracovního tlaku:

- atmosférické
- přetlakové

Podle druhu vrstvy a provedení:

- se stacionární fluidní vrstvou
 - bez odlučovače popílku
 - s odlučovačem popílku
- s cirkulující fluidní vrstvou
 - s externím výměníkem tepla
 - bez externího výměníku tepla

V současnosti nejpoužívanější jsou atmosférické s cirkulující fluidní vrstvou, kdy cirkulace částic probíhá přes spalovací komoru a cyklon, což vede k dlouhé době setrvání částic v ohništi.

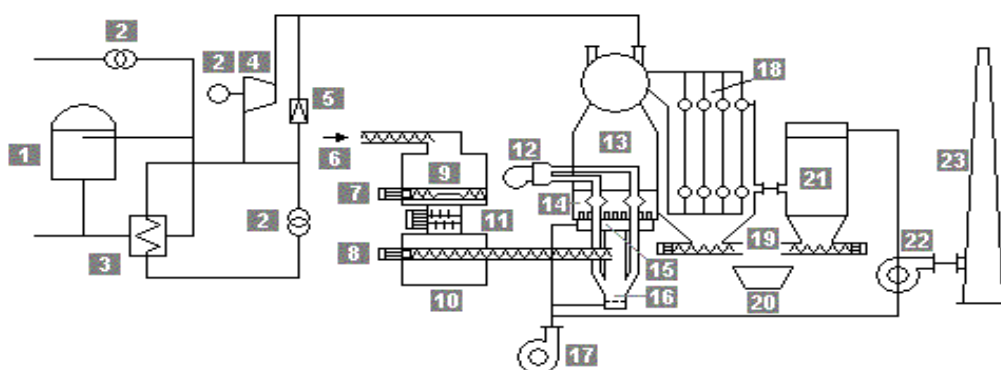
Pro kotle menších výkonů se používají převážně kotle se stacionární fluidní vrstvou, ty se nejčastěji používají i pro spalování biomasy.

U fluidních spalovacích zařízení je tryskami ve dně vháněn vzduch určitou rychlostí. Toto uvede pevné látky do fluidujícího stavu, aniž by byly látky vyneseny. Palivo je doplněno inertním materiálem (např. křemičitým pískem). Podle zvolené rychlosti fluidizace má vrstva různé stavy (stacionární a cirkulující fluidní vrstvy s atmosférickým přetlakem).

Firma PolyComp, a.s. uvádí, že ve fluidních kotlích lze spalovat tyto druhy paliv:

- uhelný hruboprach aktivovaný (jako prach i jako tekutý kal)
- dřevní hmota (základní obnovitelný zdroj energie s relativně stálým chemickým složením)
- ostatní plodiny včetně plodin pěstovaných pro energetické účely
- sláma (pro nízkou měrnou hmotnost nejlépe v kombinaci s jinými druhy paliva)
- odpady ze zemědělské výroby (bramborová nať, chrást,...)
- upravené zbytkové komunální odpady
- odpady z průmyslových výrob etanolu
- široké spektrum dalších paliv s minimální výhřevností

Obr. 5 Schéma fluidního kotle FK 2MW



LEGENDA

- | | |
|---|----------------------------------|
| 1 akumulátor tepla | 13 fluidní kotel |
| 2 spotřeba tepla | 14 fluidní ohniště |
| 3 výměník tepla | 15 fluidní dno |
| 4 parní turbína nebo parní motor | 16 injektážní zařízení |
| 5 redukční ventil | 17 vysokotlaký ventilátor |
| 6 dopravník zahlování | 18 konstrukční část kotle |
| 7 podavač | 19 dopravník popílku |
| 8 dopravník paliva | 20 kontejner |
| 9 zásobník neupraveného paliva | 21 filtr spalin |
| 10 zásobník upraveného paliva | 22 spalinový ventilátor |
| 11 mlýn | 23 komín |
| 12 najížděcí zařízení | |

Zdroj: www.polycomp.cz

2.3.2 Spalovací zařízení

Ochodek a kol. (2007) považují za spalovací zařízení v případě zdrojů pro vytápění lokální topeniště – krby a kamna, kotle pro ústřední vytápění různých provedení, teplovodní a horkovodní kotle pro lokální centralizované systémy, parní kotle pro kogeneraci tepla a elektřiny.

Krby a krbová kamna

Lokální vytápění dřevem, spalovaným v krbech a krbových kamnech, se těší veliké oblibě. Krby jako zdroj tepla mají dlouhou historii a tradici. Současné technické možnosti dovolují uzavřít ohniště sklem a regulovat množství spalovacího vzduchu a tak současné krby a krbová kamna dosahují špičkové účinnosti až 80%.

Kotle pro ústřední vytápění

Kotle s manuálním přikládáním

Klasickým, dosud nejrozšířenějším konstrukčním řešením je velkoobjemové ohniště, do kterého lze pro co možná nejdélší periodu přikládání přiložit najednou velké množství paliva. U těchto kotlů dochází vlivem nerovnoměrného hoření k nedokonalému spalování a tvorbě typických škodlivin, značně obtěžující okolí.

Automatické a automatizované kotle

Moderní kotle na spalování biomasy používají systém kontinuálního přívodu paliva do ohniště. Automatické kotle na biomasu pro ústřední vytápění mohou používat jak spalování na roštu, tak speciálních hořáků či hořákového provedení spalovací komory, dále spodního přívodu paliva nebo zplyňování. Nejčastěji se u automatických kotlů objevuje systém se spodním přívodem paliva. Výhodou automatických kotlů je velký regulační rozsah.

Zplyňovací kotle

Kotle jsou konstruovány tak, že vrchní část kotle slouží jako zásobník paliva a spodní část kotle jako spalovací komora a popelník. Mezi nimi je

umístěna zplyňovací část, která je nazývána zplyňovací tryskou nebo také zplyňovacím roštem. Kvalita spalování je oproti kotlům s manuálním přikládáním výrazně lepší. Zplyňovací kotle jsou částečně vytlačovány spalovacími automatickými kotli, na trhu se dnes objevují i automatické zplyňovací kotle.

Průmyslové kotle

Mezi průmyslové kotle řadíme kotle větších výkonů. Průmyslové kotle se vyrábějí buď sériově, a to pro menší a střední výkony, konstrukce však dovoluje modulové sestavení, kdy je celý systém sestaven z modulů vhodných pro dané palivo, způsob dopravy či teplotnosné médium. Průmyslové kotle velkých výkonů vycházejí z výrobního programu a konstruuji se až v místě aplikace. Teplotnosným médium průmyslových kotlů je horká voda, pára nebo horký vzduch. Průmyslové kotle využívají nejčastěji systémů se spodním příívodem paliva, a to pro menší a střední výkony, dále spalování na roštu a ve fluidní vrstvě.

Moderní trendy u spalovacích zařízení

V posledních letech dochází u spalovacích zařízeních ke změnám vedoucím ke zvýšení účinnosti, zvýšení kvality spalování a komfortu obsluhy. Takovými zařízením jsou například automatické kotle. Dále se trend ubírá k vývoji kogeneračních zdrojů malého a středního výkonu na biomasu založených na spalování biomasy. Moderním zařízením tohoto typu je Organický Rankinův cyklus (ORC) – viz příklad využití energie z biomasy z praxe (ZEMCHEBA, s.r.o.).

2.3.3 Zplyňování biomasy

Ochodek a kol. (2007) uvádějí, že existuje několik druhů zplyňovačů, které se dělí podle stavu zplyňovacího materiálu, případně podle proudů pevného materiálu a proudu zplyňovacího média:

- se suvným (pevným) ložem
 - souproudé
 - protiproudé
 - s křížovým tokem

- s fluidní vrstvou (ložem)
 - se stacionární fluidní vrstvou
 - s cirkulující fluidní vrstvou
- s unášivým proudem

Zplyňováním je myšlena termochemická přeměna uhlíkatého materiálu v pevném či kapalném skupenství na výhřevný energetický plyn pomocí zplyňovacích médií a tepla (Pohořelý a Jeremiáš, 2010). Jak dále uvádějí Moudrý a Stražil (1999), tento plyn se dále využívá jako palivo nebo dále pro chemickou syntézu na výrobu metanolu. V porovnání s biochemickými reakcemi je, je zplyňování rychlou reakcí, která nevyžaduje velká, investičně nákladná zařízení. Dále Moudrý a Stražil (1999) uvádějí, že rozklad biomasy na plynné palivo je možný různými způsoby:

- Pyrolýza – je rozklad, kdy se biomasa při nízkých teplotách rozkládá na dehet, olejová paliva a plyny (H_2 , CO) při současném vzniku kyslíku.
- Zplyňování vzduchem – je rozklad biomasy za přítomnosti vzduchu přidávaného v limitovaném množství do reaktoru. Při tomto způsobu se uvolňuje plyn s nízkou výhřevností (pod $8\ 000\ kJ.m^{-3}$).
- Zplyňování kyslíkem – je rozklad biomasy, kdy se do reaktoru vhání kyslík. Tím jsou odstraněny nespalitelné složky. Získaný plyn má střední výhřevnost ($8\ 000 - 14\ 000\ kJ.m^{-3}$).
- Zplyňování vodíkem – dochází k přeměně biomasy pod tlakem ve vodíkovém prostředí. Vzniklý plyn má vysokou výhřevnost (nad $20\ 000\ kJ.m^{-3}$).
- Zplyňování vodní parou – probíhá spolu s vhaněným vzduchem. Vodní pára je vedena přes rozžhavené uhlí. Získaný plyn je středně výhřevný.

Motlík a Váňa (2002) uvádějí, že rozšířenější je dosud spalování na roštu, avšak fluidní technologie má některé významné výhody a její technický vývoj stále postupuje. Složitější metodou je termochemická přeměna biomasy při vyšších teplotách a za nedostatku kyslíku. Produkty takového procesu jsou odlišné podle procesních podmínek, k nimž patří především teplota, doba setrvání částic biomasy v reakční zóně a další způsob zpracování. Jestliže se teplota při reakci

v reaktorech pohybuje v oblasti 800 °C – 900 °C a doba setrvání částic je delší (sekundy až desítky sekund), produktem je z větší části plyn. Tento proces je označován jako zplyňování. Pokud je jako okysličovadlo použit vzdušný kyslík, což je v případě biomasy nejčastější, má vzniklý surový plyn nízkou výhřevnost (4 – 6 MJ/m³), obsahuje dehty, fenoly a tuhé částice. Pokud jsou teploty v reaktoru 450 °C – 550 °C a doba setrvání suroviny v reakční zóně velmi krátká (maximálně do 2 sekund) jsou produktem zejména páry a aerosoly, v menší míře pak plyn a tuhé částice. Tento proces, se nezyvá rychlá pyrolýza. Produkty tohoto procesu se musí ihned rychle ochladit, čímž vznikne uvedený velký podíl kapaliny. Tato kapalina má výhřevnost 16 – 20 MJ/kg a po další úpravě může sloužit jako kvalitní kapalné palivo, jak dále uvádějí Motlík a Váňa (2002).

Pyrolýza biomasy

Pyrolýzou je míněn termický rozklad organických materiálů za nepřístupu médií obsahujících kyslík. Podstatnou pyrolýzy je ohřev materiálu na mez jeho termické stability přítomných organických sloučenin, což vede k jejich štěpení až na stále nízkomolekulární produkty a tuhý zbytek, jak uvádí STAF (2005). Dále uvádí, že z technologického hlediska lze pyrolýzní procesy dále rozdělit dle dosažované teploty na:

- a) nízkoteplotní (< 500 °C),
- b) středněteplotní (500 – 800 °C),
- c) vysokoteplotní (> 800 °C).

V závislosti na dosažené teplotě, lze při pyrolytickém procesu pozorovat řadu dějů, které je možné pro jednoduchost rozdělit do 3 teplotních intervalů, jak dále uvádí Staf (2005). V oblasti teplot do 200 °C dochází k sušení a tvorbě vodní páry fyzikálním odštěpením vody. Tyto procesy jsou silně endotermické. V rozmezí teplot 200 – 500 °C následuje oblast tzv. suché destilace. Zde nastává ve značné míře odštěpení bočních řetězců z vysokomolekulárních organických látek a přeměna makromolekulárních struktur na plynné a kapalné organické produkty a pevný uhlík, což potvrzují i Motlík a Váňa (2002). Ve fázi tvorby plynu v oblasti teplot 500 – 1 200 °C jsou produkty vzniklé suchou destilací dále štěpeny a transformovány. Přitom jak z pevného uhlí, tak i z kapalných

organických látek vznikají stabilní plyny, jako je H_2 , CO , CO_2 a CH_4 , jak dodává Staf (2005).

Ochodek a kol. (2007) rozdělují pyrolýzu na rychlou a pomalou.

Technologie pomalé pyrolýzy – karbonizace

Nejčastější využití pomalé pyrolýzy je pro výrobu dřevěného uhlí. Dřevo se zuhelňuje při teplotách kolem $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, a to obvykle přímo částí vlastních pyrolýzách plynů. Tímto procesem se získává asi 35 % dřevěného uhlí. Kondenzací vznikajícího kondenzačního plynu lze získat dřevný dehet, až 7 % kyseliny octové a 1 % metanolu na hmotnost dřeva.

V současné době existují 2 základní varianty:

- pálení dřevěného uhlí v klasických mlířích – karbonizačních pecích (hliněné nebo ocelová konstrukce)
- pálení v retortách

Rozdíl mezi těmito technologiemi je v přívodu tepla potřebného pro pyrolýzu. U karbonizačních pecí je teplo dodáváno zevnitř spalováním části dřeva, u retort je teplo přiváděno zvenčí přes stěny pláště spalováním většinou odpadního paliva.

Technologie rychlé pyrolýzy – zkapalňování

Rychlá pyrolýza je jedním z nejnovějších procesů přeměny biomasy na produkty s vysokou energetickou hodnotou – kapaliny. Tento proces je stále ve fázi výzkumu a vývoje.

Hlavním produktem jsou páry a aerosoly, které po rychlém zchlazení kondenzují na kapalinu o výhřevnosti 16 – 22 MJ/kg, kterou je možno upravovat na motorové či jiné biopalivo.

Z celkových produktů rychlé pyrolýzy je možno získat 75 %_{hm} kapalného biopaliva, 13 %_{hm} hořlavého plynu a 12 %_{hm} tuhé zkarbonizované biomasy. Pro tuto pyrolýzu postačují teploty na úrovni $500 - 600\text{ }^{\circ}\text{C}$, přičemž biomasa setrvává v reaktoru 0,5 – 1 s. Inertního materiálu je asi 20krát více než je biomasy, což zaručuje dostatečný tepelný potenciál pro rychlé odplynění, jak dále pokračují Ochodek a kol. (2007).

2.4 VYUŽITÍ LIGNOCELULÓZOVÝCH A CELULÓZO - LIGNINOVÝCH PALIV

2.4.1 Lignocelulózová paliva

Do celulózoligninových paliv patří paliva s vyšším obsahem celulózy, tedy dřevních částí. V současné době se k energetickým účelům nejvíce využívá dřevní štěpka z vytěženého lesního dřeva a štěpka z rychle rostoucích dřevin, jako jsou zejména topoly a vrby. Stupavský a Holý (2010) rozdělují tržní štěpku na tři druhy: zelená štěpka, hnědá štěpka a bílá štěpka.

Zelená štěpka

Štěpka získaná ze zbytků po lesní těžbě. Lze v ní nalézt nejen části drobných větví, ale také listí, případně jehličí. Tím, že se zpracovává čerstvá hmota, je vlhkost této štěpky vysoká.

Hnědá štěpka

Štěpka získaná ze zbytkových částí kmenů, pilařských odřezků apod. Sjednocujícím prvkem je obsah kůry. Dříví totiž nebylo před zpracováním odzrněno a lze tedy na jednotlivých štěpkách rozpoznat části kůry.

Bílá štěpka

Štěpka získaná z odzrněného dříví, obvykle z odřezků při pilařské výrobě. Ani na jednotlivých štěpkách se již nenachází kůra. Využívá se především pro výrobu dřevotřískových desek.

K tomuto rozdělení přidává ještě Burg a Souček (2012) štěpku z vinné révy, Celjak (2010) dřevní štěpku z rychle rostoucích topolů a vrb.

Do cíleně pěstovaných rychle rostoucích dřevin zahrnujeme topoly a vrby (Celjak, 2010). Topoly (*Populus* sp.) a vrby (*Salix* sp.) se řadí do čeledi vrbových (*Salicaceae*). Společně jsou řazeny mezi takzvané rychle rostoucí dřeviny. Vyznačují se velkou variabilitou a vzájemným křížením, ať už samovolným nebo řízeným, vytvářejí nejrůznější poddruhy, odrůdy a kultivary (Kohout a kol., 2010).

Dnes se v Evropě pěstuje přes 30 000 ha vrbových a topolových plantáží. Vrbové plantáže jsou pěstovány na 25 000 ha a to zejména ve švédsku, Polsku,

Velké Británii, ale také v Dánsku, Slovensku a v Baltských zemích. Topolové plantáže se pěstují přibližně na 7 000 ha, a to v jižní a střední Evropě, nejvíce pak v Itálii, kde je přibližně 3 500 ha, Rakousku přibližně 1 500 ha a Maďarsku přibližně 1 200 ha. Pěstovaná plocha energetických plantáží výrazně narůstá i v jiných zemích Evropy. V České republice je v současné době (2010) vysazeno kolem 250 ha převážně topolových energetických plantáží a přibližně 25 ha matečnicových porostů, jak dodává Kohout a kol. (2010).

2.4.1.1 Topoly

Jak uvádí Kohout a kol. (2010), domovem topolů je povětšinou mírný pás na severní polokouli, na jih zasahují až po Himaláje. Celkem zde roste asi 35 – 40 druhů. Pěstované druhy i jejich kříženci pocházejí ze tří hlavních oblastí výskytu, a to Evropy, Severní Ameriky a Východní Asie. Ve volné krajině převažují kulturně šířené klony a hybridy. Dnes jsou vysázené topolové plantáže pro různé účely jak na jižní, tak na severní polokouli. Největší plocha osázená topoly je v Číně okolo 6 milionů hektarů. V České republice byla první topolová výmladková plantáž vysazena v roce 1994. Od té doby se pěstování energetických dřevin na zemědělské půdě výrazně nerozrostlo, přestože bylo možné získat poměrně výhodné dotační tituly.

Rod *Populus* se dělí do pěti sekcí, *Aigeiros*, *Tacamahaca*, *Leucoides*, *Leuce*, *Turanga*, které se od sebe výrazně liší.

1. **sekce *Aigeiros*** Duby – V této skupině jsou zastoupeny topoly černé, a to euroasijský druh topolu černého (*Populus nigra* L.) a americký topol bavlíkový (*Populus deltoides* Marsch.). Oba druhy dorůstají ve stromy až 40m vysoké a jsou dlouhověké. Mají ideální podmínky růstu v lužních polohách. Nevadí jim ani vysoký obsah vápna v půdě a je možné je vzájemně křížit. Kříženci dvou uvedených druhů se nazývají *P. x euroamericana* /Dode/ Guinier.
2. **sekce *Tacamahaca*** Spach – V této skupině jsou zastoupeny topoly balzámové. Jsou nejvíce rozšířeny v Asii od jižní Číny, dále pak jsou rozšířeny v Americe od Kalifornie na sever až po lesotundry. V Evropě se tato skupina přirozeně nevyskytuje. Pro účely

šlechtění klonů RRD se nejvíce využívají z asijských druhů *Populus maximowiczii* Henry a *Populus koreana* Rehd. Z amerických druhů se využívají ke křížení nejčastěji *Populus trichocarpa* Torr. Et A. Gray. Je možné i křížení s topoly sekce *Aigeiros*.

3. **sekce *Leucoides*** Spach – V této skupině jsou zastoupeny topoly velkolisté. Je to druhově málo početná sekce topolů rostoucí především ve východní Asii, jedním druhem je zastoupena i v Americe. Tato sekce není vhodná pro energetické využití, jelikož se vyznačuje pomalým růstem v mládí, špatně se vegetativně množí a nekříží se s topoly ostatních sekcí.

Do této sekce lze zahrnout asijské druhy topolů topol chlupatý (*Populus lasiocarpa*) a topol Wilsonův (*Populus wilsonii*). Topoly této sekce jsou esteticky velmi působivé, pro evropské podmínky exotického vzhledu.

4. **sekce *Leuce*** Duby – V této sekci jsou zastoupeny topoly bílé. Nekříží se s předchozími sekcemi a jsou značně geneticky i habituelně odlišné od tří předchozích. Dále se dělí na dvě subsekcce:
- *Albidae* Dode – jsou to topoly bílé. Pro Euroasii je typickým druhem topol bílý (*Populus alba* L.), jehož některé poddruhy dosahují velkých dimenzí i stáří obdobně jako topol černý (*Populus nigra* L.). Nejlépe rostou v lužních podmínkách, ale snesou i sucho.
 - *Trepidae* Dode – do této subsekcce jsou zařazeny osiky. Je to druhově početná subsekcce, která má domovinu v rozsáhlém areálu Euroasie, kam patří topol osika (*Populus tremula* L.). V Americe se vyskytuje topol osikový (*Populus tremuloides* Michaux.) a topol hrubozubý (*Populus grandidentata* Michx.). Spontánně se kříží topol osika s topolem bílým a vzniká topol šedý (*P. ^x canescens* Smith.). Je možné i další mezidruhové křížení.

Topoly bílé jsou velmi krásné dřeviny s pestrým olistěním, pro účely sadovnické jsou zatím využívány minimálně.

5. **sekce *Turanga* Bunge** – V této sekci jsou zastoupeny topoly turakové, sekce je zastoupena druhy rostoucími na jihu areálu topolů, a to topolem eufratským (*Populus eufratica* Oliv.) a topolem *Populus pruinosa* Schrenk., u nás se nevyskytují, jelikož zde nejsou vhodné podmínky pro jejich růst, jak dále uvádí Kohout a kol. 2010.

Při porovnávání množství spalného tepla rozdílných klonů rychle rostoucích topolů bylo zjištěno, že jednotlivé klony mají velmi podobné hodnoty spalného tepla čisté dřevní hmoty, avšak klon *Populus nigra* L. x *Populus maximowiczii* Jap-105 při svých 19,477 MJ/kg má tyto hodnoty nejnižší a klon *Populus maximowiczii* x *Populus berolinensis* Oxford naopak hodnoty nejvyšší (19,589 MJ/kg) (Tabulka 1, sloupec 2).

V případě přirozeného obsahu kůry zůstávají nejnižší hodnoty u klonu *Populus nigra* L. x *Populus maximowiczii* Jap-105 (20,007 MJ/kg), avšak nejvyšší hodnoty ukazuje klon *Populus nigra* L. x *Populus maximowiczii* Jap-104, při 20,389 MJ/kg (Tabulka 1, sloupec 3).

Tab. 1: Hodnoty spalného tepla rozdílných klonů rychle rostoucích topolů v závislosti na charakteru dřevní hmoty

Označení klonu (dle věstníku MZe)	Spalné teplo čisté dřevní hmoty (MJ/kg)	Spalné teplo dřevní hmoty s přirozeným obsahem kůry (MJ/kg)
<i>Populus maximowiczii</i> x <i>Populus berolinensis</i> Oxford	19,589	20,144
<i>Populus nigra</i> L. x <i>Populus maximowiczii</i> Jap-104	19,501	20,389
<i>Populus nigra</i> L. x <i>Populus maximowiczii</i> Jap-105	19,477	20,007

Zdroj: CELJAK, Ivo: Pěstování topolů pro energetické účely

V tabulce 2 je znázorněna výhřevnost čisté dřevní hmoty rychle rostoucích topolů *Populus nigra* L. x *Populus maximowitzi* Jap – 104 v závislosti na obsahu vody.

Tab. 2: Výhřevnost čisté dřevní hmoty rychle rostoucích topolů *Populus nigra* L. x *Populus maximowitzi* Jap – 104 v závislosti na obsahu vody

Obsah vody (%)	Výhřevnost čisté dřevní hmoty (MJ/kg)
5	18,4
10	17,31
15	16,21
20	15,11
25	14,01
30	12,92
35	11,82
40	10,72
45	9,63
50	8,53
55	7,43
60	6,33

Zdroj: CELJAK, Ivo: Pěstování topolů pro energetické účely

2.4.1.2 Vrby

Vrby, na rozdíl od topolů, jsou zastoupeny vesměs na všech světadílech, s výjimkou australsko-novozélandské oblasti a Antarktidy. Vyskytují se spíše v severním chladnějším a mírném pásu. Ve světě je popsáno asi 300 – 350 druhů vrb. Většina známých vrb je keřovitého vzrůstu. Řada druhů rodu *Salix* tvoří jak stromovité, tak i keřovité formy. Některé stromovité druhy dosahují ve velmi dobrých podmínkách výšky 30 – 35m při průměru kmene přes 1m, příkladem může být *Salix alba*. V ČR je evidováno asi 26 druhů vrb. Vzhledem k tomu, že se vrby v přírodě mohou mezi sebou křížit, je evidováno asi 30 spontánních kříženců.

Jelikož je členění rodu *Salix* sp. složité a co autor, to jiné dělení, bylo vybráno dělení dle CHMELAŘE na tři sekce dle tyčinek:

- 1. sekce *Pleiandrae*** – vyznačuje se nepravidelným počtem tyčinek (3 – 12). Do této skupiny je zařazeno asi 20 tropických druhů vrb.

Z vrb rostoucích u nás sem zařazujeme vrbu pětimužnou (*Salix pentandra*).

2. **sekce *Triandrae*** – prašníky mají tři tyčinky. Z vrb rostoucích u nás sem můžeme zařadit například vrbu trojmužnou (*Salix triandra*).
3. **sekce *Diandrae*** – vyznačuje se tím, že má v prašníku dvě tyčinky. V této sekci je zařazeno nejvíce druhů vrb. Patří sem i nejrozšířenější druhy domácích vrb jako: vrba jíva (*Salix caprea* L.), vrba bílá (*Salix alba* L.), vrba košíkářská (*Salix viminalis* L.).

Vrby zařazené ve třetí sekci jsou využívány ke křížení pro vznik klonů RRD vrb.

2.4.2 Celulózoligninová paliva

Produkce energetické biomasy má u nás důležitý význam a to přímo pro zemědělství. V poslední době bylo totiž prokázáno, že je u nás přebytek zemědělské půdy, která není potřebná k produkci potravin. Podle odhadů MZe se jedná o plochy vhodné k dalšímu využití o rozloze 465 tis. ha orné půdy a 523 tis. ha luk a pastvin. Celková plocha tudíž činí téměř 1 milion hektarů zemědělské půdy. Bohužel, značná část této plochy není u nás náležitě obdělávána, neboť trh potravin je přesycen a odbyt potravinářské produkce bývá často problematický. Tato přebytečná půda bývá proto zaplevelená a je pak vydatným zdrojem plevelů pro okolní pozemky.

Pro využití této půdy je třeba hledat nové netradiční využití. K tomuto účelu se nabízí pěstování energetických rostlin. Pro energetické využití biomasy k přímému spalování byly vybírány výnosné plodiny. Vhodné jsou rostliny vysoce vzrůstné, které vytváří velké množství nadzemní hmoty. Pro přímé spalování jsou efektivní rostliny, které dosahují výnosu kolem 10 t suché hmoty z 1 ha (Petříková, 2001).

2.4.2.1 Kostřava rákosovitá (*FESTUCA ARUNDINACEA* L. SCHREB.)

Kostřava rákosovitá je vytrvalá tráva s vysokým výnosovým potenciálem. Má význam v trvalých travních porostech, ale také v jetelotravních směsích na orné půdě. Rychle stárnoucí pletiva předurčují tuto travu jako vhodnou pro energetické využití. Vytváří poměrně vysoké výnosy celkové nadzemní hmoty. Je tolerantní k půdně-klimatickým podmínkám, takže může mít značně široké uplatnění Petříková a kol. (2006).

Pospíšil (2011) popisuje kostřavu jako vytrvalou, volně trsnatou rostlinu se stébly vysokými 50 až 150 cm, v optimálních podmínkách dorůstající do dvou metrů a více. Je odolná proti poléhání a má nízkou vypadavou semene (Římovský a kol., 1989). Kostřava rákosovitá je poměrně odolná proti houbovým chorobám. Tato tráva je rovněž perspektivní pro energetické využití, jak dodává Petříková a kol. (2006). Dle výzkumů lze dosáhnout bez hnojení výnosů 6,8 t.ha⁻¹ a při hnojení dusíkem až 10 t.ha⁻¹ suché biomasy.

Velich a kol. (1994) uvádí, že kostřava má neobyčejně širokou stanovištní amplitudu. Roste ve všech výrobních typech, i v subalpínském pásmu, bez ohledu na fyzikální vlastnosti půdy.

Vyznačuje se vysokou tolerancí k půdním i klimatickým podmínkám, snáší dobře sucho i krátkodobé zamokření, daří se jí dobře i na stanovištích s vyšší hladinou spodní vody, dodává Petříková a kol. (1996).

Frydrych (2002) uvádí, že podle posledních výzkumů v Zubří poskytují porosty vyseté do užších řádků vyšší výnosy. Hustší setí vyhovuje rovněž porostům záměrně zakládaným pro energetické účely, takže v těchto případech lze doporučit také setí do užších řádků. Další agrotechnické zásahy spočívají už jen v přihnojení či ochraně proti škodlivým činitelům s následnou sklizní.

Kostřava rákosovitá se zpravidla sklízí v červenci při plné zralosti. Sláma se lisuje do balíků, případně je možné ji sklídit sběrací řezačkou. Výnosy celkové nadzemní hmoty kostřavy rákosovité jsou přibližně 8 - 12 t.ha⁻¹ suché hmoty. Tyto průměrné hodnoty odpovídají výnosům získaným v roce 1999 v Zubří, kdy na hnojené variantě byl výnos 11 t.ha⁻¹, ve variantě nehnojené 6,88 t.ha⁻¹. Výhodné je i poměrně rychlé stárnutí porostu usnadňující vysychání biomasy, což

je rovněž vítané pro její využívání k přímému spalování. Pěstování kostřavy rákosovité pro energetické účely se proto jeví jako perspektivní.

2.4.2.2 Srha říznačka (*DACTYLIS GLOMERATA* L.)

Kubát a kol. (2010) popisuje srhu říznačku jako rostlinu šedozelené barvy, čepele 4 – 10 mm široké, lata za květu v obrysu trojúhelníková s téměř vzpřímeným vrcholem a větévkami téměř kolmo odstávajícími, později stažená. Klásky nápadně nahloučené, 3 - 5 květé. Plevy drsné, neprosvítající. Stébla na bázi sotva znatelně cibulkatě zduřelá, tenčí než 5 mm. Pochvy listů výrazně dvouřízně smáčknuté, stéblo a větévky laty drsné, až 15 cm dlouhé.

Srha patří s jílkem mnohokvětým a bojínkem lučným k nejvýnosnějším travám, jak uvádí Šantrůček a kol. (2001). Uplatňuje se v nejrůznějších podmínkách.

Plného výnosu dosahuje již ve 2. – 3. roku vegetace. Při dostatečné výživě, vláze a v příznivých podmínkách vydrží v porostu 6 – 10 let, avšak po 5. roce její vitalita a výnos klesá. Je to tráva převážně až výhradně ozimého charakteru a proto v roce setby a v otavě nemetá. Pro ranost, rychlost vývinu, mohutnost trsu, vzrůstnost a dlouhé široké listy patří mezi trávy s nejvyšší konkurenční schopností. Na půdách s vyšším obsahem přístupných živin, zvláště dusíku, silně potlačuje ostatní druhy a ve smíšených porostech se stává dominantní trávou.

2.4.2.3 Chrastice rákosovitá (*PHALARIS ARUNDINACEA* L.)

Chrastice rákosovitá, nazývaná též lesknice rákosovitá, je vytrvalá tráva relativně náročná na vodu a živiny, nenáročná na agrotechniku, dávající ve vhodných podmínkách vysoké výnosy nadzemní fytomasy (Sladký, 1995).

Stražil (2000) uvádí, že chrastice rákosovitá je vytrvalá cizosprašná výběžkatá tráva z čeledi lipnicovité (Poaceae). Patří k autochtonním druhům. Je přirozeně rozšířena na celém území našeho státu, všude tam, kde je dostatek půdní vláhly. Roste divoce téměř po celé Evropě, Asii (kromě jižní části) a Severní

Americe. Chrastice patří mezi naše nejvyšší trávy, jelikož výška stébel často přesahuje 2 m.

Je vhodné zařadit chrastici na nezaplevelený pozemek. Je nenáročná na předplodinu, může se sít prakticky po všech předplodinách. Ovšem nejvhodnější předplodinou jsou uváděny luskoobilní směsky a obilniny, které následují buď po píceň, nebo ozimé řepce. Je zvláště vhodná pro jinak těžkoobratitelné těžké zamokřené půdy, doplňuje Kuncová (2004). V posledních letech se masově šíří, zvláště na půdách bohatých na fosfor, a patří mezi nebezpečné expanzivní druhy, doplňuje studie Kubát (2010).

Hutla (2004) popisuje agrotechniku stejně jako Petříková a kol. (2006). Agrotechnika záleží na tom, za jakým účelem se chrastice pěstuje. Při pěstování pro energetické využití se chrastice seje do užších řádků na vzdálenost 12,5 (15) až 30 cm. Výsevek v čisté kultuře činí 20 – 25 kg.ha⁻¹ semene. Dobře založené porosty vydrží několik let.

Chrastice určená pro průmyslové využití se v roce výsevu většinou na podzim nesklízí. Sklízí se v drtivé většině na jaře, kdy se poseká na řádek a po té se lisuje do balíků. Sklízecí mechanismy se někdy upravují tak, že se sníží otáčky bubny a zvětší se průchodnost sklízecího ústrojí. Při těchto opatřeních je snižován odrol listů. Při energetickém využití se dají též lisovat pelety nebo brikety. Průměrné výnosy sušiny se pohybují v rozmezí 4,5 až 9 t.ha⁻¹. Uvádí se, že na uměle založených loukách při hnojivové závlaze lze dosáhnout výnosů více než 15 t.ha⁻¹. Ztráty sušiny přes zimní období se uvádějí kolem 25 % (Petříková a kol. 2006).

2.4.2.4 Ozdobnice čínská (*MISCANTHUS SINENSIS*)

Moudrý a Stražil (1996) popisují ozdobnici jako vytrvalou travu vysokého vzrůstu. Šlechtěná dosahuje za příznivých podmínek přes 30 t sušiny výnosu. Patří mezi rostliny typu C4, dobře využívající sluneční energii, vodu i živiny. Značně odolná proti chorobám a škůdcům.

V roce 1968 se dosáhlo u chrastice rekordního výnosu 20,9 t.ha⁻¹ sušiny na nezavlažovaném pozemku (Klesnil, 1978), z čehož vyplývá neustálý vývoj ve

šlechtění. Záleží především na kvalitě sázených rhizomů, jak pokračuje Sovák a Stupavský (2009). Dle nich nejsou rhizomy zpracovávané strojově tak kvalitní, jako rhizomy zpracovávané ručně. Rhizomy zpracovávané strojově bývají omlácené, někdy téměř bez oddenků, proto se neujme každý rhizom a kvalita porostu není tak značná. Při výsevu 12 000 ks/ha je porost hustý i při 10% nevzházivosti rhizomů.

Termín sklizně a sklizeň závisí na využití plodiny. Ozdobnice může být využita jako surovina pro energetické využití, stavební materiál, geotextilie, papír, obalový materiál, rostlinný substrát. Každá z těchto možností využití vyžaduje různý obsah vody, tvar, velikost a koexistenci výchozí suroviny. Ozdobnice je vysoká rostlina dosahující vysokých výnosů. I k těmto skutečnostem se musí při sklizni přihlížet (Stražil, 2009).

Petříková a kol. (2006) doporučuje sklizeň provádět pojezdovými samohodnými rezačkami, se kterými se sklízí kukuřice, převážně od listopadu do března.

V případě využití ozdobnice k přímému spalování je vhodný termín sklizně březen, kdy zimní mráz rostlinu vysuší na hodnoty 80 - 85 % sušiny, které jsou pro přímé spalování velice vhodné.

2.4.2.5 Šťovík Uteuša (*RUMEX PATIENTIA* L. x *RUMEX TIANSHANICUS* A. LOS)

Uteuša byl vyšlechtěn v osmdesátých letech jako nová krmná plodina profesorem J.A. Utešem z Ukrajiny. Jedná se o křížence šťovíku zahradního *Rumex patientia* L. (mateřská linie) a šťovíku tjanšanského *Rumex tianschanicus* A.Los. (otcovská linie), označeného jako Rumex OK 2, který byl vyšlechtěn metodou víceletého výběru (Ušťak, 2002).

Petříková a kol. (2006) uvádí, že se jedná o jednu z nejperspektivnějších energetických plodin v klimatických podmínkách mírného pásma.

Petříková a kol. (2006) potvrzuje, že se jedná o vytrvalou plodinu a vydrží na stejném stanovišti 15 - 20 let.

Lze sklízet již v červenci v suchém stavu s vlhkostí do 25 %. Sklizená biomasa má vynikající vlastnosti jako biopalivo a svou kvalitou se přibližuje dřevní štěpce. Jako všechny ostatní energetické plodiny se pro spalování sklízí jednou za rok. Pro sklizeň se dají použít běžné zemědělské stroje používaných při obhospodařování luk, ukončuje výklad Petříková a kol. (2006). Při dodržení správných pěstitelských postupů zajistí tato plodina dostatek fytomasy jako vhodného paliva po několik po sobě následujících let a to hned od 2. roku po zasetí, aniž by musel být porost znovu zakládán. Využívání tohoto „energetického“ šťovíku se u nás již začíná zdárně rozvíjet. Nový obrost při pěstování na energetické účely (koncem srpna nebo září) lze efektivně využít stejně jako podzimní porost v prvním roce, do siláže či na zelené krmění. Možné je i využití zelené hmoty na výrobu bioplynu, jak dodává Havlíčková a kol. (2007).

2.4.2.6 Sláma

Sladký (2010) uvádí, že častou námitkou proti spalování slámy je, že veškerá sláma, která v daném roce na polích narostla, musí přijít zpátky do půdy jako hnojivo. Skutečnost je však taková, že z půdy se do slámy dostává jen asi 5 – 6 % sušiny, kterou tvoří přijatě nerostné látky, které po spálení tvoří popel. Hlavní prvky ve slámě (uhlík, kyslík a vodík) se do fytomasy slámy dostaly v procesu fotosyntézy ze vzduchu a z vody. Vracíme-li do půdy popel po spálení, vracíme většinu živin, až na dusík, který uniká ve spalinách. Dusíku je však ve slámě méně než 1 %. Po sklizni sklízecími mlátičkami zůstává na poli větší nebo menší kořenový systém, vysoké strniště, mezi strništěm drobný propad (to je patrné zejména u řepkové slámy). Např. řepkové slámy se sklízí z hektaru kolem 3 tun, ale biologický výnos slámy se pohybuje od 7 – 10 t.ha⁻¹, rozdíl zůstává vždy na poli a zaorává se do půdy. Nikdo ze zastánců energetického využití slámy nepropaguje spálení veškeré slámy, v návrzích odborníků se hovoří o 25 % u obilovin, jen u řepky se počítá s větším podílem. Sláma je vedlejší produkt vznikající při sklizni dané plodiny. Rozeznáváme slámu obilnou: z pšenice,

triticale, žito, ječmene a ovesa a slámy kukuřičnou, řepkovou, slámu luskovin a lněné stonky, jak popisuje Havlíčková a kol. (2007).

Dle Moudrého a Strašila (1999) je možno slámu považovat za nejrozšířenější zdroj pro energetické využití pocházející ze zemědělské produkce, který je možno přímo spalovat. V České republice se vyprodukuje např. tolik řepkové slámy, která se běžně dále nevyužívá a doposud se většinou zaorává, že přeměna této slámy na energii by pokryla 2 % celkové potřeby energie ČR. Přitom s výhřevností 16 MJ/kg se rovná kvalitnímu hnědému uhlí, jak doplňují Součková a kol. (2006). Sláma má při spalování vysoký podíl zplynovaných částí. Tomu také odpovídá konstrukce kotlů na slámu.

Sláma také v důsledku hnojení obilovin a ošetřování herbicidy obsahuje sloučeniny chloru, které se ukázaly jako silně korodující látky u parních přehříváčů při teplotách přes 550 °C. Také obsah draslíku a křemíku se projevuje negativně, a to jednak usazováním sloučenin v létavém popílku na teplosměnných plochách výměníků, nebo v nízké teplotě tavení a spékání popele. Již kolem 860 °C se popel ze slámy lepí a při teplotách přes 1 000 °C teče. Rozsah teplot lepení, měknutí, tavení a tečení je u popele z různých stébelnin odlišný a je nutno tyto hodnoty znát předem. Proto nejvyšší teplota plamene musí být oddělena od místa, kde se nachází popel, který by se neměl dostat do stavu vznosu. Naopak obsah vápníku příznivě působí na rozpad popele, a proto se vápenný prach přidává do slaměných briket a pelet.

Důvod, proč k této reakci dochází, dodává Voláková (2008), která uvádí, že popel ze slámy je bohatý na alkalické kovy, kovy alkalických zemin a křemík. Zastoupením prvků se blíží ke složení sklářského kamene, tj. směsi surovin pro výrobu skla. Z této podobnosti plynou i problémy s tvorbou strusky a za jistých okolností, při vysoké teplotě a určitém poměru výše zmíněných prvků dochází až k tvorbě skloviny, která narušuje žáruvzdorné vyzdívky kotlového tělesa.

Při porovnávání výhřevnosti uváděných energetických plodin bylo zjištěno, že nejnižší výhřevnost obsahuje sláma energetického šťovíku a řepky olejky a to 15,3 MJ/kg. Naopak nejvyšší výhřevnosti dosahuje při 16,8 MJ/kg ozdobnice čínská (Tabulka 3, sloupec 2).

Nejnižší hodnoty spalného tepla (17,5 MJ/kg) byly naměřeny téměř u všech porovnávaných druhů energetických plodin. Jednalo se o košťavu rákosovitou, chrastici rákosovitou, slámu obilnin a řepky olejky. Nejvyšší hodnoty byly naměřeny u ozdobnice čínské (18,1 MJ/kg) (Tabulka 3, sloupec 3) .

V průměrných hodnotách suché biomasy byla sláma obilnin na nejnižším množství a to průměrně 3 t/ha. Pokud bychom pominuli skutečnost, že se jedná pouze o vedlejší (zbytkový) produkt při zemědělské výrobě, nejnižší průměrné výnosy suché hmoty by produkovala srha říznačka při 5,8 t/ha. Nejvyšších průměrných výnosů dosahovala ozdobnice čínská, která produkovala 14 t/ha suché biomasy (Tablka 3, sloupec 4).

V energetické produkci je s nejnižší hodnotou (45,9 GJ/ha) sláma řepky olejky. Naopak s nejvyšší hodnotou je zde ozdobnice čínská a to 235,2 GJ/ha (Tabulka 3, sloupec 5).

Tab. 3: Energetický obsah a energetická produkce vybrané biomasy

Druh rostlinné biomasy	Výhřevnost biomasy při vlhkosti 5% (MJ/kg)	Spalné teplo sušiny biomasy (MJ/kg)	Průměrné výnosy suché biomasy (t/ha)	Energetická produkce 1 ha (GJ)
Košťava rákosovitá	15,6	17,5	7,6	118,6
Srha říznačka	15,6	17,8	5,8	90,48
Chrastice rákosovitá	15,5	17,5	6,2	96,1
Ozdobnice čínská	16,8	18,1	14	235,2
Energetický šťovík	15,3	18	9	132,2
Sláma obilnin	15,5	17,5	4,2	65,1
Sláma řepky olejky	15,3	17,5	3	45,9

Zdroj: časopis Energie 21, č. 3/2008, st.7

2.5 DOPAD SPALOVÁNÍ ZEMĚDĚLSKÉ BIOMASY NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ

Antropogenní skleníkový efekt, globální oteplování a klimatická změna jsou v současné době skutečností, kterou potvrzují pozorování řady vědců, meteorologická měření, ale i exponenciální nárůst pojišťovacích škod v důsledku zvyšování účinku a frekvencí tajfunů, tornád a záplav následných přívalových dešťů. Táním arktických ledovců dochází ke zvyšování hladin moří s nebezpečím zaplavení částí přímořských a ostrovních států s očekávaným exodem desítek milionů lidí. Příčinou těchto nebezpečných jevů je zejména spalování fosilních paliv, při kterých se produkuje skleníkový plyn dioxid uhlíku (CO_2). Zvyšující se koncentrace dioxidu uhlíku a dalších skleníkových plynů (metanu, oxidu dusného, freonů) v atmosféře omezují vyzařování nahromaděného tepla na zeměkouli zpět do vesmíru, což má za následek globální oteplování. Intenzivní využívání fosilních paliv se stává pro trvale udržitelný rozvoj lidské společnosti neúnosné a řada států se snaží co největší podíl fosilních energií nahradit obnovitelnými energiemi, tj. energií solární, větrnou, geotermální, vodní, nejvyšší potenciál má energie z biomasy. Při spalování biomasy rovněž vzniká dioxid uhlíku, který však skleníkový efekt nenavyšuje a to z důvodu, že rostliny za svého růstu odebírají z ovzduší CO_2 a při spalování jej opět do ovzduší vracejí. Vzhledem k tomu, že průměrná délka růstu živé fytomasy je cca 10 let a podzemní části rostlin obvykle zadržují přeměněný CO_2 ještě déle (jako kořeny nebo jako půdní organická hmota), představuje pěstování energetické fytomasy významné vázání (sekvestraci) dioxidu uhlíku z atmosféry. Z ekologického hlediska je energetické využívání biomasy významnější než využívání ostatních obnovitelných energií.

Energetické využívání biomasy má ještě další výhody pro životní prostředí, pro agrární sektor, pro růst prosperity obcí a růst pracovních příležitostí. Palivo na bázi biomasy neobsahuje téměř žádnou síru a emise oxidu siřičitého je tudíž zanedbatelná. Ostatní škodliviny v emisích z fytopaliv jsou ve srovnání s emisemi z fosilních paliv příznivější. Podroštový popel z fytopaliv je možno z větší části použít jako hnojivo s dobrým obsahem vápníku, hořčíku, draslíku a fosforu (Váňa, 2003).

Uvádí se, že spalování biomasy je z hlediska oxidu uhličitého neutrální, neboť množství produkovaného oxidu uhličitého je srovnatelné s množstvím, spotřebovaným rostlinami při jejich růstu (fotosyntéza), jak uvádí Váňa (2003). Je to ovšem zjednodušený pohled, neboť stromy rostou desítky let a dřevo z nich se spálí okamžitě. Navíc při spalování biomasy vznikají i další škodliviny, a to některé velmi nebezpečné jako polyaromatické uhlovodíky, případně dioxiny.

2.5.1 Emisní faktory CO₂

Přestože současná legislativa se nezabývá emisemi CO₂, byly při spalování změřeny i hodnoty skutečných emisních faktorů CO₂. Obvykle se uvádí, že stejné množství oxidu uhličitého, které vznikne spálením biomasy, je biomasou absorbováno během růstu. Z toho plyne, že i když emisní faktor CO₂ při spalování není nulový, lze jej za nulový považovat.

Straka (2010) dodává, že praktické emise CO₂ z biopaliv jsou v průměru mírně vyšší než z tuhých paliv fosilních, avšak výrazně vyšší než z ropných paliv anebo ze zemního plynu. Reálný výpočet měrných emisí CO₂ je postup nanejvýše komplikovaný a nelze jej vždy a úplně nahrazovat teoretickou emisí CO₂. Reálné měrné emise se mohou podstatně lišit podle změn vlhkostí paliva (s rostoucí vlhkostí měrná emise CO₂ strmě stoupá tak, jak klesá výhřevnost paliva).

2.5.2 Emise těžkých kovů

U uhlí se ve spalinách objevuje z těžkých kovů řádově více olova než ostatních kovů. U koncentrací kovů s velkým vlivem na zdraví, jako je As, Cd, je koncentrace těchto kovů nižší u uhlí než u biomasy. U některých dalších vysoce toxických kovů, jako je již zmíněné olovo a dále pak rtuť, jsou koncentrace těchto kovů výrazně nižší u biomasy. U ostatních kovů se nedá jednoznačně stanovit, ze kterých paliv pronikají tyto kovy do spalin více.

2.5.3 Emisní faktory CO

Koncentrace CO ve spalinách za kotlem nejlépe ukazuje na kvalitu spalovacího procesu. Nedohořelý CO představuje ukazatel o špatně nastavených

spalovacích parametrech (množství vzduchu apod.) nebo o nevhodné konstrukci spalovacího zařízení pro dané palivo.

2.5.4 Emisní faktory NO_x

Grycmanová a Zbieg, (2012) uvádějí, že pro úspěšné plnění emisních limitů NO_x u stávajících zdrojů je zapotřebí optimalizovat jejich provoz za pomoci primárních opatření, většina těchto zařízení však ani po aplikaci primárních opatření nebude schopna dosahovat limitu 200 mg/m³ NO_x a bude tedy nezbytně nutné přistoupit i k sekundárním opatřením snižování emisí dusíku.

Snižování NO_x pomocí primárních opatření:

- jemnost mletí a výběr paliva (směsi paliv)
- úprava poměrů vzduch/palivo
- zrovnoměnění distribuce paliva do jednotlivých hořáků
- řízení poměrů vzduch/palivo - řízení distribuce paliva do jednotlivých hořáků
- optimalizace konstrukce hořáků a uspořádání hořáků
- použití a/nebo optimalizace denitrifikačních metod

Snižování NO_x pomocí sekundárních opatření: Sekundární metoda spočívá v chemickém odstranění vzniklých NO_x ze spalin. Všechny sekundární metody jsou založeny na reakci iontů NH₂⁻ s NO za vzniku molekulárního dusíku N₂ a vody H₂O.

Emise NO_x jsou nejvíce ovlivněny obsahem dusíku v palivu a teplotou ve spalovací komoře. Vysoká teplota (nad 1000 °C) způsobuje vznik tzv. termických NO_x. Teplota v ohništích malých výkonů je ve většině případů menší než kritická hodnota, takže termické NO_x netvoří hlavní díl výsledných emisí NO_x. Hlavní podíl na tvorbě emisí NO_x má obsah dusíku v palivu, dodává Koloničný (2010).

2.5.5 Emisní faktory PCDD/PCDF

Koloničný (2010) prezentuje, že při srovnání emisních faktorů u velkých kotlů s emisními faktory u malých kotlů jsou emisní faktory u velkých zdrojů téměř o tři řády nižší. Oproti velkým kotlům má biomasa u malých kotlů asi

dvojnásobný emisní faktor, ale vyskytlo se i měření, které mělo naopak emisní faktor oproti uhlí přibližně třetinový.

Měření prokázala značné rozkolísání emisí i v rámci shodného druhu paliva, z čehož plyne, že produkce PCDD/F je velice závislá na provozních podmínkách vytápění. Problematiku emisí PCDD/F na kotli 50 kW pro spalování biomasy se zabýval Verlieb a kol. (1999). Při spalování různých biopaliv byly zjištěny nejnižší emise při spalování dřevní štěpky. Koncentrace emisí PCDD/F byla průkazně vyšší u biopaliv s vyšším obsahem chloru nad 1,5 g / kg suš. Interval koncentrace emisí byl 0,003 - 1,822 ng TEQ/m³. To potvrzuje i VÁŇA (2003), který uvádí, že z literárních údajů vyplývá, že emise PCDD/F jsou závislé především na technologii spalování. Na kotelnách, kde je dávkování paliva a spalování řízeno automatickou regulací s kyslíkovou lambda sondou a kde dochází k dokonalému odloučení tuhých částic ze spalin byly emise PCDD zjištěny v intervalu 0,01 - 0,18 ng TEQ/m³. Na kotelnách s výkonem nižším než 100 kW, které nebyly vybaveny výše uvedeným standardem, nebo kde biopalivo obsahovalo více než 2000 mg/kg chloru byly zjištěny hodnoty 0,8 - 5,7 ng TEQ/m³. Z literárních údajů vyplývá, že statisticky průkazná závislost koncentrace emisí PCDD/F na obsahu chloru v palivu nastává až při koncentraci Cl vyšší než 2000 mg/kg.

Tabulka 4 znázorňuje obsah Cl a HCl u jednotlivých porovnávaných paliv. Nejvyšší hodnoty jsou zřejmé u pelet ze sena (Cl 2 890 mg/kg, HCl 173 mg/m³) a u pelet z pšeničné slámy (Cl 2 056 mg/kg, HCl 74 mg/m³). Nejnižší hodnoty byly naměřeny u topolové (Cl 16 mg/kg, HCl 0,13 mg/m³) a smrkové (Cl 120 mg/kg, HCl 0,9 mg/m³) štěpky.

Tab. 4: Emise HCl při spalování biopaliv s různým obsahem Cl v kotli 50 KW

Palivo	Cl mg/kg	HCl mg/m ³
smrková štěpka	120	0,9
topolová štěpka	16	0,13
pelety z pšenič. slámy	2056	74
pelety ze sena	2890	173
pelety z triticales	575	72

Zdroj: William F., Carroll J.: The relative contribution of wood and poly(vinyl chloride) to emissions of PCDD and PCDF from house fires, 2001.

Schmoeckel a Streit (2001) zjistili emise PCDD/F na 9 bavorských teplárnách při spalování dřeva o výkonu 100 kW - 13,9 MW v intervalu 0,01 - 5,0 ng TEQ/m³ (11% O₂). Koncentrace emisí PCDD/F velmi těsně korelovala s emisí HCl a s obsahem Cl ve dřevu. Korelace emise PCDD/F s emisí CO byla neprůkazná. Při nižším obsahu HCl v kouřových plynech než 30 ng /m³ byla emise PCDD/F 0,01 - 1,2 ng TEQ/m³ při vyšším obsahu 0,8 - 5,0 ng TEQ/m³.

Při srovnání čistých fosilních paliv se směsmi fosilních paliv a biomasy lze říci, že jsou emisní faktory zhruba na stejné úrovni, u některých směsných paliv je dokonce emisní faktor mírně nižší než u samotného fosilního paliva, dodává Koloničný (2010).

2.6 DEHET

Dehet, neboli tér, je směs několika set chemických látek. Jedná se o hustou olejovitou kapalinu charakteristického zápachu, tmavohnědé až černé barvy.

Jedná se o viskózní hořlavou kapalinu typického zápachu, hustoty 0,95 – 1,25 g/cm³, odpadající při tepelném rozkladu organických látek za nepřístupu vzduchu. Komplikovaná směs mnoha organických sloučenin, v níž je obvykle emulgována voda obsahující rozpuštěné anorganické a z části organické látky (soli, rozpuštěné plyny aj.). Dehet obsahuje i pevné částičky (prach, saze, úlety). Složení dehtu závisí zejména na teplotě rozkladu a době jejího působení na výchozí i vznikající (primární) produkty tepelného rozkladu a také na složení

pyrolyzovaného materiálu. Dehet a jeho páry jsou toxické a karcinogenní. Podle dosažené teploty se dehet dělí na nízkoteplotní (do 550°C) a vysokoteplotní (dehet přehřátý a nepřehřátý). Podle výchozí suroviny se rozlišuje např. dehet hnědouhelný, černouhelný, dřevný a podle technologického původu dehet koksárenský, plynárenský, generátorový, podle úpravy a použití dehet preparovaný nebo silniční.

Destilací dehtu lze získat dehtové oleje (frakce) dále používané k výrobě dehtových chemikálií, aromatických látek a sazí.

Existuje několik druhů:

Uhelný dehet

Vzniká při vysokoteplotní karbonizaci černého uhlí a je dále zpracováván v chemickém průmyslu na finální výrobky.

Tabákový dehet

Vzniká při hoření cigaret. Obsahuje převážně látky považované za karcinogenní nebo toxické. Patří mezi ně např. polycyklické aromatické uhlovodíky, aromatické aminy a anorganické sloučeniny.

Bukový dehet

Je antiseptická látka, která se používá pro prevenci a léčbu hniloby kopyt.

3 CÍL PRÁCE

Spalování obnovitelných zdrojů je označováno jako jeden z postupů, výhodných z hlediska udržitelné energetické politiky a ochrany životního prostředí. Nicméně, produkce dehtu představuje potenciální environmentální zátěž.

Cílem práce bylo vypracovat rešerši literatury o využití biomasy ke spalování, o technologiích spalování a jejich dopadu na životní prostředí, využití různých druhů biomasy (lignocelulózové vs. celulózoligninové paliva) a o množství spalného tepla z jednotlivých druhů biomasy.

Dalším cílem bylo experimentálně změřit obsah dehtu a ostatních kapalných produktů (v textu je pro zjednodušení uváděno pouze „dehet“) v různých druzích biomasy (energetický šťovík, seno, pšeničná sláma, řepková sláma, digestát z bioplynové stanice – dále jen BPS) suchou destilací. Tyto výsledky byly statisticky vyhodnoceny a diskutovány s poznatky z odborné literatury a v kontextu dopadu na životní prostředí. Byla testována hypotéza, že řepková sláma vykazuje vyšší hodnoty obsahu dehtu a ostatních kapalných produktů z důvodu horšího spalování, než u jiné biomasy.

4 METODIKA PRÁCE

Měření obsahu dehtu a ostatních kapalných produktů vychází z předběžné české technické normy ČSN P CEN/TS 15439 pod názvem „Zplyňování biomasy – Dehet a částice v plynných produktech – Vzorkování a analýza“. Z důvodu vysokých finančních nákladů při dodržení této Normy bylo měření provedeno následujícím způsobem:

Odběr vzorků

Odběr vzorků pšeničné slámy, šťovíku a sena byl proveden v zemědělském podniku ZEMCHEBA, s.r.o. v Chelčicích ze slisovaných balíků těchto materiálů ze sklizně v roce 2013.

Odběr vzorku digestátu z BPS bylo provedeno v zemědělském podniku ZD Krásná hora a následně slisováno peletovací lisem BRIKLIS.

Odběr vzorku řepkové slámy (pelety) byl proveden odebráním vzorku z běžně prodávaných pelet.

Předsušení rostlinného materiálu

Předsušení rostlinného vzorku probíhalo po dobu 24 hodin při 100 °C a to u každého vzorku zvlášť (v jeden den proběhla zkouška vždy jednoho materiálu).

Navážení vzorku rostlinné hmoty

Volil jsem dle hustoty jednotlivých materiálů a charakteru původu. U pelet řepkové slámy jsem volil vyšší hmotnost ohledně vyšší vypovídací schopnosti, u pelet digestátu jsem volil hmotnost ještě o něco vyšší, jelikož se jedná o fytomasu, která již prošla stupněm fermentace, a dalo se předpokládat, že konverze bude nižší – labilní složky byly konvertovány při fermentaci, tudíž se dalo předpokládat, že obsah dehtu není tak vysoký. Množství sena a slámy jsem volil v závislosti na objemu retorty – fytomasu jsem nastříhal nůžkami pro snazší manipulaci a snazší plnění retorty a pelety digestátu jsem nadrtil v třecí misce.

Pyrolýza fytomasy

Uzavřel jsem retortu a upevnil ji do stojanu utažením křídlových matek. Následně jsem umístil odvodní potrubí do vodou chlazené baňky. Musel jsem improvizovat zejména kvůli stísněnému prostoru zkušební skříně, proto jsem dehet (pyrolýzní olej) pouštěl rovnou do baňky chlazenou průtokem vody, nikoliv přes průtokový chladič (Obr. 1).

Po té následovalo umístění teploměru do retorty, zapálení hořáku a zahřátí na požadovanou teplotu 350 – 400 °C, ke které došlo přibližně za 10 – 12 minut. Po docílení požadované teploty jsem zmírnil plamen hořáku pomocí převlečené trubky omezující přívod kyslíku a zahříval jsem retortu po dobu 30 minut při požadované teplotě 350 – 400 °C.

Obr. 1: Sestavené zařízení pro pyrolýzu fytomasy



Postup při ukončení pokusu

Po skončení doby pokusu jsem vypnul hořák, otevřel dveře pokusné skříně a zapnul jsem odsávání, čímž se zvýšila cirkulace vzduchu a došlo k rychlejšímu vychlazení retorty pro odebrání použitého vzorku.

Odsávání bylo zapnuté i během pokusu, zejména při počátku pyrolýzy, kdy bylo nutné odsát zvýšené množství tvořícího se pyrolýzního plynu. Zvážení obsahu popele, tzv. biouhlu. Po zvážení jsem biouhel zavřel do sklenice, aby nedošlo k samovznícení (Obr. 2 – 6).

Obr. 2: Vzorek digestátu z BPS před a po pyrolýze



Obr. 3: Vzorek řepkové slámy (pelety) před a po pyrolýze



Obr. 4: Vzorek šťovíku před a po pyrolýze



Obr. 5: Vzorek pšeničné slámy před a po pyrolýze



Obr. 6: Vzorek sena před a po pyrolýze



Ochranné pomůcky

- rukavice, plášť, ochranné brýle, respirátor

Měření obsahu dehtu

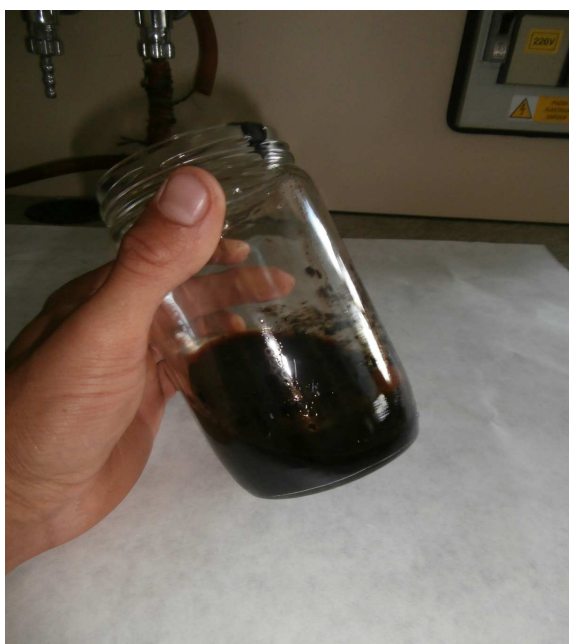
Z důvodu omezeného objemu retorty jsem dehet nechal odtékat do stejné baňky, kterou jsem zvažil vždy před pokusem a po jeho ukončení, aby bylo měření obsahu dehtu co nejpřesnější, jelikož se dehet se usazoval i na odvodním potrubí (Obr. 7 a 8).

Vzhledem k tomu, že tato metodika neumožňovala oddělit dehet od tzv. „dřevného octa“, byl stanovován současně obsah dehtu a ostatních kapalných produktů suché destilace. Pro zjednodušení je dále však v textu používán termín „obsah dehtu“.

Obr. 7: Dehet zachycený v baňce



Obr. 8: Výsledné množství dehtu ze všech vzorků paliv



Statistické zhodnocení dat

Pro statistické vyhodnocení dat byla použita Kruskal-Wallisova Anova v rámci statistického programu STATISTIKA (StatSoft, Inc., 2013). Testována byla významnost efektu druhu biomasy na obsah dehtu. Neparametrický test byl zvolen z toho důvodu, že data nesplňovala předpoklady normality (testováno χ^2 testem). Následně bylo provedeno vícenásobné porovnávání průměrného pořadí všech skupin biomasy na hladině významnosti $\alpha = 0,05$.

5 VÝSLEDKY

Vzhledem k omezenému objemu retorty bylo možné vložit jen přibližně 20 g pelet (řepkové slámy) (Tab. 5). Rozdíl váhy po pyrolýze fytohmoty se pohyboval od 13,12 do 13,35 g, pouze při prvním měření byla hodnota nižší (12,7 g). Také obsah změřeného dehtu a ostatních kapalných produktů se pohyboval od 8,03 do 8,11 g se dvěma výjimkami a to při prvním (6,77 g) a třetím (6,83 g) měření. Výsledky obsahu dehtu a ostatních kapalných produktů byly v průměru 37,95 % (nejmenší 33,43% a největší 40,97%) (Tab. 5).

Tab. 5: Výsledky opakování měření pyrolýzy u řepkové slámy (pelety) v šesti opakováních. Uvedeny jsou naměřené hodnoty navážky biomasy, rozdíl navážky, množství zachyceného dehtu (g) a obsah dehtu (%) z jednotlivých měření.

Počet opakování	Řepková sláma - pelety			
	(g)			(%)
	Navážka	Rozdíl váhy (navážka - biouhel)	Dehet a ostatní kapalné produkty (zachycené v baňce)	Obsah dehtu a ostatních kapalných produktů
1	20,12	12,7	6,77	33,65
2	20,27	13,12	8,03	39,62
3	20,43	13,35	6,83	33,43
4	20,36	13,2	8,11	39,83
5	20,06	13,26	8,06	40,18
6	20,26	13,28	8,3	40,97

Vzhledem k omezenému objemu retorty bylo možné vložit ca 10 g změřeného materiálu (pšeničné slámy). Rozdíl váhy po pyrolýze fytohmoty se pohyboval pravidelně okolo hodnoty 6,8 g bez výrazných výjimek. Obsah změřeného dehtu a ostatních kapalných produktů se pohyboval pravidelně okolo hodnoty 4,6 g se dvěma výjimkami a to při třetím (2,34 g) a čtvrtém (3,86 g) měření. Výsledky obsahu dehtu a ostatních kapalných produktů byly v průměru 40,48 % (nejmenší 23,05% a největší 46,2%) (Tab. 6).

Tab. 6: Výsledky opakování měření pyrolýzy u pšeničné slámy v šesti opakováních. Uvedeny jsou naměřené hodnoty navážky biomasy, rozdíl navážky, množství zachyceného dehtu (g) a obsah dehtu (%) z jednotlivých měření.

Počet opakování	Pšeničná sláma			
	(g)			(%)
	Navážka	Rozdíl váhy (navážka - biouhel)	Dehet a ostatní kapalné produkty (zachycené v baňce)	Obsah dehtu a ostatních kapalných produktů
1	10,13	6,74	4,68	46,2
2	10,15	6,76	4,63	45,62
3	10,15	6,9	2,34	23,05
4	10,16	6,8	3,86	36,22
5	10,19	6,82	4,68	45,93
6	10,16	6,93	4,66	45,87

Vzhledem k omezenému objemu retorty bylo možné vložit ca 10 g měřeného materiálu (šťovíku – slámy). Rozdíl váhy po pyrolýze fytohmoty se pohyboval pravidelně okolo hodnoty 6,9 g bez výrazných výjimek. Také obsah změřeného dehtu a ostatních kapalných produktů se pohyboval pravidelně okolo hodnoty 4,4 g s jednou výjimkou a to při pátém (2,98 g) měření. Výsledky obsahu dehtu a ostatních kapalných produktů byly v průměru 40,38 % (nejmenší 29,3% a největší 44,44%) (Tab. 7).

Tab. 7: Výsledky opakování měření pyrolýzy u šťovíku - slámy v šesti opakováních. Uvedeny jsou naměřené hodnoty navážky biomasy, rozdíl navážky, množství zachyceného dehtu (g) a obsah dehtu (%) z jednotlivých měření.

Počet opakování	Šťovík - sláma			
	(g)			(%)
	Navážka	Rozdíl váhy (navážka - biouhel)	Dehet a ostatní kapalné produkty (zachycené v baňce)	Obsah dehtu a ostatních kapalných produktů
1	10,02	6,81	4,16	41,52
2	10,17	6,79	4,43	43,56
3	10,17	6,89	4,52	44,44
4	10,17	6,97	4,11	40,41
5	10,17	6,96	2,98	29,3
6	10,17	6,96	4,58	43,03

Vzhledem k omezenému objemu retorty bylo možné vložit ca 10 g měřeného materiálu (sena). Rozdíl váhy po pyrolýze fytomasy se pohyboval pravidelně okolo hodnoty 6,5 g bez výrazných výjimek. Také obsah změřeného dehtu a ostatních kapalných produktů se pohyboval pravidelně okolo hodnoty 4,1 g s jednou výjimkou a to při prvním (3,99 g) měření. Výsledky obsahu dehtu a ostatních kapalných produktů byly v průměru 41,28 % (nejmenší 39,54% a největší 42,69%) (Tab. 8).

Tab. 8: Výsledky opakování měření pyrolýzy u sena v šesti opakováních. Uvedeny jsou naměřené hodnoty navážky biomasy, rozdíl navážky, množství zachyceného dehtu (g) a obsah dehtu (%) z jednotlivých měření.

Počet opakování	Seno			
	(g)			(%)
	Navážka	Rozdíl váhy (navážka - bíouhel)	Dehet a ostatní kapalné produkty (zachycené v baňce)	Obsah dehtu a ostatních kapalných produktů
1	10,09	6,7	3,99	39,54
2	10,05	6,58	4,06	40,4
3	10,05	6,51	4,29	42,69
4	10,06	6,55	4,11	40,85
5	10,06	6,5	4,18	41,55
6	10,08	6,48	4,3	42,66

Vzhledem k omezenému objemu retorty bylo možné vložit ca 40 g měřeného materiálu (digestátu z BPS – pelety). Rozdíl váhy po pyrolýze fytomasy se pohyboval pravidelně okolo hodnoty 19 g s jednou výjimkou při šestém (18,72 g) měření. Také obsah změřeného dehtu a ostatních kapalných produktů se pohyboval pravidelně okolo hodnoty 12 g se dvěma výjimkami a to při prvním (11,64 g) a šestém (11,59 g) měření. Výsledky obsahu dehtu a ostatních kapalných produktů byly v průměru 29,58 % (nejmenší 33,43% a největší 40,97%) (Tab. 9)¹.

¹ Tab. 9, str. 60

Tab. 9: Výsledky opakování měření pyrolýzy u digestátu z BPS (pelety) v šesti opakováních. Uvedeny jsou naměřené hodnoty navážky biomasy, rozdíl navážky, množství zachyceného dehtu (g) a obsah dehtu (%) z jednotlivých měření.

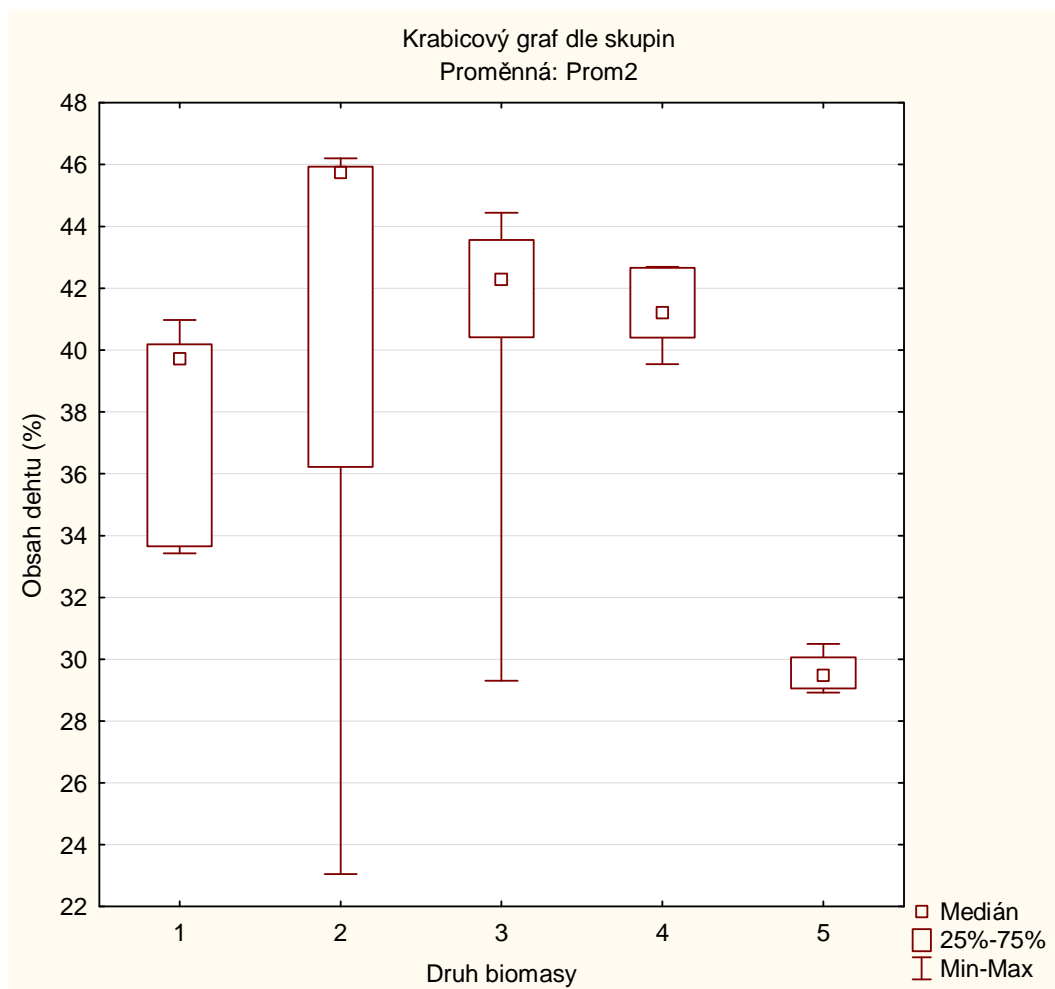
Počet opakování	Digestát z BPS - pelety			
	(g)			(%)
	Navážka	Rozdíl váhy (navážka - biouhel)	Dehet a ostatní kapalné produkty (zachycené v baňce)	Obsah dehtu a ostatních kapalných produktů
1	40,05	19,12	11,64	29,06
2	40,09	18,87	12,05	30,06
3	40,05	19,02	11,87	29,64
4	40,04	19,19	12,21	30,49
5	40,04	19,1	11,74	29,32
6	40,08	18,72	11,59	28,92

Průměrné hodnoty obsahu dehtu vyšly nejvyšší u sena (41,28 %) a nejnižší u digestátu (29,58 %; Tab. 10). Mezi jednotlivými druhy byly zjištěny statisticky významné rozdíly ($H = 12,89$; $P = 0,012$). Podle párového porovnávání se nicméně lišil pouze obsah dehtu pšeničné slámy a digestátu..($P = 0,018$) rozdíly mezi ostatními páry nebyly průkazné ($P > 0,05$). Na obrázku 9 je patrná vysoká variabilita obsahu dehtu u pšeničné slámy (směrodatná odchylka = 9,38), na rozdíl od digestátu (směrodatná odchylka = 0,61; Tab. 10).

Tab. 10: Průměrné hodnoty obsahu dehtu v jednotlivých druzích biomasy (SD – směrodatná odchylka, N – počet měření)

Druh vzorku	Obsah dehtu v % (průměr)	Počet měření N	Směrodatná odchylka
Řepková sláma - pelety	37,95	6	3,45
Pšeničná sláma	40,48	6	9,38
Štovník - sláma	40,38	6	5,62
Seno	41,28	6	1,26
Digestát z BPS - pelety	29,58	6	0,61

Obr. 9: Krabicový graf s hodnotami obsahu dehtu u jednotlivých druhů biomasy (mediány, 25% a 75% kvartily, min. a max. hodnoty)



Vysvětlivky: 1 – Řepková sláma – pelety, 2 – Pšeničná sláma, 3 – Šťovík – sláma, 4 – Seno, 5 – Digestát z BPS

6 DISKUSE

Původně zkoumaná hypotéza, že v řepkové slámě bude vyšší obsah dehtu, vycházela z praktických zkušeností autora. Spalování samotné řepkové slámy znečišťovalo výparníky kotlů na biomasu v takovém rozsahu, že bylo nutné tyto části zařízení čistit dvakrát týdně, oproti běžnému čištění asi jednou za dva měsíce (jednalo se o „Zařízení na kombinovanou výrobu elektrické energie a tepla“ v areálu společnosti ZEMCHEBA, s.r.o.). Obsah dehtu a ostatních kapalných produktů byl v řepkové slámě srovnatelný např. s energetickým šťovíkem, který tyto problémy ve výparnících nezpůsobuje.

Výsledky měření nepotvrdily výchozí hypotézu, že obsah dehtu bude v řepkové slámě vyšší než u ostatních měřených druhů biomasy. Prokazatelně vyšší byl obsah dehtu pouze u pšeničné slámy oproti obsahu dehtu u digestátu. Mezi ostatními druhy biomasy statisticky prokazatelné rozdíly zjištěny nebyly. Digestát měl nižší obsah dehtu zřejmě z toho důvodu, že již prošel stupněm fermentace. K tomuto nutno dodat, že neznáme přesné složení surovin, ze kterých byl digestát odebrán. Toto palivo bylo z hlediska odebíraných vzorků nejstálější. Je třeba vzít v úvahu, že se měřil obsah všech kapalných frakcí, což může být zdrojem nepřesnosti. Pro přesnější stanovení by bylo nutno provést více opakování měření. Především řepková a pšeničná sláma vykazovaly značnou variabilitu obsahu dehtu z jednotlivých měření.

Porovnání jednotlivých výsledků odebraných vzorků s výhřevností a spalným teplem jednotlivých biopaliv z literatury bylo zjištěno, že výhřevnost je u pšeničné slámy (15,5 MJ/kg) i sena (15,3 MJ/kg) podobná (časopis Energie 21, č. 3/2008, st.7). Spalné teplo bylo u obou těchto paliv naměřeno stejné a to 17,5 MJ/kg. Naopak u šťovíku, který obsahoval podobný obsah dehtu jako u ostatních měřených biopaliv, byla výhřevnost naměřena 15,3 MJ/kg a spalné teplo 18 MJ/kg, tudíž v porovnání spalného tepla a obsahu dehtu vyšel nejlépe vzorek energetického šťovíku. Nutno dodat, že na vzorku digestátu z BPS nebylo prováděno měření výhřevnosti a spalného tepla, tudíž není možné toto palivo porovnat stejným způsobem.

Vysoký obsah dehtu a ostatních kapalných produktů v seně a pšeničné slámě v návaznosti na emise, potvrzuje i obsah HCl v těchto palivech, kdy byly naměřeny hodnoty HCl 74 mg/m³ (pšeničná sláma) a 173 mg/m³ (seno) (William a Carroll, 2001).

7 ZÁVĚR

Z hlediska porovnávání výhřevnosti lignocelulóзовých paliv podle literárních zdrojů dosahuje nejlepší výhřevnosti ozdobnice čínská (16,8 MJ/kg). Naopak nejnižší hodnoty výhřevnosti jsou uvedeny u energetického šťovíku a řepkové slámy (15,3 MJ/kg). Spalného tepla měla nejvyšší výsledky ozdobnice čínská a energetický šťovík (18 – 18,1 MJ/kg). Ostatní paliva byla srovnatelná (17 MJ/kg) Při porovnání spalného tepla celulózoligninových paliv byly zjištěny téměř totožné hodnoty všech porovnávaných klonů (19,48 – 19,59 MJ/kg).

Výsledky měření obsahu dehtu (všech kapalných frakcí včetně dehtu, prokázaly vyšší hodnotu obsahu dehtu v pšeničné slámě (průměrně 40,48 %) v porovnání s digestátem (průměrně 29,58 %; $P < 0,05$). Rozdíly v obsahu dehtu u dalších měřených druhů biomasy (řepková sláma, seno, energetický šťovík) se statisticky nelišily a průměrně dosahovaly hodnot od 37,95 % (řepková sláma) do 41,28 % (seno). Nepodařilo se tedy prokázat předpoklad vyššího obsahu řepkové slámy vycházející z praktických zkušeností autora. Důvodem mohla být jiná příčina zanášení výparníků, než obsah dehtu a ostatních kapalných produktů v palivu, nebo malý počet opakování měření.

Věřím, že tato práce bude přínosem pro budoucí přístup k zemědělským palivům, ať už cíleně pěstovaných nebo jako druhotný produkt ze zemědělské výroby. Podobné poznatky mohou napomoci nastavení těchto technologií tak, aby byly opravdu ekologické.

8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- Burg, P., Souček, J.: Porovnání produkce a výhřevnosti u réví z vinic. *Biom.cz* [online]. 2012-10-08 [cit. 2013-12-27]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/porovnaní-produkce-a-vyhřevnosti-u-revi-z-vinic>>. ISSN: 1801-2655.
- Celjak, I.: Pěstování topolů pro energetické účely – 3. *Biom.cz* [online]. 2010-09-06 [cit. 2013-12-27]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/pestovani-topolu-pro-energeticke-ucely-3>>. ISSN: 1801-2655.
- Frydrych, J., Šantrůček J.: Energetické využití některých travních druhů, Praha, 2001, 34 s., ISBN 80-7271-093-1.
- Grycmanová, M., Zbieg, R.: Metody dosažení emisních limitů emisí NO_x kotlů velkých výkonů. *Biom.cz* [online]. 2012-05-02 [cit. 2014-01-17]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/metody-dosazeni-emisnich-limitu-emisi-nox-kotlu-velkych-vykonu>>. ISSN: 1801-2655.
- Havlíčková, K.: Zhodnocení ekonomických aspektů pěstování a využití energetických rostlin, vědecká monografie, Průhonice: Výzkumný ústav Silva Taroucy pro krajinu a okrasné zahradnictví, České Budějovice, 2007, 92 s., ISBN 978-80-85116-00-7.
- Havlíčková, K., Weger, J.: Metodika analýzy potenciálu biomasy jako obnovitelného zdroje energie. Acta Pruhoniana 83, VÚKOZ, Průhonice, 2006, 96 s. ISBN 80-85116-48-0.
- Hutla, P.: Chrástice rákosovitá - pěstování a možnosti využití. *Biom.cz* [online]. 2004-03-10 [cit. 2011-12-28]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/chrastice-rakosovita-pestovani-amoznosti-vyuziti>>, ISSN 1801-2655.
- Klesnil, A.: Intenzivní výroba píce, Praha, 1978, 353 s.
- Kohout, P.: Rychle rostoucí dřeviny v energetice, České Budějovice, Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Zemědělská fakulta, 2010, 101 s., ISBN 978-80-7394-247-2.

- Koloničný, J.: Emise při spalování biomasy. *Biom.cz* [online]. 2010-06-07 [cit. 2013-12-27]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/emise-pri-spalovani-biomasy-2>>. ISSN: 1801-2655.
- Kubát, K.: Klíč ke Květeně České republiky, Academia, Praha, 2010, 928 s., ISBN 978-80-200-0836-7
- Kuncová, T.: Ekonomika pěstování chrastice rákosovité. *Biom.cz* [online]. 2004-08-09 [cit. 2011-12-28]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/ekonomika-pestovani-chrasticerakosovite>>, ISSN 1801-2655.
- Maláček, J., Vaculík, P.: Biomasa pro výrobu energie, Česká zemědělská fakulta v Praze, Praha, 2008, 206 s., ISBN 978-80-213-1810-6.
- Motlík, J., Váňa, J.: Biomasa pro energii (2) Technologie. *Biom.cz* [online]. 2002-02-06 [cit. 2013-12-30]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/biomasa-pro-energii-2-technologie>>. ISSN: 1801-2655.
- Moudrý, J., Stražil, Z.: Skripta z předmětu pěstování alternativních plodin, ZF Jihočeské univerzity, České Budějovice, 1999, 165 s., ISBN 80-7040-383-7.
- Ochodek, T., Koloničný, J., Branc, M. Ekologické aspekty záměny fosilních paliv za biomasu. VŠB – TU Ostrava, Výzkumné energetické centrum, Ostrava 2007. ISBN 978-80-248-1595-4.
- Pastorek, Z., Kára, J., Jevič, P.: Biomasa: obnovitelný zdroj energie, Praha, 2004, 286 s., ISBN 80-86534-06-5.
- Petříková, V.: Energetické plodiny, Praha, 2006, ISBN 80-86726-13-4.
- Petříková, V.: Biomasa – významný zdroj ekologické energie. *Biom.cz* [online]. 2001-11-08 [cit. 2014-04-28]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/biomasa-vyznamny-zdroj-ekologicke-energie>>. ISSN: 1801-2655.
- Petříková, V.: Pěstování a využití technických a energetických plodin na rekultivovaných pozemcích. Metodiky pro zemědělskou praxi č.17, 24 str. Praha, 1996
- Schmoecker G., Streit A.: Emissionen organischer Stoffe bei Holzfeuerung. Referat 1/3 Bayerisches Landesamt für Umweltschutz. 2001.
- Sladký, V.: Příprava paliva z biomasy, studijní informace: zemědělská technika, 1995/3, Praha, 1995, 50 s.

- Součková, H., Moudrý, J.: Nepotravinářské využití fytomasy, Praha, České Budějovice: Výzkumný ústav zemědělské ekonomiky, 2006, 95 s., ISBN 80-7040-857-X:73.00.
- Sovák, L., Stupavský, V.: Využití energetické plodiny *Miscanthus Giganteus* je rentabilní. *Biom.cz* [online]. 2009-02-04 [cit. 2014-04-28]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyuziti-energeticke-plodiny-miscanthus-giganteus-je-rentabilni>>. ISSN: 1801-2655.
- Staf, M., Buryan, P.: Aplikace metod termické analýzy ve výzkumu pyrolýzy biomasy. *Biom.cz* [online]. 2005-01-20 [cit. 2013-12-30]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/aplikace-metod-termicke-analyzy-ve-vyzkumu-pyrolyzy-biomasy>>. ISSN: 1801-2655.
- Stražil, Z.: Ekonomická analýza vybraných energetických rostlin určených pro spalování. In: Sbor. Technika a technologie pro nepotravinářské využití půdy a její udržování v klidu. 2000, Brno, s. 17.
- Stražil, Z.: Základy pěstování a možnosti využití ozdobnice (*Miscanthus*), metodika pro praxi, Výzkumný ústav rostlinné výroby, 2009, 52 s., ISBN 978-80-7427-006-2
- Stupavský, V.: Víme, co se pod pojmem biopaliva ve skutečnosti skrývá? Mají biopaliva negativní vliv na rostoucí ceny potravin?. *Biom.cz* [online]. 2008-09-29 [cit. 2013-10-14]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/vime-co-se-pod-pojmem-biopaliva-ve-skutecnosti-skryva-maji-biopaliva-negativni-vliv-na-rostouci-ceny-potravin>>. ISSN: 1801-2655.
- Stupavský, V., Holý, T.: Dřevní štěpka - zelená, hnědá, bílá. *Biom.cz* [online]. 2010-01-01 [cit. 2013-12-27]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/drevni-stepka-zelena-hneda-bila>>. ISSN: 1801-2655.
- Straka, F.: Alternativní energetické zdroje a měrné emise CO₂. *Biom.cz* [online]. 2010-01-11 [cit. 2013-12-27]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/alternativni-energeticke-zdroje-a-merne-emise-co2>>. ISSN: 1801-2655.

- Šantrůček, J. a kol.: Skripta České zemědělské univerzity v Praze z předmětu Základy pícninářství, Praha, 2001, 146 s., ISBN 80-213-0764-1.
- Toman, Z.: Mechanismus a podmínky dokonalého spalování biomasy. *Biom.cz* [online]. 2011-02-07 [cit. 2013-12-30]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/mechanismus-a-podminky-dokonaleho-spalovani-biomasy>>. ISSN: 1801-2655.
- Váňa, J.: Spalování biomasy s ohledem na životní prostředí a zdraví lidí. *Biom.cz* [online]. 2003-01-07 [cit. 2014-01-17]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/spalovani-biomasy-s-ohledem-na-zivotni-prostredi-a-zdravi-lidi>>. ISSN: 1801-2655.
- Velich, J.: Skripta Vysoké školy zemědělské v Praze z předmětu Pícninářství, Praha, VŠZ, 1994, 204 s., ISBN 80-213-0156-2.
- Voláková, P.: Problematika spalování biomasy – tvorba strusky a skelných nápeků z biomasového na alkálie bohatého popela, Ph.D.Thesis, VŠCHT Praha, 2008.
- William F., Carroll J.: The relative contribution of wood and poly(vinyl chloride) to emissions of PCDD and PCDF from house fires. *Chemosphere* 45, pp. 1173 – 1180, 2001.

Ostatní zdroje:

Časopis Energie 21, č. 3/2008, str.7

ČSN ISO 1928 (441352) Tuhá paliva - Stanovení spalného tepla kalorimetrickou metodou v tlakové nádobě a výpočet výhřevnosti

ČSN P CEN/TS 15439 Zplyňování biomasy – Dehet a částice v plynných produktech – Vzorkování a analýza

SLOVNÍK ODBORNÝCH VÝRAZŮ: Dostupný z <http://www.energetickyporadce.cz/cs/slovník-odbornych-vyrazu/fluidni-kotel/>

StatSoft, Inc. (2013). STATISTICA (data analysis software system), version 12, dostupné z www.statsoft.com.

Vyhláška č. 5/2007 Sb., kterou se mění vyhláška č. 482/2005 Sb., ustanovení druhů, způsobů využití a parametrů biomasy při podpoře výroby elektřiny z biomasy.