



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV
ENERGY INSTITUTE

DEGRADACE BIOMASY PŘI
SKLÁDKOVÁNÍ
DEGRADATION OF BIOMASS FUELS DURING STORING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Patrik Elbl

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Martin Lisý, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Patrik Elbl**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Martin Lisý, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

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

Degradace biomasy při skládkování

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Stanovení časové degradace štěpky na skládce paliva. Rešerže a následné experimentální stanovení časové závislosti degradace paliva vlivem okolních podmínek.

Cíle bakalářské práce:

- provést rešerži vlastností biomasy jako paliva a jejího spalování
- provést rešerži vlivu klimatických podmínek na degradaci biomasy při skládkování
- experimentálně ověřit vliv skladování na parametry biomasy

Seznam literatury:

Jandačka, J. a kol.: Biomasa ako zdroj energie. Žilina 2008, ISBN 978-80-969161-3-9

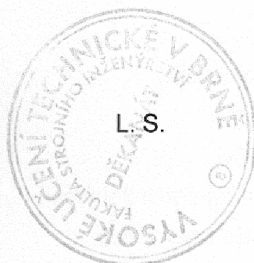
Jandačka, J., Mikulík, M.: Technologie pre zvyšovanie energetickeho potencialu biomasy. TU Žilina 2007, ISBN 978-80-969595-4-9

Trávníček et kol.: Technologie zpracování biomasy za účelem energetického využití, MZLU 2015, ISBN 978-80-7509-206

Internetové zdroje

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

V Brně, dne 1. 12. 2015



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

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce má za cíl pojednat o degradaci biomasy při skládkování. První část je věnována rešeršní studii zabývající se biomasou jako takovou. Jsou zde zmíněny vlastnosti biomasy, rozdělení, problematika spalování a skládkování. Druhá část se zabývá experimentálním stanovením degradace paliva vlivem skládkování a klimatických podmínek.

Klíčová slova

Biomasa, spalování, degradace biomasy, skládkování

ABSTRACT

This thesis aims to deal with degradation of biomass fuels during storing. The first part of thesis is dedicated to research study concerning of biomass in general. There are mentioned properties of biomass, separation, issues of combustion and storing. The second part deals with experimental determination of degradation of fuel during storing and weather conditions.

Key words

Biomass, combustion, degradation of biomass, storing

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ELBL, P. *Degradace biomasy při skládkování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 45 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Lisý, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Degradace biomasy při skládkování** vypracoval samostatně pod vedením svého vedoucího práce Ing. Martina Lisého Ph.D. s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu použitých zdrojů.

.....

Datum

.....

Patrik Elbl

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji svému vedoucímu práce Ing. Martinu Lisému Ph.D. za cenné rady, připomínky a odborné vedení po celou dobu řešení tématu bakalářské práce a rovněž bych chtěl poděkovat Ing. Otakaru Štelcovi za odbornou pomoc a čas, který mi věnoval při experimentu.

OBSAH

| | |
|---|-----------|
| ABSTRAKT | 5 |
| PROHLÁŠENÍ | 7 |
| PODĚKOVÁNÍ | 8 |
| OBSAH | 9 |
| ÚVOD | 11 |
| 1 BIOMASA | 12 |
| 1.1 Vznik biomasy..... | 12 |
| 1.2 Rozdělení biomasy | 13 |
| 1.2.1 Dřevní biomasa - dendromasa | 13 |
| 1.2.2 Fytomasa – bylinná biomasa | 14 |
| 1.2.3 Ovocná biomasa..... | 14 |
| 1.3 CHEMICKÉ SLOŽENÍ BIOMASY | 15 |
| 1.4 VLASTNOSTI BIOMASY | 17 |
| 1.4.1 Hrubý rozbor paliva..... | 17 |
| 1.4.2 Vlhkost..... | 18 |
| 1.4.3 Výhřevnost a spalné teplo..... | 19 |
| 2 PROBLEMATIKA SPALOVÁNÍ BIOMASY | 20 |
| 2.1 Proces spalování | 20 |
| 2.1.1 Dokonalé spalování | 21 |
| 2.1.2 Nedokonalé spalování..... | 22 |
| 2.2 Stanovení objemu spalovacího vzduchu | 23 |
| 2.3 Stanovení objemu spalin | 23 |
| 2.4 Problémy při spalování..... | 25 |
| 2.4.1 Emise | 25 |
| 3 SKLÁDKOVÁNÍ A DEGRADACE | 28 |
| 3.1 Skládkování | 28 |
| 3.2 Degradace..... | 29 |
| 3.2.1 Vliv klimatických podmínek na degradaci | 30 |
| 4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST | 31 |
| 4.1 Popis měřicího zařízení | 31 |

| | |
|--|-----------|
| 4.1.1 Postup měření s kalorimetrem..... | 32 |
| 4.2 Průběh měření | 35 |
| 4.2.1 Odběr vzorků..... | 35 |
| 4.2.2 Vážení a vysoušení vzorků..... | 36 |
| 4.2.3 Tvorba pelet..... | 37 |
| 4.2.4 Spalování vzorků v kalorimetru | 37 |
| 4.3 Naměřená data | 38 |
| ZÁVĚR | 40 |
| SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ | 41 |
| SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK..... | 43 |
| SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK | 45 |

ÚVOD

Současným trendem společnosti je snaha omezit používání tradičních fosilních paliv, jako je ropa, zemní plyn a uhlí. Jedním z nejdůležitějších důvodů je ten, že fosilní zdroje paliv se snižují a v průběhu několika desítek až stovek let zcela vymizí. Další důvod je samozřejmě ekologické hledisko, neboť spalování fosilních paliv má negativní dopad na životní prostředí. Emise vznikající při spalování, zejména emise CO₂, přispívají ke změnám klimatu a také globálnímu oteplování, které je s tím spojené.

Řešení tohoto problému spočívá ve využívání obnovitelných zdrojů energie (OZE), což jsou zdroje, které se obnovují díky přírodním procesům nebo činnostem lidí. Mezi OZE patří zejména energie ze slunečního záření, větrná energie, vodní energie a s tím související energie z mořského přílivu a odlivu, geotermální energie a biomasa.

V rámci OZE má právě biomasa největší potenciál, který se dá využít na výrobu elektřiny, tepla a pohonných hmot v dopravě. Další výhodou využívání biomasy je nulová bilance emisí CO₂. To je dáno tím, že rostliny v průběhu svého života CO₂ spotřebovávají, ale během spalování jej vrací zase zpět, čímž vzniká rovnocenný koloběh.

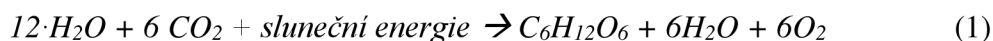
Nezbytnou součástí týkající se biomasy je problematika spalování a vhodného skládkování, což jsou témata, kterými se tato bakalářská práce zabývá. Pro vybrané druhy biomasy bude proveden experiment vyjadřující časovou závislost degradace biomasy vlivem skládkování a okolních podmínek.

1 BIOMASA

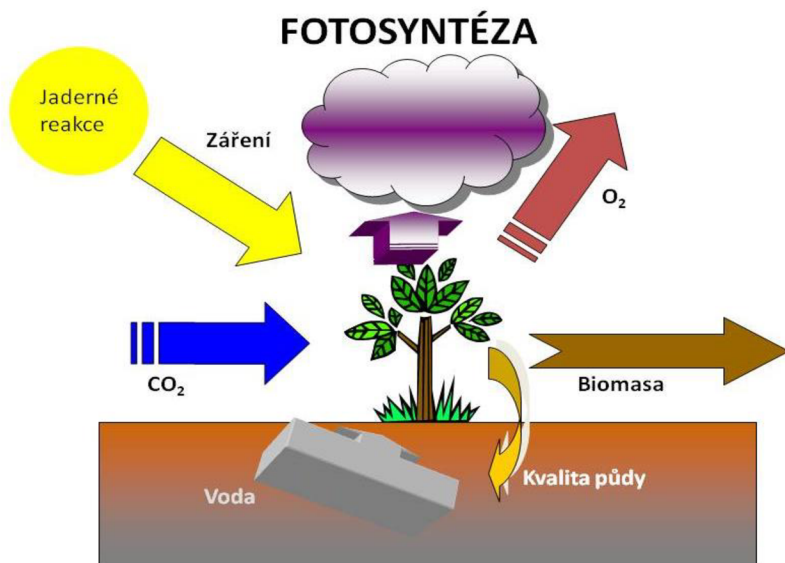
Pojmem biomasa můžeme označit jakýkoli biologicky rozložitelný materiál organického původu tvořený rostlinnou biomasou, živočišnou biomasou nebo organickým odpadem. Jedná se tedy o jakousi substanci, která zahrnuje živé organismy, odumřelé organismy a organické produkty látkové výměny. Na rozdíl od fosilních paliv¹, ve kterých se energie akumulovala před stovkami let, můžeme biomasu označit jako obnovitelný zdroj energie, neboť je schopna vzniknout v průběhu jednotek (sláma, rychle rostoucí dřeviny²) nebo desítek let [1, 2].

1.1 Vznik biomasy

Základem vzniku rostlinné biomasy je fotosyntéza. Tento proces probíhá pouze v rostlinách. Rostliny potřebují ke svému růstu vodu (H₂O) a oxid uhličitý (CO₂), který odebírají z atmosféry. Pomocí barviva chlorofylu a energie získané ze slunce redukuje vodu a oxid uhličitý na glukózu a řadu dalších organických sloučenin. Odpadním produktem fotosyntézy je kyslík. Z chemického hlediska můžeme průběh fotosyntézy vyjádřit dle rovnice (1) [2, 11].



Sluneční energie je ve skutečnosti uskladněná v chemických vazbách rostlin a při oxidaci³ sloučenin, které vznikly v průběhu fotosyntézy, lze tuto energii uvolnit a využít. Produktem spalování biomasy je oxid uhličitý. Do ovzduší se dostane jen takové množství, které bylo do rostliny akumulované v období jejího růstu. Díky tomu se říká, že spalování biomasy má tzv. nulovou bilanci CO₂. Fotosyntézu můžeme označit jako jeden z nejdůležitějších procesů na Zemi. Fotosyntetizující organismy vstřebají za rok cca 17,4 · 10¹⁰ tun uhlíku. Souběžně s tímto procesem se do atmosféry uvolní až 5 · 10¹⁰ tun kyslíku, čímž se udržuje optimální koncentrace vhodná pro život [1, 3].



Obr. 1.1: Schématické zobrazení fotosyntézy [19].

¹ Uhlí, ropa, zemní plyn

² Topol, vrba, bříza aj.

³ Oxidace – Spalování, z chemického hlediska se oxidací rozumí zvyšování oxidačního čísla, což má za následek ztrátu elektronů v atomu

1.2 Rozdělení biomasy

Biomasu můžeme dělit dle několika hledisek [1, 3].

1) Z hlediska původu ji dělíme:

a) rostlinná biomasa

- Dendromasa – dřevní biomasa
- Fytomasa – nedřevní biomasa
- Ovocná biomasa

b) živočišná biomasa – zoomasa

c) komunální a průmyslové odpady

2) Z hlediska energetického využití:

a) Biomasa záměrně pěstovaná

- Rychle rostoucí dřeviny (topol, vrba)
- Energetické rostliny s vysokým obsahem cukru (cukrová řepa, brambory, obilí) a bionafta (řepka olejka)

b) Biomasa odpadová

- Dřevo a dřevní odpad z lesního hospodářství (palivové dřevo, kůra, šišky, atd.) a dřevozpracující průmysl (odřezky, piliny),
- Rostlinný odpad z hospodářské výroby a z údržby krajiny (sláma, seno, ostatky z vinic a sadů),
- Odpady ze živočišné výroby (krmiva a exkrementy zvířat),
- Komunální organické odpady (kaly z odpadních vod, organický podíl z tuhých komunálních odpadů),
- Organický odpad z potravinářské výroby (odpad z konzerváren, lihovarů, mlékáren).

1.2.1 Dřevní biomasa – dendromasa

Mezi dřevní biomasu můžeme zařadit:

- Lesní dřevo (celé stromy, zbytky po těžbě, kulatina, kůra, polena)
- Dřevo získané ze dřevozpracujícího průmyslu, vedlejší produkty a zbytky (celulózový a papírový průmysl, tiskařský průmysl)
- Použité dřevo (chemicky ošetřené a chemicky neošetřené dřevo).

Dřevo je jedna z mála obnovitelných surovin produkovaná v lese. Les přitom můžeme označit za krátkodobě obnovitelný systém. Obnova lesa je porovnatelná s délkou lidského života. Rozlišujeme obnovu krátkodobou (méně než 30 let) a obnovu dlouhodobou (více než 30 let). Obecně se uvádí, že používání dřeva vede k poklesu skleníkového plynu CO₂ do ovzduší.

Při zpracování dřeva je vyloučený vznik odpadu, který by se nedal zpracovat. Mezi sekundární formy dřeva patří: štěpka, piliny, odřezky a zbytková kulatina. Tento materiál je využíván pro výrobu aglomerátů, ale zejména jako nosič energie. Při současném ekologickém stavu a omezenosti fosilních paliv se dřevní biomasa jeví jako velmi perspektivní výrobek [1].

Tab. 1: Výhřevnost vybraných druhů dřevní biomasy při 50 % vlhkosti [3].

| Dřevní biomasa | Výhřevnost [kJ·kg ⁻¹] |
|--|--------------------------------------|
| Dřevní štěpka | 10509 |
| Piliny | 10511 |
| Průmyslové odřezky vznikající při zpracování kulatiny. | 10500 |
| Zbytková kulatina | 10520 |

1.2.2 Fytomasa – bylinná biomasa

Pojmem fytomasa se chápou všechny organické látky rostlinného původu vznikající v průběhu fotosyntézy. Jedná se tedy o biomasu z rostlin, které nemají dřevnaté tělo. Mezi fytomasu lze zařadit:

- Zahradní a zemědělské byliny (luštěniny, obilniny, trávy, květiny, olejniny na semeno)
- Vedlejší produkty a zbytky (chemicky ošetřené a neošetřené zbytky)
- Směsi a příměsi

Mezi nejperspektivnější fytomasu patří sláma a to zejména obilná, řepková, slunečnicová a kukuřičná. Jedná se o tradiční obilninu, která se vyznačuje vysokou výhřevností až 16 MJ·kg⁻¹ při vlhkosti 10 %, nízkou cenou a zvládnutou agrotechnikou. Sláma se však nevyznačuje jen pozitivy ale také negativy, jako jsou investice do spalovacího zařízení a největším problémem je spékání⁴ popela [1, 2, 3].

1.2.3 Ovocná biomasa

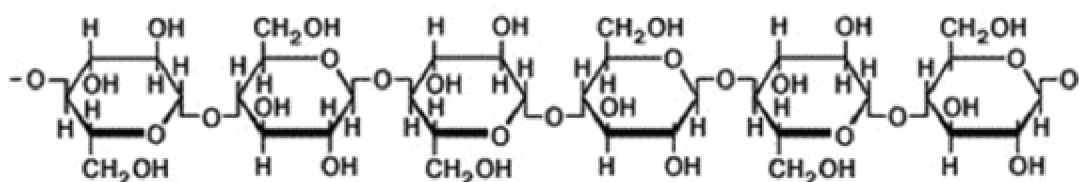
Zde je zahrnuta část rostlin obsahující semena. Jedná se o sadové a zahradnické plodiny (ořechy, jádroviny a bobule). Patří sem také zbytky a vedlejší produkty z průmyslu zpracovávající ovoce (rostlinné zbytky z lisování olejů, chemicky ošetřené a neošetřené ovocné zbytky) [3].

⁴Při spalování slámy dochází ke spékání popela a následné tvorbě nápeků. Spékání je způsobeno chemickým složením popela, které vytváří nízko tající eutektika. Vznik nápeků způsobuje velké provozní komplikace [15].

1.3 CHEMICKÉ SLOŽENÍ BIOMASY

Rostlinná biomasa je heterogenní materiál skládající se z řady různých sloučenin, které mají podobnou, nebo velmi rozdílnou chemickou strukturu. Látky obsažené v rostlinné biomase můžeme rozdělit do dvou základních skupin na složky hlavní a doprovodné. Mezi hlavní složky patří celulóza, hemicelulóza a lignin. Do doprovodných složek patří oleje, pryskyřice, škrob, anorganické sloučeniny a organické monomery [7, 9].

Celulóza je nejvýznamnější složka, která je přítomna ve všech druzích biomasy, neboť tvoří kostru všech rostlinných buněk. Z chemického hlediska se jedná o řetězce navzájem spojených molekul glukózy. Obsah celulózy v jehličnanech je v rozmezí 48 až 56 % a v listnatých dřevinách v intervale 46 až 48 %. Jak můžeme vidět z obrázku 1.3, na každý atom uhlíku připadá jeden atom kyslíku, což má za následek, že výhřevnost suché celulózy je přibližně 18 MJ/kg. Z výše uvedeného procentuálního zastoupení celulózy můžeme konstatovat, že výhřevnost jehličnanů je přibližně o 5 % vyšší než u listnatých stromů [5, 7].



Obr. 1.3: Schématické zobrazení řetězce glukózy [12].

Hemicelulóza je řada složitých polysacharidů, které společně s ligninem a celulózou tvoří stěny buněk a umožňují vytvářet pevné struktury. Velikost molekul hemicelulózy je mnohem menší než u celulózy, a díky své struktuře se dají poměrně snadno rozložit na jednoduché sacharidy, ze kterých se získává kvašením etanol. K rozkladu se nejčastěji používají některé enzymy a kyseliny. Obsah hemicelulózy v jehličnatých dřevinách je cca 23 až 26 % a u listnatých dřevin se pohybuje v rozmezí 26 až 35 % [1, 5, 7].

Lignin můžeme charakterizovat jako směs polymerů. Není tvořen sacharidy, jak tomu bylo u celulózy, ale převládající zastoupení mají aromatické alkoholy. Množství ligninu stárnutím dřeviny narůstá a jeho hlavní funkcí je buněčné zpevnění stěn. Díky přítomnosti aromatických alkoholů má nepatrně větší výhřevnost než celulóza. Při pyrolýze⁵ dřeva se z něj uvolňují aromatické látky, jako je např. syringol, který je s největší pravděpodobností zodpovědný za specifickou vůni uzeného masa [1, 5, 7].

Tab. 2: Obsah jednotlivých složek ve dřevě a slámě v % [6].

| | Celulóza | Hemicelulóza | Lignin |
|--------------|----------|--------------|--------|
| Měkké dřevo | 45 | 25 | 30 |
| Tvrdé dřevo | 42 | 38 | 20 |
| Stébla slámy | 40 | 45 | 15 |

⁵ Tepelný rozklad biomasy při teplotách cca 500 až 800 °C bez přístupu kyslíčového vzduchu [2]

Oleje jsou sloučeniny plnicí v rostlinné biomase funkci energetického zdroje. Nacházíme je převážně v semenech, kde dodávají výživu a energii klíčící rostlině. Jsou složeny převážně z mastných kyselin, jako je kyselina palmitová, olejová a trojsytného alkoholu glycerinu. Z energetického hlediska spočívá význam olejů v jejich vysoké výhřevnosti až 37 MJ/kg, tzn. téměř 90 % výhřevnosti motorové nafty. Jsou kapalné, a proto je zde velký potenciál v jejich využití jako palivo pro automobily [1, 6].

Pryskyřice je tvořena směsí uhlovodíků (terpenů), která je obsažena ve dřevě jehličnatých stromů. Z důvodu toho, že uhlovodíky mají větší výhřevnost než celulóza, mají jehličnany obsahující pryskyřici větší výhřevnost než listnaté stromy [6].

Tab. 3: Chemické složení biomasy a vybraných druhů fosilních paliv [1].

| Palivo | Složky paliva v suché hmotě [%] | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------------|----------------|----------------|----------------|-------|-----------------|
| | C | H ₂ | O ₂ | N ₂ | S | Cl ₂ |
| Smrkové dřevo s kůrou | 49,8 | 6,3 | 43,2 | 0,13 | 0,015 | 0,005 |
| Bukové dřevo s kůrou | 47,9 | 6,2 | 45,2 | 0,22 | 0,015 | 0,006 |
| Topolové dřevo- krátké výhonky | 47,5 | 6,2 | 44,1 | 0,42 | 0,031 | 0,004 |
| Vrbové dřevo-krátké výhonky | 47,1 | 6,1 | 44,3 | 0,54 | 0,045 | 0,004 |
| Kůra z jehličnatého dřeva | 51,4 | 5,7 | 38,7 | 0,48 | 0,085 | 0,019 |
| Žitná sláma | 46,6 | 6,0 | 42,1 | 0,55 | 0,085 | 0,400 |
| Pšeničná sláma | 45,6 | 5,8 | 42,4 | 0,48 | 0,082 | 0,190 |
| Tritikále ⁶ sláma | 43,9 | 5,9 | 43,8 | 0,42 | 0,056 | 0,270 |
| Ječmenná sláma | 47,5 | 5,8 | 41,4 | 0,46 | 0,089 | 0,400 |
| Řepková sláma | 47,1 | 5,9 | 40,0 | 0,84 | 0,270 | 0,470 |
| Pšeničné zrno se slámou | 45,2 | 6,4 | 42,9 | 1,41 | 0,120 | 0,090 |
| Tritikále zrno se slámou | 44,0 | 6,0 | 44,6 | 1,08 | 0,180 | 0,140 |
| Zrno pšenice | 43,6 | 6,5 | 44,9 | 2,28 | 0,120 | 0,040 |
| Zrno tritikále | 43,5 | 6,4 | 46,4 | 1,68 | 0,110 | 0,070 |
| Řepkové zrno | 60,5 | 7,2 | 23,8 | 3,94 | 0,100 | 0,000 |
| Ozdobnice čínská | 47,5 | 6,2 | 41,7 | 0,73 | 0,150 | 0,220 |
| Hospodářské seno | 45,5 | 6,1 | 41,5 | 1,14 | 0,160 | 0,020 |
| Tráva z pastvin | 46,1 | 5,6 | 38,1 | 1,34 | 0,140 | 1,390 |
| Černé uhlí | 72,5 | 5,6 | 11,1 | 1,30 | 0,940 | < 0,1 |
| Hnědé uhlí | 65,9 | 4,9 | 23,0 | 0,70 | 0,390 | < 0,1 |

⁶ Obilnina vzniklá hybridizací pšenice a žita, český název je žitovec [10]

1.4 VLASTNOSTI BIOMASY

Tak jako každé palivo i biomasu můžeme charakterizovat řadou specifických parametrů. Mezi základní vlastnosti řadíme hrubý rozbor paliva (obsah vody, hořlaviny, popeloviny), vlhkost, spalné teplo (Q_s), výhřevnost (Q_i) a prvkové složení [1, 2].

1.4.1 Hrubý rozbor paliva

Tuhá paliva jsou složena z hořlaviny (h), obsahu vody (w) a popeloviny (A). Následující definice lze vyjádřit vztahem (2).

$$h + A + w = 1 \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (2)$$

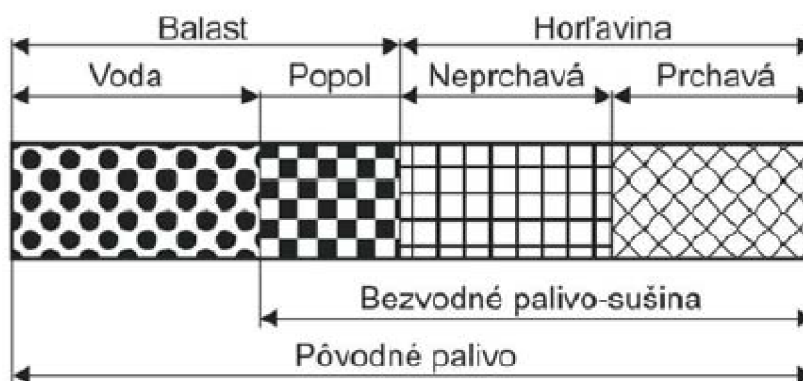
Hořlavina je chemicky vázaná energie v palivě. Tuto energii lze uvolnit oxidací tzn. spalováním. Hořlavina se skládá z prchavé a neprchavé složky. Jednotlivé procentuální zastoupení složek se stanoví koksovací zkouškou, která probíhá při 850 °C za nepřítomnosti kyslíku. Prchavá složka hořlaviny má výrazný vliv na proces spalování a tvorbu plamenu. Podíl prchavé hořlaviny závisí na geologickém stáří paliva. Čím je palivo starší, tím větší je podíl prchavé složky [1, 2].

Balast biomasy je složen z popela (A) a vody (w). Jedná se o nežádoucí složku, neboť s růstem balastu nám klesá výhřevnost paliva a snižuje se tedy i jeho cena [1].

Popel vzniká v důsledku chemických reakcí minerálních látek obsažených v biomase s kyslíkem. Jedná se o tuhou část, která vzniká po dokonalém spálení paliva. Z chemického hlediska je tvořen zejména směsí oxidů anorganických prvků, jako jsou K_2O , Na_2O , CaO , MgO , Fe_2O_3 a Al_2O_3 . Proces spalování výrazně ovlivňuje množství vzniklého popela, typ paliva a druh spalovacího procesu. Popeloviny v procesu spalování paliva tvoří tuhou část – popel, který může být v různých modifikacích: troska, škvára, popel a popílek. Obsah popela v palivě se vyjadřuje dle vztahu (3) [2, 3].

$$A = \frac{m_p}{m_d} [-], \quad (3)$$

kde m_p je hmotnost popela [g] a m_d je hmotnost absolutně suchého vzorku paliva [g].



Obr 1.4.1: Schématické zobrazení paliva [1].

1.4.2 Vlhkost

Obsah vody v palivu je jedním z nejdůležitějších parametrů jak pro kvalitu spalovacího procesu, tak pro dopravní charakteristiky paliva, neboť u biomasy s jemnou strukturou dochází k tvorbě splených shluků, které znemožňují plynulé dávkování paliva. Obsah vody v biomase výrazně ovlivňuje energetické vlastnosti paliva, a proto je nutné nechat biomasu před samotným spalováním alespoň částečně vyschnout. Za optimální vlhkost se považuje hodnota do 20 %, které lze dosáhnout sušením pod krytou skládkou. Vlhkosti menší než 10 % je vyžadováno u lisování briket nebo peletek, a k tomu je zapotřebí zvýšené teploty a dodání určitého množství energie [1, 2, 6].

Rozlišujeme dva typy vlhkosti a to absolutní vlhkost a relativní vlhkost. Absolutní vlhkost je založena na základě energetického vyjádření obsahu vody a používá se v dřevozpracujícím průmyslu. Absolutní vlhkost lze vyjádřit vztahem (4) [1, 2]

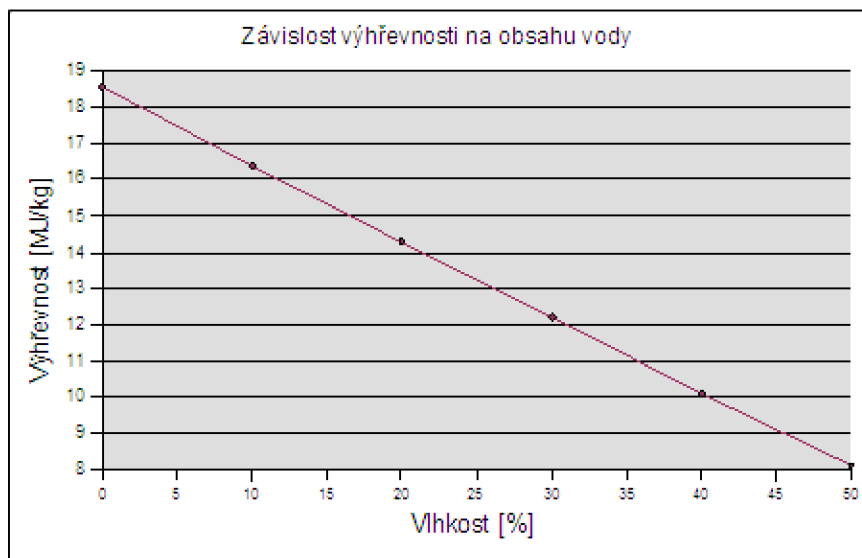
$$w_{dr} = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \cdot 100 = \frac{\Delta m}{\Delta m_2} \cdot 100 \quad [\%], \quad (4)$$

kde m_1 je hmotnost vzorku surové dřevní hmoty v [kg], m_2 je hmotnost vzorku po vysušení v [kg], Δm je úbytek hmotnosti vzorku vlivem vysušení v [kg].

V energetice se však vlhkost vyjadřuje na základě relativní vlhkosti, která je dána vztahem (5)

$$w^r = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100 = \frac{\Delta m}{m_1} \cdot 100 \quad [\%], \quad (5)$$

Pro přepočítání z absolutní vlhkosti na relativní vlhkost platí: $w^r = \frac{w_{dr}}{100 - w_{dr}} \quad [\%]. \quad (6)$



Obr. 1.4.2: Závislost výhřevnosti na obsahu vody [6].

1.4.3 Výhřevnost a spalné teplo

Z energetického hlediska se jedná o dvě nejdůležitější vlastnosti vůbec, které jsou úzce spjaty s obsahem vody v palivu. Závislost výhřevnosti na obsahu vody můžeme vidět na obr. 1.4.2. Cílem je vždy dosáhnout co nejmenšího obsahu vody, protože absolutně suchý vzorek má nejvyšší výhřevnost, která se pohybuje kolem $19 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Kdežto vzorek s relativní vlhkostí 50 % má poloviční výhřevnost. Proto je značně nevýhodné spalovat dřevní štěpku s obsahem vlhkosti 50 %, neboť se využije jen polovina energie, která je v palivu uskladněna [1, 3].

V poslední době se biomasa před samotným spalováním uměle dosušuje. Jako příklad bych uvedl rakouskou bioplynovou stanici, která využívá přebytečného tepla získaného z kogenerace právě k sušení dřevní štěpky. Vlhký materiál je navezen do přístřešku, v jehož podlaze jsou rošty pro přívod vzduchu. Je zde nainstalován ventilátor, který protlačuje teplý vzduch skrz vlhkou štěpku. Teplého vzduchu je docíleno ohřevem ve výměníku voda – vzduch odpadním teplem kogeneračních jednotek [8, 9].

Spalné teplo se značí Q_s [$\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$] a jedná se o teplo, které je uvolněné v průběhu dokonalého spálení jednotkového množství paliva s následným ochlazením produktů spalování na $20 \text{ }^\circ\text{C}$, přičemž vodní pára ze spalin zkondenzuje [1].

Výhřevnost Q_i [$\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$] je množství tepla uvolněné dokonalým spálením jednotkového množství paliva s následným ochlazením produktů spalování na $20 \text{ }^\circ\text{C}$, přičemž se předpokládá, že vodní pára ve spalinách kondenzovat nebude. Výhřevnost se potom vypočítá ze spalného tepla odečtením výparného tepla vody Q_v , kde voda uvolněná spalováním je součtem vody obsažené v palivě (vlhkosti) a vody vzniklé spálením paliva, která odpovídá obsahu vodíku v palivě. Výpočet výhřevnosti se určí ze vztahu (7) [1, 3].

$$Q_i = Q_s - 2,453 \cdot (w + 9 \cdot H_2) \quad [\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}], \quad (7)$$

Kde Q_i je výhřevnost v [$\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$], Q_s je spalné teplo v [$\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$], w je relativní vlhkost paliva v [$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$] a H_2 je obsah vodíku v palivě [$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$].

Tab. 4: Výhřevnost vybraných druhů dřeva v závislosti na vlhkosti [3].

| Dřevo | Výhřevnost dřeva při dané vlhkosti [$\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$] | | |
|--------------|--|------|------|
| | 0 % | 15 % | 60 % |
| Smrk | 17,9 | 13,4 | - |
| Borovice | 18,7 | 14,5 | 10,6 |
| Bříza | 19,9 | 15,8 | - |
| Dub | 17,0 | 14,5 | - |
| Buk | 17,6 | 15,4 | - |
| Borka (kůra) | - | 19,0 | 10,5 |

2 PROBLEMATIKA SPALOVÁNÍ BIOMASY

Nejběžnějším a pravděpodobně nejstarším způsobem energetického využití biomasy je technologie přímého spalování a to z několika důvodů: nízká cena, vysoká spolehlivost a snadná manipulace. Spalování lze charakterizovat jako okysličování paliva až na konečné produkty reakce. Zahrnuje celou řadu fyzikálně chemických pochodů, při kterých dochází k uvolňování tepla a vedlejších produktů spalování (spaliny a popeloviny) [1, 4].

Mezi vstupní látky spalovacího procesu patří palivo a okysličovadlo. **Palivem** můžeme obecně označit jakoukoliv hořlavou látku s dostatečně vysokou výhřevností a aktivní schopností účastnit se okysličovacích pochodů. **Okysličovadlo** je látka obsahující kyslík. Nejběžnějším a nejsnáze získatelným okysličovadlem v praxi je vzduch [4].

2.1 Proces spalování

Samotný proces spalování biomasy se skládá z těchto pochodů:

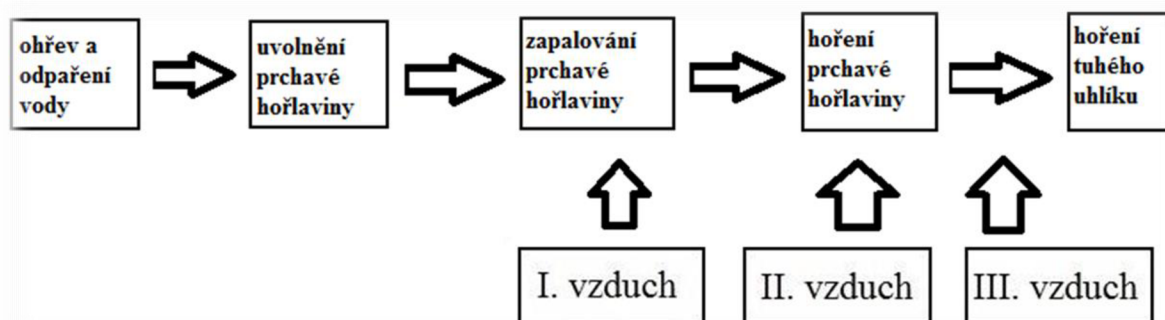
- Ohřev částice
- Odpaření vlhkosti
- Uvolnění prchavé hořlaviny
- Hoření prchavé hořlaviny
- Hoření uhlík

Hlavní úlohu při hoření biomasy má hoření uhlíku, protože uhlík je hlavní součástí pevného paliva a zaujímá v něm majoritní podíl. Uhlík významně ovlivňuje výhřevnost paliva. S rostoucím obsahem uhlíku roste výrazně výhřevnost. Největší výhřevnost z tuhých paliv zaujímá antracit⁷, jehož podíl uhlíku překračuje více než 90 % hmoty. U palivového dřeva se pohybuje podíl uhlíku kolem 50 %, a proto má dřevo výrazně menší výhřevnost než antracit [3, 4, 5].

Celý průběh spalování začíná ohřevem. Při dosažení teploty 100 a více °C dochází k odpařování vody z biomasy. Toto odpaření spotřebuje mnoho tepla a velmi efektivně dřevo chladí. Po odpaření vody a zahřátí na 200 °C dochází k uvolňování hořlaviny, ale samotné hoření prchavé složky začíná až při 400 – 500 °C. Hořlavina se skládá z tuhého uhlíku a z prchavé hořlaviny, která je směsí toxických látek (dusíkatých a uhlovodíkových) a organické látky. Jeden z největších problémů spalování je neúplné spálení prchavé hořlaviny. Tyto prchavé organické látky kondenzují na prachových částicích a spolu s nimi vytvářejí toxické saze, které jsou ze zdravotního hlediska velmi nebezpečné, neboť se usazují v plicích. Proto je velmi důležité pro proces spalování zajištění úplného spálení prchavé hořlaviny. To se provádí dostatečně vysokou teplotou, dostatečným časem pro průběh spalovacích reakcí a dobrým míšením okysličovadla s hořlavými plyny. Nezbytnou součástí dokonalého spálení hořlavých částic je přísun vzduchu. Dodávání vzduchu probíhá ve dvou až

⁷ Druh černého uhlí vyznačující se nejnižším obsahem těkavých hořlavých látek

třech fázích. Primární vzduch je vháněn při zapalování prchavé hořlaviny a tvoří zhruba 60 – 70 % přivedeného vzduchu. Při hoření prchavé složky se spotřebovává velké množství kyslíku, a proto je nutné přivádět tzv. sekundární vzduch, který zajistí úplné spálení prchavé hořlaviny a ostatních plynů (CO, H₂, C_xH_y). U velkých kotlů, kde plamen dosahuje výšku několik metrů, se vhání tzv. terciární vzduch, který zajistí dohoření plynů, které nebyly spáleny v sekundárním spalování. Schématické znázornění spalování můžeme vidět na obr. 2.1 [4, 5, 7].



Obr. 2.1: Schéma průběhu spalování [5].

2.1.1 Dokonalé spalování

Při dokonalém spalování paliv dochází k exotermickým reakcím, což jsou reakce, kde dochází k uvolňování tepla. V procesu spalování biomasy dochází ke třem základním reakcím. Oxidace uhlíku na oxid uhličitý, oxidace vodíku na vodní páru a oxidace síry na oxid siřičitý. Pro tyto chemické reakce platí následující stechiometrické vztahy [4].

- *Oxidace uhlíku na oxid uhličitý*



$$12,01 \text{ kg } C + 32 \text{ kg } O_2 = 44,01 \text{ kg } CO_2 + 406 \text{ 300 kJ} \quad (9)$$

$$1 \text{ kg } C + \frac{22,39}{12,01} \text{ m}^3 O_2 = \frac{22,26}{12,01} \text{ m}^3 CO_2 + 33 \text{ 830 kJ} \quad (10)$$

$$1 \text{ kg } C + 1,8643 \text{ m}^3 O_2 = 1,8534 \text{ m}^3 CO_2 + 33 \text{ 830 kJ} \quad (11)$$

Z výše uvedených rovnic vyplývá, že pro spálení 1 kg C je nutno dodat 1,864 m³ O₂ a vznikne 1,853 m³ CO₂ a uvolní se 33 830 kJ tepla.

- *Oxidace vodíku na vodní páru*



$$4,032 \text{ kg } H_2 + 32 \text{ kg } O_2 = 2 \cdot 18,015 \text{ kg } H_2O + 482 \text{ 300 kJ} \quad (13)$$

$$1 \text{ kg } H_2 + \frac{22,39}{4,032} \text{ m}^3 O_2 = \frac{44,80}{4,032} \text{ m}^3 H_2O + 119 \text{ 600 kJ} \quad (14)$$

$$1 \text{ kg } H_2 + 5,5530 \text{ m}^3 O_2 = 11,1111 \text{ m}^3 H_2O + 119 \text{ 600 kJ} \quad (15)$$

- *Oxidace síry na oxid siřičitý*



$$32,06 \text{ kg } S + 32 \text{ kg } O_2 = 64,06 \text{ kg } SO_2 + 29 \text{ 660 kJ} \quad (17)$$

$$1 \text{ kg } S + \frac{22,39}{32,06} \text{ m}^3 O_2 = \frac{21,89}{32,06} \text{ m}^3 SO_2 + 925 \text{ kJ} \quad (18)$$

$$1 \text{ kg } S + 0,6984 \text{ m}^3 O_2 = 0,6828 \text{ m}^3 SO_2 + 925 \text{ kJ} \quad (19)$$

Jak jsem zmínil výše, nejdůležitější je hoření uhlíku, neboť zaujímá hlavní postavení. Obsah vodíku v biomase se pohybuje okolo 4–6 % a obsah síry je téměř zanedbatelný, protože procentuální obsah nepřevyšuje 0,3 % [4].

2.1.2 Nedokonalé spalování

Nedokonalé spalování se od dokonalého liší tím, že nedochází k úplné oxidaci paliva a spaliny, které odcházejí ze spalovacího prostoru, obsahují hořlavé částice. Mezi primární produkt nedokonalého spalování patří oxid uhelnatý. Dalším produktem nedokonalého spalování může být nedopalek prchavé hořlaviny či plyny na bázi C_xH_y a vodík [3, 4].

Nedokonalé spalování lze vyjádřit dle následujících stechiometrických vztahů



$$12,01 \text{ kg } C + 0,5 \cdot 32 \text{ kg } O_2 = 28,01 \text{ kg } CO + 151 \text{ 410 kJ} \quad (21)$$

$$1 \text{ kg } C + 0,5 \cdot \frac{22,39}{12,01} \text{ m}^3 O_2 = \frac{22,38}{12,01} \text{ m}^3 CO + 12 \text{ 607 kJ} \quad (22)$$

$$1 \text{ kg } C + 0,9321 \text{ m}^3 O_2 = 1,8634 \text{ m}^3 CO + 12 \text{ 607 kJ} \quad (23)$$

Při srovnání vztahů pro dokonalé a nedokonalé spalování zjistíme, že při nedokonalém spalování se spotřebuje o polovinu méně kyslíku než u dokonalého a uvolní se přibližně o 1/3 méně tepla. Z rovnice (23) vidíme, že vzniká i velké množství oxidu uhelnatého, který je jedovatý, a proto je nedokonalé spalování nežádoucí [4].

2.2 Stanovení objemu spalovacího vzduchu

Oxidace hořlavých složek paliva probíhá nejčastěji kyslíkem získaným z atmosférického vzduchu. Tento vzduch je nutné přivádět do spalovacího procesu v takovém množství, aby spalování bylo dokonalé, tzn., že všechen přivedený kyslík se spotřebuje v průběhu spalování. Potřebné množství spalovacího vzduchu lze vypočítat dvěma způsoby. Přesný výpočet vychází z chemického složení paliva, kdežto přibližný se dá určit z výhřevnosti spalovaného paliva. V praxi se používá výpočet dle výhřevnosti spalovaného paliva [2].

Vztah popisující výpočet teoretické (minimální) hodnoty suchého spalovaného vzduchu při dokonalém spálení 1 kg paliva je:

$$V_{VZS} = \frac{22,04}{0,21} \cdot \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32} \right) \quad [\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}], \quad (24)$$

kde C (uhlík), H (vodík), S (síra), O (kyslík) vyjadřuje poměrné množství jednotlivých prvků ve spalovaném palivu ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$).

V případě, že neznáme zastoupení jednotlivých prvků v palivu, používáme empiricky stanovený vztah, který je dán rovnicí:

$$V_{VZS} = Q_i^f \cdot 0,245 + 0,5 \quad [\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}], \quad (25)$$

kde Q_i^f je výhřevnost spalovaného paliva v $[\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$.

2.3 Stanovení objemu spalin

Plynné produkty vznikající v průběhu spalování se nazývají spaliny. Složení spalin závisí především na druhu paliva a na množství spalovaného vzduchu. Stanovení minimálního objemu spalin se provádí podobně jako u stanovení spalovaného vzduchu. Minimální (teoretický) objem suchých spalin, které vzniknou v průběhu dokonalého spálení 1 kg paliva lze vypočítat jako součet objemů jednotlivých složek spalin [2].

$$V_{spmin}^S = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{Ar} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (26)$$

Přičemž se předpokládá, že tyto spaliny jsou složeny z:

- oxidu uhličitého z uhlíku hořlaviny a ze spalovaného vzduchu,

$$V_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot C + \frac{1}{100} \cdot 0,03 \cdot V_{VZS} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (27)$$

- oxidu siřičitého vzniklého ze síry v hořlavině paliva,

$$V_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot S \quad [\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (28)$$

- dusíku z hořlaviny a ze suchého spalovaného vzduchu,

$$V_{N_2} = \frac{22,40}{28,013} \cdot N_2 + \frac{1}{100} \cdot 78,05 \cdot V_{VZS} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (29)$$

- argonu vzniklého ze spalovacího procesu,

$$V_{Ar} = \frac{1}{100} \cdot 0,92 \cdot V_{VZS} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (30)$$

Spaliny obsahují kromě výše zmíněných složek také vodu ve formě vodní páry. Tato vodní pára vznikla z hořlaviny vodíku, z vody obsažené v palivu a z vlhkosti spalovaného vzduchu. Objem vodní páry se vypočítá dle vztahu:

$$V_{H_2O} = \frac{44,81}{4,032} \cdot H_2 + \frac{22,41}{18,015} \cdot w^r + (f - 1) \cdot V_{VZS} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (31)$$

kde C , S , N_2 , H_2 vyjadřují poměrné množství uhlíku, síry, dusíku a vodíku v surovém palivu, w^r [-] představuje relativní vlhkost paliva (viz vztah 5) a f je koeficient nabývající hodnot 1,01 až 1,05 [2, 4].

Potom minimální (teoretický) objem vlhkých spalin je dán součtem minimálního (teoretického) objemu suchých spalin a objemu vodní páry obsažené ve spalinách

$$V_{spmin} = V_{spmin}^s + V_{H_2O} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (32)$$

Při výpočtu vzniklých spalin vystupuje mnoho dalších sloučenin, jejichž obsah je tak malý, že se považuje za zanedbatelný, a proto se ve výpočtu neuvažuje. V rovnicích uvedených výše probíhá spalování bez přebytku vzduchu, objemové složení vzduchu⁸ je znázorněno v tab. 5. Pokud je součinitel přebytku vzduchu $\alpha = 1$, tak spalování můžeme označit jako stechiometrické [2,4].

Tab. 5: Objemové složení atmosférického vzduchu [13].

| plyn | Objem % |
|---------------|---------|
| dusík | 78,09 |
| kyslík | 20,95 |
| argon | 0,93 |
| Oxid uhličitý | 0,033 |

⁸Neon, helium, metan, krypton, vodík, xenon jsou další prvky obsažené v atmosférickém vzduchu, jejichž množství je ale tak malé, že se neuvádí [13]

2.4 Problémy při spalování

V současné době je snahou omezit spalování fosilních paliv, která v průběhu spalování produkují skleníkový plyn oxid uhličitý (CO_2). Ten společně s dalšími skleníkovými plyny (metan, freony, oxid dusný) brání vyzařování tepla zpět do vesmíru, což má za následek současné globální oteplování. Řada států omezuje používání fosilních paliv a snaží se je nahradit tzv. zelenou energií. Jednou z možných variant náhrady fosilních paliv je právě energie z biomasy, jejíž využití má vysoký potenciál [3, 7].

2.4.1 Emise

Spalování biomasy, pokud je náhradou za fosilní paliva, přispívá ke snižování produkce skleníkových plynů. Je důležité zmínit, že ne vždy vede spalování biomasy ke snížení produkovaných škodlivých látek. Množství znečišťujících látek je dáno především složením paliva, způsobem přivádění paliva, typem spalovacího zařízení, nastavením spalovacího procesu a množstvím dodávaného okysličovačla. Mezi hlavní složky znečišťující ovzduší patří [3, 7]

- oxidy uhlíku (CO a CO_2),
- TZL⁹,
- chlorovodík (HCl),
- (PCDD/F)¹⁰, PAU¹¹,
- oxid siřičitý (SO_2),
- oxidy dusíku (NO_x).

Oxid uhelnatý se uvolňuje vlivem nedokonalého spalování z důvodu nedostatečného množství přísunu spalovaného vzduchu a nízké spalovací teploty. Společně s oxidem uhelnatým se tvoří i vyšší uhlovodíky a dehty. Množství CO se blíží téměř k nule, pokud jsou dodržena stanoviska uvedená výše [1, 3].

Spalováním biomasy samozřejmě také vzniká CO_2 , ale ten svým obsahem skleníkovému efektu nepřispívá, neboť její rostlina v průběhu svého růstu (fotosyntéza) odebírá. Proto říkáme, že spalování biomasy má z hlediska emisí nulovou bilanci CO_2 . Toto stanovisko se však musí brát s nadhledem, protože stromy rostou desítky let a dřevo z nich se spálí téměř okamžitě [3, 8].

Oxid siřičitý se dostává do spalín v průběhu oxidace síry v palivu. Množství síry ve fytopalivech je menší než 0,3 %_{hm}, a proto emise oxidu siřičitého u spalování jsou zanedbatelné [3].

⁹ tuhé znečišťující látky

¹⁰ polychlorované dibenzodioxiny a dibenzofurany

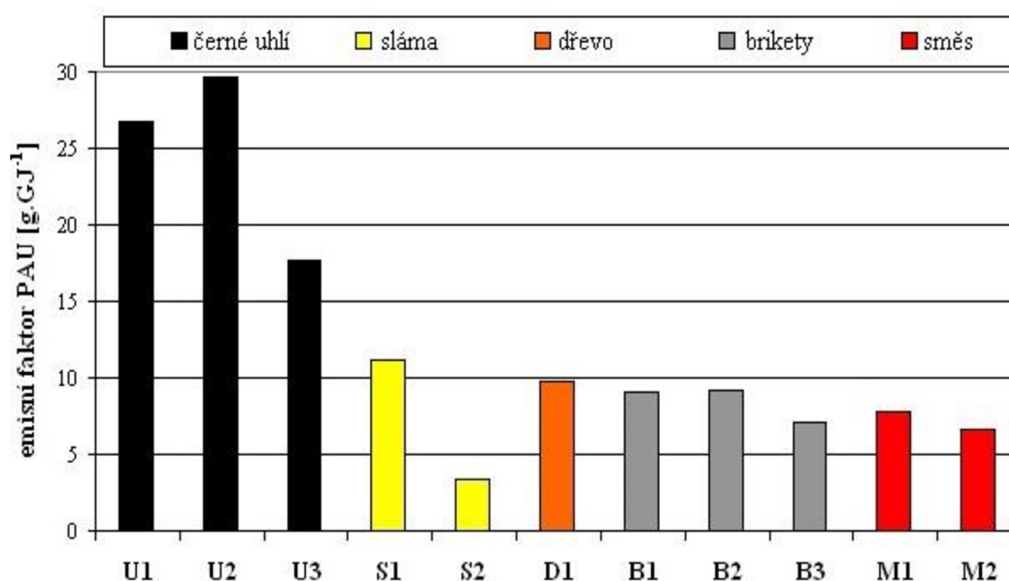
¹¹ polyaromatické uhlovodíky

Při správném spalování dosahují emise oxidů dusíku přibližně polovinu emisních limitů. Tyto limity se však můžou zvýšit, neboť velmi záleží na nastavení spalovacího procesu. Čím vyšší je teplota spalování a koeficient α^{12} , tím jsou emise CO sice menší, ale emise typu NO_x vyšší. Obsah dusíku, který je vázán ve dřevě se pohybuje přibližně kolem 0,5 – 1 %_{hm}, a proto emise NO_x při správném způsobu spalování nezpůsobují žádné větší problémy [1, 3].

Tvorba emisí ve formě TZL závisí především na spalovacím procesu. K eliminaci TZL je zapotřebí dostatečný přívod okysličovadla, vysoká teplota spalování, homogenizace spalin a dokonalé spálení prchavé hořlaviny. Ke snížení TZL unikajících do ovzduší se u uzavřených spalovacích zařízení používají filtry a vložky. Při otevřeném spalování je velkým problémem popílek unikající do ovzduší [3].

Při používání cíleně pěstovaných energetických rostlin, u kterých dochází k hnojení průmyslovými hnojivy obsahující chlór, se ve spalinách těchto rostlin můžou objevovat emise chlorovodíku. Emise HCL při spalování dřeva jsou však velmi nízké na rozdíl od rostlinné biomasy. Jako příklad bych uvedl spalování štěpky tvořenou jehličnany, při které vzniká přibližně 0,9 mg·m⁻³ chlorovodíku. Obsah HCL však závisí na množství kůry, ve které je nejvíce koncentrován [3, 14].

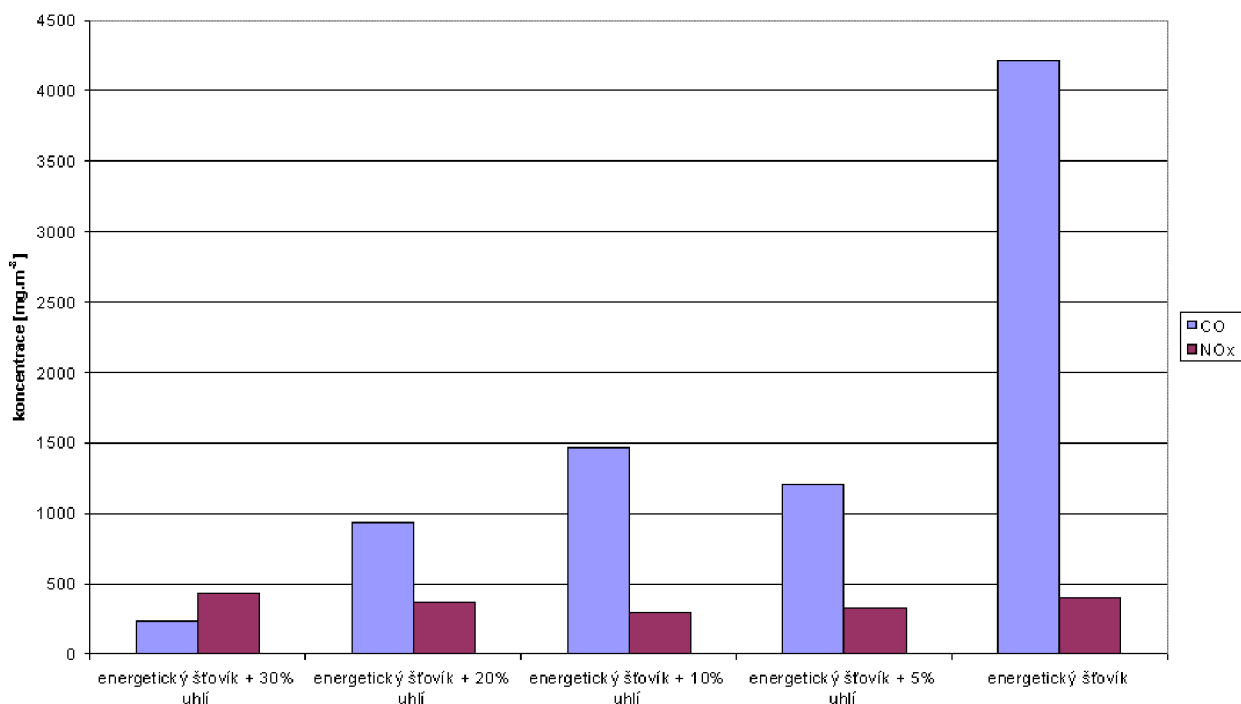
Emise typu PCDD/F a PAU mají nejnebezpečnější účinek na zdraví člověka. Jedná se o karcinogenní látky způsobující cévní a srdeční choroby a mají také velký vliv na celkové snížení imunity. Tyto emise jsou závislé na technologii spalování. Ve velkých kotelnách, které disponují automatickým dodáváním paliva a kde je spalování řízeno kyslíkovou lambda sondou, byly emise zjištěny v rozsahu 0,01 – 0,18 ng TEQ¹³ na m³. Oproti tomu v kotelnách s výkonem menším než 100 kW, které nejsou opatřeny lambda sondou, byly změřeny emise v rozsahu 0,8 – 5,7 ng TEQ na m³. Přičemž povolený denní příjem látek PCDD/F na člověka je 1 – 4 pg TEQ/kg tělesné váhy. Obr. 2.4.1 ukazuje emise PAU jednotlivých paliv [3, 14].



Obr. 2.4.1: Emise PAU u kotlů malých výkonů [14].

¹²součinitel přebytku vzduchu

¹³Toxic equivalent



Obr. 2.4.2: Vliv aditiva hnědého uhlí v topných peletách z energetického šťovíku na emise CO a NOx při spalování [16].

Z obrázku 2.4.2 lze vidět pozitivní přínos kombinace fosilního paliva a fytohmoty na jejich užité vlastnosti. Nejvýrazněji se tento vliv projevuje na snížení emisí CO. Při spalování čistého šťovíku vzniká více než $4000 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ oxidu uhelnatého. Přidáním 5 % uhlí se tyto emise sníží na třetinu. Zvyšováním množství uhlí emise CO stále klesají a při 30 % uhlí jsou téměř 18 krát nižší. Dalším přínosem je samozřejmě zvyšování výhřevnosti. Přidání uhlí však způsobí zvýšení obsahu popela v palivu [16].

3 SKLÁDKOVÁNÍ A DEGRADACE

3.1 Skládkování

Skládkování je nutnou operací při energetickém využívání biomasy. Hlavním cílem skládkování je udržet biomasu v co nejsušším stavu na vhodném místě, odkud bude přepravována pro další účely. Díky nízké objemové hmotnosti dřevní štěpky se jedná o velké objemy tohoto materiálu, a proto se používají pro skládkování prostornější sklady, velkoobjemová sila a haly. Čerstvě zpracovaná štěpka se vyznačuje vyšším obsahem vody a při nesprávném způsobu skládkování je nutno počítat i s absorpcí¹⁴ vzdušné vlhkosti. Pokud není štěpka dostatečně vysušena, může podléhat přirozené biodegradaci, je náchylná k plesnivění a může docházet k zapařování. S tím souvisí ztráta energetické hodnoty a vznik plísní může ohrozit zdravotní stav pracovníků, kteří s biomasou přicházejí do styku [1, 17].

V uzavřených místnostech, kde není dostatečné provětrávání, by mohlo dojít dokonce k samovznícení, podrobněji vysvětleno v kapitole 3.2. Proto nezbytností každého skladovacího prostoru je dobrá ventilace pro předcházení kondenzace vzdušné vlhkosti a umožnění dosoušení, což zabrání tvorbě plísní. Kvalitní provětrávání snižuje proces vzniku možné fermentace¹⁵, která má za následek znehodnocení biomasy jako paliva [1, 17].

Při skladování větších objemů je nutno brát ohled na dopravní a manipulační techniku, a podle toho dimenzovat vstupní prostory [10].

Tabulka 6 ukazuje změnu absolutní vlhkosti při skladování čerstvé štěpky z listnatých stromů během jednoho roku v závislosti na typu skládky.

Tab. 6: Změny absolutní vlhkosti při skladování štěpky z tvrdých listnatých stromů [8].

| Měsíc | Typ skládky | | | |
|----------|-----------------------|---------------------|---------|--------------------|
| | otevřená | Otevřená s podlahou | zakrytá | Zakrytá s podlahou |
| | Absolutní vlhkost [%] | | | |
| Prosinec | 85 | 82 | 70 | 78 |
| Leden | 95 | 81 | 58 | 55 |
| Únor | 101 | 83 | 54 | 45 |
| Březen | 108 | 79 | 52 | 35 |
| Duben | 101 | 66 | 46 | 28 |
| Květen | 84 | 37 | 39 | 20 |
| Červen | 84 | 35 | 33 | 17 |
| Červenec | 68 | 29 | 30 | 17 |
| Srpen | 62 | 39 | 20 | 17 |

¹⁴ pohlcování

¹⁵ Fermentace – přeměna surového materiálu za účasti mikroorganismů a zvýšené teploty na hnojivý substrát (fermentační zbytek) a plynné emise (CO₂, CH₄, NH₃) [1]

Z tabulky 6 je zřejmé, že otevřené skládky jsou nejméně vhodné, neboť po devíti měsících klesla absolutní vlhkost materiálu pouze o 23 %. Výsledná hodnota vlhkosti po devíti měsících je 62 %. Materiál s tak vysokou vlhkostí je nevhodný pro energetické využití.

Otevřená skládka s podlahou vykazuje o něco lepší skladovací charakteristiky. Absolutní vlhkost klesla na méně než polovinu a činila 39 %.

Pro energetické účely se však nejvíce používají zakryté skládky s podlahou, které umožňují snížení vlhkosti přibližně pětinašobně. Při použití dobré ventilace se může získat ještě lepších hodnot, než jsou uvedeny v tabulce.

Důležité je podotknout, že hodnoty uvedené v tabulce jsou pouze orientační. Při otevřené skládce závisí samozřejmě na klimatických podmínkách¹⁶, typu provzdušňování a samotné konstrukci skládky.

3.2 Degradace

Při nevhodných podmínkách čerstvě vyrobená štěpka poměrně rychle podléhá nežádoucím změnám vlivem chemických procesů a vlivem působení klimatických vlivů¹⁶. Mezi tyto procesy patří činnost živých parenchymatických buněk, chemické oxidování, hydrolýza celulósových komponent v kyselém prostředí a biologická aktivita bakterií a hub.

Vlivem těchto procesů dochází poměrně k rychlému rozkladu a následnému zmenšení objemu a zvýšení vlhkosti materiálu až na 230 % absolutní vlhkosti. Současně s působením výše zmíněných procesů roste teplota skladované štěpky na 50 až 70 °C. Při dosažení hranice teploty 100 °C a při extrémně nevhodných podmínkách může dojít i k samovznícení materiálu. V případě dřevní štěpky jsou takové procesy naprosto nežádoucí.

Obecně je doporučována doba spotřeby štěpky do patnácti dnů od výroby. Za nejdelší přijatelnou dobu se považují tři měsíce, tato doporučení vycházejí právě z důvodu zabránění samovznícení [1, 2, 6].

Ze začátku je aktivita rozkladných procesů malá, literatura uvádí přibližně 0,6 až 3 % ztrátu na objemu během prvního měsíce. Ve druhém až pátém měsíci skládkování dochází ke zvyšování činnosti mikroorganismů a dřevokazných hub a celkové ztráty na objemu se zvyšují na 5,5 % za měsíc. Šestý až osmý měsíc skládkování se ztráty stabilizují na 2,5 až 3,5 % měsíčně. Změny měrné vlhkosti při skladování čerstvé štěpky jsou zobrazeny v kapitole 3.1 v tabulce 6 [1, 8].

Pokud je obsah vody ve štěpce větší než 30 %, dochází po určité době (v závislosti na teplotě) k degradaci a štěpka začíná plesnivět. Štěpka z jehličnanů je odolnější proti plísním než štěpka z listnatých stromů. Ve finských skladech bylo zjištěno až deset tisíc zárodků plísní a dřevokazných hub v 1 m³ vzduchu, přičemž ve Švédsku se za nebezpečné považuje už 500 zárodků na 1 m³. Takto dlouhodobě vdechovaný kontaminovaný vzduch může způsobit plicní onemocnění podobné nemoci zemědělců z plesnivé slámy a sena (podobné příznaky jako zápal plic) [1, 2].

¹⁶ Zejména působení slunečního záření, větru a deště.

3.2.1 Vliv klimatických podmínek na degradaci

Většina důležitých informací, týkající se degradace vlivem klimatických podmínek, byla nepřímo vysvětlena již v předchozích kapitolách. Pro připomenutí bych však zmínil, že nejzásadnější vliv na degradaci má vlhkost a teplota.

Vlhkost se do skladované biomasy dostává formou deště a absorpcí vlhkosti ze vzduchu. Působením slunečního záření a vlivem mikroorganismů dochází k nárůstu teploty uvnitř skladovaného materiálu. Obecně lze říci, že sluneční záření má pozitivní dopad, neboť dochází k vysoušení, snižuje se vlhkost a roste výhřevnost. Se snižující se vlhkostí také klesá pravděpodobnost výskytu plísní a dřevokazných hub.

Čím větší je vlhkost a teplota skladovaného materiálu, tím rychleji dochází k degradaci, plesnivění a následné hnilobě. Tyto procesy jsou nežádoucí a je snaha se jim vyhnout, neboť snižují užité vlastnosti biomasy jako paliva.

Vliv větru částečně přispívá k vysoušení a homogenizaci.

Jako příklad degradace vlivem teploty a vlhkosti bych uvedl experiment, který proběhl v mikrobiologické laboratoři Výzkumného ústavu zemědělské techniky. Výzkum byl uskutečněn při třech různých vlhkostech materiálu (65 %, 22 % a 0 %).

Takto upravené vzorky byly skladovány při stálých teplotách -15 °C, 12 °C, 25 °C a 50 °C. Teploty byly vybrány záměrně, aby odpovídaly podmínkám na povrchu a uvnitř hromad štěpky skladované v zimních a letních měsících ve venkovních podmínkách.

V průběhu experimentu byl sledován výskyt plísní jako hlavního indikátoru škodlivých činitelů ve skladovaném materiálu. Ke stanovení počtu plísní došlo celkem čtyřikrát – v momentu založení, po 7, 14 a 28 dnech.

Nejvyšší koncentrace plísní byla stanovena po 15 dnech při obsahu vody 65 % a teplotě skladování 50 °C. Hodnoty se blížily 108 (KTJ/g)¹⁷.

V případě skladování suché štěpky vliv teploty na průběh počtu plísní v materiálu slábne. Při příznivé teplotě 25 °C je nepatrně vyšší počet KTJ/g, avšak v druhé polovině experimentu má koncentrace plísní klesající charakter.

Množství plísní ve štěpce skladované při -15 °C se v průběhu experimentu neměnilo a blížilo se nule.

Z výsledků lze konstatovat, že skladování štěpky s vysokým obsahem vody je dlouhodobě nevhodné. Pro krátkodobé skladování (do 20 dní) není potřeba sušit materiál na nízký obsah vody, neboť při obsahu vody kolem 20 % nebyly zjištěny významnější rozdíly z hlediska obsahu plísní. Při dlouhodobém skladování štěpky se však z hlediska hygienických rizik jeví jako žádoucí skladovat materiál s co nejnižším obsahem vody bez ohledu na teplotu skladování [18].

¹⁷ Kolonie tvořící jednotky na gram sušiny

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V této kapitole se budu zabývat degradací biomasy na skládce. Cílem bude změřit časovou závislost degradace paliva vlivem skladování a okolních podmínek. Hlavní měřenou charakteristikou bude spalné teplo Q_s . Celý experiment se uskutečnil v palivové laboratoři EÚ FSI v Brně.

4.1 Popis měřicího zařízení

Pro následný experiment byl použit měřicí přístroj Kalorimetr C 200, viz obr. 4.1. Tento přístroj je určen k měření spalného tepla kapalných a pevných látek. Rozkladatelná nerezová nádoba se naplní odváženým množstvím vzorku paliva, palivo se zapálí a měří se zvýšení teploty v kalorimetrickém systému za přesně daných podmínek. Základní technické parametry jsou uvedeny v tab. 7.



Obr. 4.1: Kalorimetr C 200 [20].

Tab. 7: Technické parametry Kalorimetru C 200 [20].

| Kalorimetr C 200 | |
|-------------------|----------------------|
| Napájení | 230V/50 Hz |
| Příkon | 120 W |
| Rozsah měření | do 40 kJ |
| Pracovní teplota | 20 – 25 °C |
| Doba měření | 7 min. |
| Vnější rozměry | 400×400×400 mm |
| Příslušná norma | EN 61 010, EN 50 082 |
| Plnění vodou | manuální |
| Plnění kyslíkem | manuální |
| Vypouštění spalin | manuální |

4.1.1 Postup měření s kalorimetrem

1. Do nerezového kelímku se na laboratorní váze odváží přibližně 1 g paliva. Pokud je palivo ve formě prachu, je třeba vytvořit peletu a vážení zopakovat. V tomto experimentu bylo použito jak pelet, tak čistých vzorků štěpky. U větších kusů štěpky bylo potřeba nejdříve vzorek rozdrtit pomocí mixéru, viz obr. 4.1.1. Rozdrcení vzorků se provádí z důvodu homogenizace. Laboratorní váha, která byla použita u měření všech vzorků, je zobrazena na obr. 4.1.2.



Obr. 4.1.1: Mixér IKA A11 basic.



Obr. 4.1.2: Laboratorní váha.

2. Nerezový kelímek se vloží do speciálního držáku a uváže se bavlněné vlákno pomocí pinzety na žhavicí drát. Vlákno musí viset tak, aby se dotýkalo vzorku, čímž se zajistí dokonalé zapálení. Ukázka navázané bavlnky na žhavicí drát je zobrazena na obr. 4.1.3



Obr. 4.1.3: Speciální držák s navázanou bavlnkou a zapalovacím adaptérem.

3. Do nerezové nádoby se nalije 20 ml vody o teplotě 20 °C. Držák se vsadí do rozkladatelné nádoby a ta se uzavře maticí, viz obr. 4.1.4.



Obr. 4.1.4: Nerezová nádoba s maticí a zapalovacím adaptérem.

4. Na připojené kyslíkové bombě se nastaví tlak 30 bar a pomocí plnicí kyslíkové stanice C 248 se naplní rozkladatelná nádoba na tlak 30 bar. Kyslíková bomba nastavená na tlak 30 bar je zobrazena na obr. 4.1.5 a plnicí stanice C 248 na obr. 4.1.6.



Obr. 4.1.5: Kyslíková bomba.



Obr. 4.1.6: Plnicí kyslíková stanice C 248.

5. Na rozkladatelnou nerezovou nádobu připojíme zapalovací adaptér. Zapneme kalorimetr tlačítkem na zadní straně a nalejeme do otvoru se sítkem vodu o teplotě 20 °C až po vyznačenou hladinu. Do kalorimetru se vloží nádoba mezi tři trny umístěné na dně komory.
6. Na displeji kalorimetru se v kolonce *weight* nastaví hmotnost spalovaného vzorku a v kolonce *unit* jednotka, ve které se bude měřit, tedy na MJ/kg.
7. Po provedení výše uvedených kroků se objeví na displeji zpráva "*Tank filled*"? (plnění nádrže). Pokud byla nádrž již naplněna vodou, stiskne se tlačítko *continue* (pokračovat) a objeví se další zpráva "*Close the cover*" (uzavřít kryt). Kryt se uzavře tak, že se posune lehce doleva a sám se zaklapne. Zapalovací adaptér se dostane do kontaktu se zapalovačem a objeví se zpráva "*Filling*" (plnění). Plnění vodou probíhá přibližně 70 s a ihned po naplnění začíná proces měření.
8. Po 7 minutách měření se na displeji zobrazí výsledná hodnota spalného tepla v zadaných jednotkách a může se otevřít kryt, aby se vyprázdnila nádoba s vodou. Před otevřením rozkládací nádoby se musí použít odvzdušňovací nástavec a až poté se může otevřít. Zkontroluje se, zda byl vzorek dokonale spálen. Pokud vzorek nebyl dokonale spálen, tak výsledek měření není platný a je nutné celý proces měření opakovat.



Obr. 4.1.7: Odvzdušňovací nástavec.

4.2 Průběh měření

4.2.1 Odběr vzorků

Jedním z nejdůležitějších parametrů jakékoli analýzy je správný odběr vzorků. V tomto experimentu se prováděl odběr vzorků tří druhů štěpky z otevřené skládky na pozemku FSI.

Jednalo se o dubové piliny, štěpku z listnatých stromů a jehličnaté piliny, viz obr. 4.2.1. Vzorky byly odebírány postupně každý měsíc, přičemž první odběr proběhl v prosinci 2015 a poslední odběr 2. 5. 2016.

Při odběru byly použity speciální nádoby uchovávající vlhkost a nemožnost přístupu vzduchu. Vzorek se nesmí odebírat z povrchu, neboť částice materiálu na povrchu podléhají nejvíce klimatickým vlivům, a proto se provádí odběr v dostatečné hloubce.



Obr. 4.2.1: Skládka paliva.

4.2.2 Vážení a vysoušení vzorků

Část materiálu se z nádob odebere do keramických misek a provede se vážení na digitální váze, viz obr. 4.1.2. Vážení se provádí proto, aby se po vysoušení zjistila relativní vlhkost vzorku. V tomto experimentu se však vlhkost nepočítala, neboť se předpokládalo, že vzorek vytažený ze sušičky má nulovou vlhkost. Je jisté, že při vážení paliva nebo tvorbě pelet daný vzorek absorboval určitou část vzdušné vlhkosti, avšak ta byla zanedbána.

Zvážené vzorky se potom dají do sušičky Venticell přibližně na 4 – 6 hodin k vysoušení, viz obr. 4.2.3. Po vysoušení se vzorky přesunou do exsikátoru¹⁸, kde zchladnou a udrží si svoji stávající vlhkost. Jednotlivé vzorky uložené v exsikátoru jsou zobrazeny na obr. 4.2.2.

Po zchladnutí se jednotlivé vzorky znovu zváží a vypočte se relativní vlhkost.



Obr. 4.2.2: Vzorky paliva uložené v exsikátoru.



Obr. 4.2.3: Připravené vzorky k sušení.

¹⁴Pojmem exsikátor se rozumí tlustostěnná nádoba složená většinou ze dvou částí. Víko exsikátoru je opatřeno zábrusem, který je namazán zábrusovým tukem [21].

4.2.3 Tvorba pelet

Pokud je materiál ve formě malých pilin a prachu, je potřeba vyrobit peletu. Peletou se chápe vysoce stlačená hmota válcovitého tvaru, průměru přibližně 6 mm a délky 5 – 10 mm.

V tomto experimentu bylo použito k výrobě pelet manuálního lisu, viz obr. 4.2.4. Hmotnost vyrobených pelet se pohybovala v rozmezí 0,9 – 1,14 g.



Obr. 4.2.4: Lis na tvorbu pelet.

4.2.4 Spalování vzorků v kalorimetru

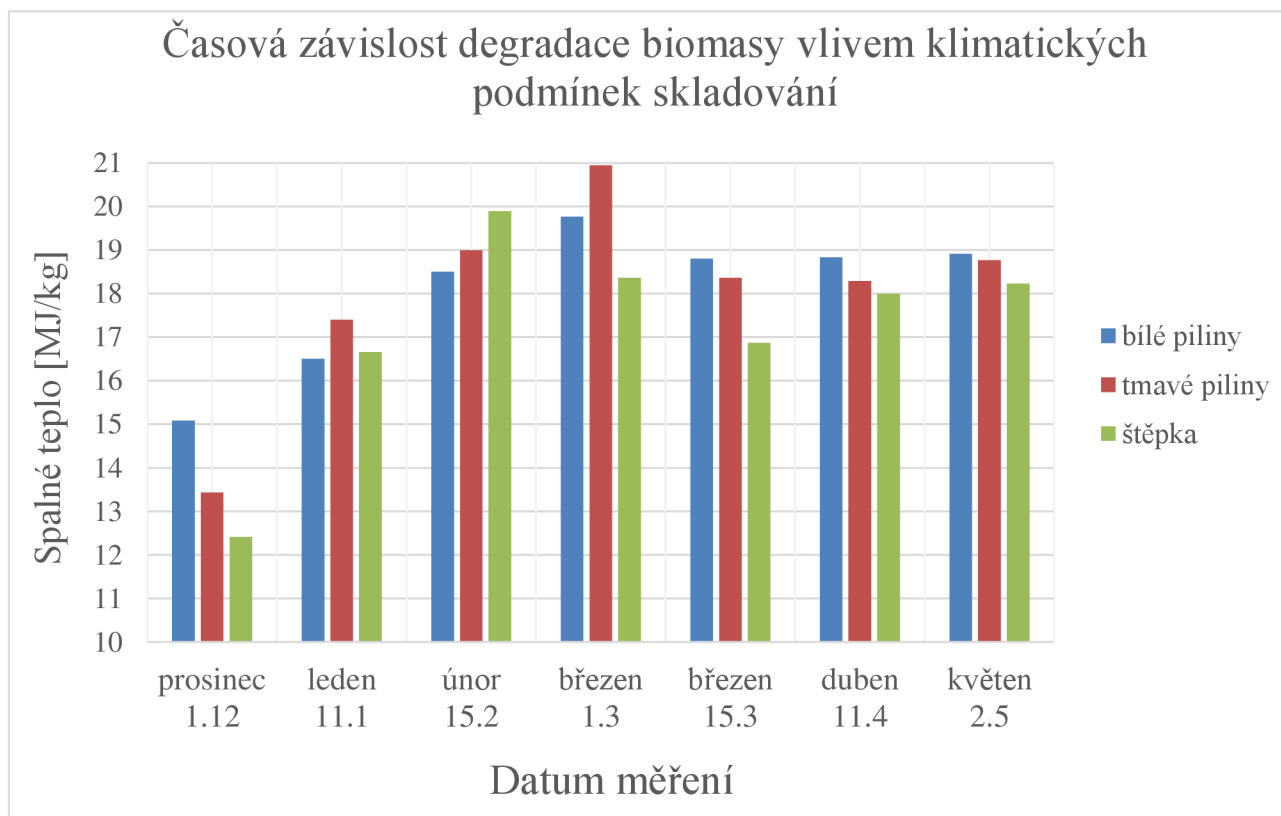
Tato problematika již byla vysvětlena v kapitole 4.1.1 Postup měření s kalorimetrem.

4.3 Naměřená data

Měření spalného tepla na daných vzorcích začalo 1. 12. 2015, potom pravidelně každý měsíc docházelo k odběru a měření vzorků, aby se stanovila časová závislost spalného tepla. Každý vzorek se měřil minimálně třikrát, z důvodu zvýšení přesnosti měření. Z naměřených hodnot byl vypočten aritmetický průměr a byla získána jedna hodnota. Výsledné hodnoty měření jsou uvedeny v tabulce 8.

Tab. 8: Naměřené hodnoty.

| Vzorek | Spalné teplo [MJ/kg] | | | | | | |
|---------------------|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1.12 | 11.1 | 15.2 | 1.3 | 15.3 | 11.4 | 2.5 |
| Bílé piliny | 15,084 | 16,504 | 18,503 | 19,760 | 18,798 | 18,828 | 18,908 |
| Tmavé piliny | 13,432 | 17,399 | 18,99 | 20,946 | 18,360 | 18,286 | 18,767 |
| Štěpka | 12,411 | 16,659 | 19,888 | 18,360 | 16,871 | 17,990 | 18,231 |



Obr. 4.3: Naměřená data.

Z obrázku 4.3 lze konstatovat následující výsledky experimentu. Hodnoty z prosince 2015 mohou být však poněkud zavádějící, neboť tyto hodnoty tabulkově neodpovídají vysušenému palivu. V tomto počátečním měření mohlo dojít k tomu, že vzorky nebyly dokonale vysušeny a jejich relativní vlhkost byla poněkud vyšší, což způsobilo tak malé naměřené spalné teplo. Dle obrázku 1.4.2 na str. 18 by toto spalné teplo odpovídalo přibližně 25 % relativní vlhkosti u štěpky a tmavých pilin a 17 % relativní vlhkosti a pilin bílých.

Hodnoty naměřené za měsíce leden až březen mají rostoucí charakter, přitom by měly být přibližně stejné, pokud by tedy nedošlo k degradaci. Tento růst může být způsoben nehomogenitou daných vzorků. Tím je myšleno, že odebrané vzorky nebyly stejnorodé a obsahovaly např. stopy pryskyřic a olejů, které by způsobily zvýšení spalného tepla.

Za další příčinu růstu může být považována nepřesnost měření. V prvních třech měsících totiž docházelo k problémům s kalorimetrem, který občas ukazoval velmi zajímavé hodnoty. Jako příklad bych uvedl hodnotu 44 MJ/kg, což je pro představu hodnota srovnatelná s výhřevností motorové nafty. Mezi další problémy patřilo neustálé otevírání krytu, samovolné vypouštění vody aj. Tyto nepříjemnosti komplikovaly samotné měření, které se kvůli těmto problémům často protahovalo do pozdních večerních hodin. Tyto nepříjemnosti bylo nutné řešit, a proto se dal kalorimetr na opravu.

Měření, která se uskutečnila od 15. března do 2. května, proběhla bez jakýchkoliv problémů. Naměřená data se u bílých (dubových) pilin ustálila přibližně na hodnotě 18,845 MJ/kg a u tmavých pilin (piliny z jehličnanů) na 18,471 MJ/kg. Jak bylo zmíněno v kapitole 1.3, jehličnany mají přibližně o 5 % vyšší výhřevnost než listnaté stromy. Experiment vyšel přesně obráceně, že piliny z listnáčů mají o 2 % vyšší výhřevnost než piliny z jehličnanů, což může být způsobeno právě nehomogenitou vzorků.

Hodnota spalného tepla štěpky z 15. března je poněkud menší, což mohlo být zapříčiněno tím, že vzorek už při odběru byl cítit plísněmi. Začátek března byl velmi deštivý, což mohlo způsobit vznik plísní, začátek rozkladných procesů a následnou hnilobu v některých místech skládky. Hodnoty z posledních dvou měření se však ustálily přibližně na hodnotě 18,110 MJ/kg.

Závěrem vyhodnocení naměřených dat je to, že k celkové degradaci nedošlo a skladování menšího objemu po dobu půl roku je možné. Při skladování většího objemu je nutno si dávat pozor na samovznícení a zajistit vhodné podmínky pro skladování, viz kap. 3.1.

ZÁVĚR

První část je věnována definici, rozdělení a vzniku biomasy. Rozdělení biomasy je provedeno dle několika hledisek, ať už se jedná o hledisko dle původu, nebo energetické. Obecně lze biomasu rozdělit na dřevní (dendromasa), nedřevní (fytomasa) a živočišnou (zoomasa). Dále je zde popsáno chemické složení biomasy a především ty složky, které ovlivňují výhřevnost biomasy, jako jsou oleje, pryskyřice aj. Dále jsou zde uvedeny hlavní vlastnosti biomasy charakterizující její kvalitu. Jedná se především o hrubý rozbor paliva, vlhkost, spalné teplo, výhřevnost a prvkové složení. Rozhodující vlastností je vlhkost. Nejen, že se snižující vlhkostí roste výhřevnost, ale také klesá hmotnost převážného paliva a klesá riziko samovznícení a degradace.

Druhá kapitola se věnuje problematice spalování se zaměřením na proces spalování, který se skládá z následujících pochodů: ohřev částice, odpaření vlhkosti, uvolnění prchavé hořlaviny, hoření prchavé hořlaviny a hoření uhlíku. Dále je zde vysvětleno dokonalé a nedokonalé spalování a jejich rozdíly. Nedílnou součástí problematiky spalování je vliv emisí. Emise při spalování biomasy jsou nižší než u spalování fosilních paliv, avšak ne vždy. Závisí především na složení paliva, typu spalovacího zařízení, nastavením spalovacího procesu a množstvím přiváděného okysličovačla.

Kapitola třetí popisuje správné podmínky skladování, tedy jak se vyhnout samovznícení a vzniku plísní, zvýšit rychlost vysoušení použitím správného typu skládky a kvalitního provětrávání. Dále je zde popsána degradace štěpky, která vzniká při nedodržení podmínek uvedených výše. Čerstvě vyrobená štěpka podléhá poměrně rychle nežádoucím změnám vlivem chemických procesů a vlivem působení klimatických podmínek. Je zde také nastíněna činnost mikroorganismů a úbytek skladované hmoty v závislosti na době skladování.

Poslední část se věnuje experimentu, který měl za cíl stanovit degradaci tří druhů štěpky vlivem skladování a okolních podmínek. Je zde popsán celý průběh experimentu počínaje odběrem vzorků, vysoušením, vážením, tvorbou pelet a spalováním v kalorimetru. Hlavní měřenou charakteristikou bylo spalné teplo. Experiment se uskutečnil v palivové laboratoři EÚ FSI v Brně. Proběhlo celkem 7 měření v průběhu šesti měsíců, přičemž jednotlivá data jsou uvedena v tab. 8. Z výsledků vyplývá, že k celkové degradaci nedošlo a doba skladování šesti měsíců tak malého objemu je možná. Výsledné hodnoty spalného tepla po šesti měsících u všech třech vzorků jsou v rozmezí 18 až 19 MJ/kg. Je nutné zmínit, že v tomto experimentu se jednalo o menší objem skladované štěpky, který se vlivem větru a slunečního záření snáze vysuší než objem, který je uskladněn v prostorných halách a silech. Při velkých objemech je totiž riziko vzniku plísní, působení dřevokazných hub a mikroorganismů a s tím související degradaci mnohem vyšší.

Doporučení, která by zlepšila vypovídající hodnotu tohoto experimentu, jsou následující: delší doba skladování, častější měření, větší objem štěpky (simulující množství ve velkoobjemových silech), homogennější materiál, popřípadě kvalitnější a přesnější měřicí přístroje.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] JANDAČKA, J., MALCHO, M., MIKULÍK, M. *Biomasa ako zdroj energie, potenciál, druhy, bilancia a vlastnosti palív*. Žilina: Juraj Štefuň – GEORG, 2007, 241 s. ISBN 978-80-969161-3-9.
- [2] JANDAČKA, J., MIKULÍK, M. *Technológie pre zvyšovanie energetického potenciálu biomasy*. Mojš: Jozef Bulejčík, 2007, 110 s. ISBN 978-80-969595-4-9
- [3] TRÁVNÍČEK, Petr. *Technologie zpracování biomasy za účelem energetického využití*. Vyd. 1. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2015, 210 s. ISBN 978-80-7509-206-9.
- [4] BALÁŠ, Marek. *Kotle a výměníky tepla*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013, 119 s. ISBN 978-80-214-4770-7.
- [5] NOSKIEVIČ, Pavel. *Biomasa a její energetické využití*. Praha: Ministerstvo životního prostředí, 1996, 68 s. ISBN 80-707-8367-2.
- [6] MURTINGER, Karel a Jiří BERANOVSKÝ. *Energie z biomasy*. 1. vyd. Brno: Computer Press, 2011, 106 s. Stavíme. ISBN 978-80-251-2916-6.
- [7] QUASCHNING, Volker. *Obnovitelné zdroje energií*. 1. vyd. Praha: Grada, 2010, 296 s. Stavitel. ISBN 978-80-247-3250-3.
- [8] PASTOREK, Zdeněk, Jaroslav KÁRA a Petr JEVIČ. *Biomasa: obnovitelný zdroj energie*. Praha: FCC Public, 2004, 286 s. ISBN 80-865-3406-5.
- [9] KRÁTKÝ, Lukáš a Tomáš JIROUT. *Moderní trendy předúprav biomasy: pro intenzifikaci výroby biopaliv druhé generace*. 1. vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2015, 189 s. ISBN 978-80-01-05720-9.
- [10] *Možnosti energetického využití biomasy: ukázka praktických opatření z Akčního plánu pro biomasu v ČR na období 2012-2020*. Praha: Ministerstvo zemědělství, 2013. ISBN 978-80-7434-122-9.
- [11] CENEK, Miroslav. *Obnovitelné zdroje energie*. 2. upr. a dopl. vyd. Praha: FCC Public, 2001. ISBN 80-901985-8-9.
- [12] Topení dřevem. *Www.TopeniDrevem.cz* [online]. České Budějovice: Energy Consulting, o.s., 2006 [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://www.topenidrevem.cz/>
- [13] VĚDA NÁS BAVÍ. *VĚDA NÁS BAVÍ* [online]. Česká republika: Omniveda Group s.r.o., 2011 [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: http://www.vedanasbavi.cz/orisek-8-zs-vnb-i-07-vzduch?ID_mesta=3&IDp=1
- [14] KOLONIČNÝ, Jan: Emise při spalování biomasy. *Biom.cz* [online]. 2010-06-07 [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/emise-pri-spalovani-biomasy-2>.

- [15] MÍKA, Martin, VOLÁKOVÁ, Pavlína, KLÁPŠTĚ, Břetislav, JANKOVSKÝ, Ondřej, VERNER, Vladimír: Jak potlačit spékání biomasového popela? *Biom.cz* [online]. 2011-11-28 [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/jak-potlacit-spekani-biomasoveho-popela>. ISSN: 1801-2655.
- [16] HUTLA, Petr: Vliv uhelných aditiv na emisní parametry topných pelet z některých fyto materiálů. *Biom.cz* [online]. 2005-04-25 [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/vliv-uhelnych-aditiv-na-emisni-parametry-topnych-pelet-z-nekterych-fytomaterialu>. ISSN: 1801-2655.
- [17] STUPAVSKÝ, Vladimír, HOLÝ, Tomáš: Dřevní štěpka – zelená, hnědá, bílá. *Biom.cz* [online]. 2010-01-01 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/drevni-stepka-zelena-hneda-bila>.
- [18] SILVARIUM.cz. *SILVARIUM.cz* [online]. Česká republika: náměstí Smiřických 1 281 63 Kostelec nad Černými lesy, 2014 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://www.silvarium.cz/zpravy-z-oboru-lesnictvi-a-drevarstvi/vlhkost-a-kvalita-uskladnene-stepky-zemedelec>.
- [19] UNIVERZITA 3.VĚKU. *UNIVERZITA 3.VĚKU: SVĚT ROSTLIN* [online]. L. Nátr, 2008 [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: http://kfrserver.natur.cuni.cz/lide/zelen/U3V_fr/.
- [20] Kalorimetr C200, IKA. *Ilabo – Laboratorní technika do Vaší laboratoře* [online]. Copyright © 2011 [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: <http://www.ilabo.cz/firmy/ika/kalorimetry/kalorimetr-c200-ika/>.
- [21] GALUSZKA, Petr a Lenka LUHOVÁ. *Laboratorní technika pro biomechaniky*. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého, 2003. Skripta / Univerzita Palackého. ISBN 80-0640-3.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| Zkratka | Jednotka | Popis |
|---------|----------|---|
| EU | [-] | Energetický ústav |
| FSI | [-] | Fakulta strojního inženýrství |
| PAU | [-] | Polyaromatické uhlovodíky |
| PCDD/F | [-] | Polychlorované dibenzodioxiny a dibenzofurany |
| TEQ | [-] | Toxic equivalent |
| TZL | [-] | Tuhé znečišťující látky |
| VUT | [-] | Vysoké učení technické |

| Symbol | Jednotka | Popis |
|---|------------------------|--|
| A | [kg·kg ⁻¹] | Obsah popeloviny |
| α | [-] | Součinitel přebytku vzduchu |
| Al ₂ O ₃ | [-] | Oxid hlinitý |
| C | [-] | Uhlík |
| CaO | [-] | Oxid vápenatý |
| CO | [-] | Oxid uhelnatý |
| CO ₂ | [-] | Oxid uhličitý |
| C ₆ H ₁₂ O ₆ | [-] | Glukóza |
| Cl ₂ | [-] | Chlór |
| CH ₄ | [-] | Methan |
| Fe ₂ O ₃ | [-] | Oxid železitý |
| <i>h</i> | [kg·kg ⁻¹] | Obsah hořlaviny |
| H ₂ | [-] | Vodík |
| H ₂ O | [-] | Voda |
| HCl | [-] | Chlorovodík |
| K ₂ O | [-] | Oxid draselný |
| <i>m_p</i> | [g] | Hmotnost popela |
| <i>m_d</i> | [g] | Hmotnost absolutně suchého vzorku paliva |

| | | |
|--------------------|-------------------------------------|--|
| m_1 | [kg] | Hmotnost vzorku suché dřevní hmoty |
| m_2 | [kg] | Hmotnost vzorku po vysušení |
| MgO | [-] | Oxid hořečnatý |
| N ₂ | [-] | Dusík |
| NH ₃ | [-] | Amoniak |
| O ₂ | [-] | Kyslík |
| Q _i | [MJ·kg ⁻¹] | Výhřevnost |
| Q _s | [MJ·kg ⁻¹] | Spalné teplo |
| Q _v | [MJ·kg ⁻¹] | Výparné teplo vody |
| S | [-] | Síra |
| SO ₂ | [-] | Oxid siřičitý |
| V _{vzs} | [m ³ ·kg ⁻¹] | Teoretická hodnota suchého spalovaného vzduchu |
| V _{spmin} | [m ³ ·kg ⁻¹] | Minimální objem suchých spalin |
| w | [kg·kg ⁻¹] | Obsah vody v palivu |
| w _{dr} | [%] | Absolutní vlhkost |
| w ^r | [%] | Relativní vlhkost |

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

| | | |
|------------|--|----|
| Obr. 1.1 | Schématické zobrazení fotosyntézy | 12 |
| Obr. 1.3 | Schématické zobrazení řetězce glukózy | 15 |
| Obr. 1.4.1 | Schématické zobrazení paliva | 17 |
| Obr. 1.4.2 | Závislost výhřevnosti na obsahu vody | 18 |
| Obr. 2.2 | Schéma průběhu spalování | 21 |
| Obr. 2.4.1 | Emise PAU u kotlů malých výkonů | 26 |
| Obr. 2.4.2 | Vliv aditiva hnědého uhlí v topných peletách z energického šťovíku | 27 |
| Obr. 4.1 | Kalorimetr C 200 | 31 |
| Obr. 4.1.1 | Mixér IKA A11 basic | 32 |
| Obr. 4.1.2 | Laboratorní váha | 32 |
| Obr. 4.1.3 | Speciální držák s navázanou bavlnkou | 32 |
| Obr. 4.1.4 | Nerezová nádoba s maticí a zapalovacím adaptérem | 33 |
| Obr. 4.1.5 | Kyslíková bomba | 33 |
| Obr. 4.1.6 | Plnicí kyslíková stanice C248 | 33 |
| Obr. 4.1.7 | Odvzdušňovací nástavec | 34 |
| Obr. 4.2.1 | Skládka paliva | 35 |
| Obr. 4.2.2 | Vzorky paliva uložené v exsikátoru | 36 |
| Obr. 4.2.3 | Přípravné vzorky k sušení | 36 |
| Obr. 4.2.4 | Lis na tvorbu pelet | 37 |
| Obr. 4.3 | Naměřená data | 38 |
| Tab. 1 | Výhřevnost vybraných druhů dřevní biomasy při 50 % vlhkosti | 14 |
| Tab. 2 | Obsah jednotlivých složek ve dřevě a slámě v % | 15 |
| Tab. 3 | Chemické složení biomasy a vybraných druhů fosilních paliv | 16 |
| Tab. 4 | Výhřevnost vybraných druhů dřeva v závislosti na vlhkosti | 19 |
| Tab. 5 | Objemové složení atmosférického vzduchu | 24 |
| Tab. 6 | Změny absolutní vlhkosti při skladování štěpky z tvrdých listnatých stromů | 28 |
| Tab. 7 | Technické parametry Kalorimetru C 200 | 31 |
| Tab. 8 | Naměřené hodnoty | 38 |