

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra technologických zařízení a staveb



Bakalářská práce

**Popis a zhodnocení současného stavu využití
zplyňovacích technologií pro vedlejší produkty
oběhového hospodářství**

Jan Kleiner

© 2024 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jan Kleiner

Procesní inženýrství
Technika a technologie zpracování odpadů

Název práce

Popis a zhodnocení současného stavu využití zplyňovacích technologií pro vedlejší produkty oběhového hospodářství

Název anglicky

The description and evaluation of the current state of use of gasification technologies for by-products of the circular economy

Cíle práce

Cílem bakalářské práce je seznámit se s problematikou energetického využití vedlejších produktů pomocí zplyňovacích technologií. Provést teoretický rozbor technologií a techniky zplyňovacích jednotek používaných pro energetické využití odpadních surovin. Na vybraných vedlejších produktech stanovit základní energetické vlastnosti.

Metodika

Metodika práce

Metodika práce vychází z určených klasifikačních, jakostních a specifikačních rámců obnovitelných zdrojů energie s ohledem na tuhá biopaliva pro výrobu energie. Praktická část práce zahrnuje uskutečnění kvalitativních rozborů vybraných vzorků tuhé biomasy vycházejících z vedlejších produktů v rámci oběhového hospodářství.

Osnova práce

1. Úvod
2. Cíl práce
3. Metodika práce
4. Charakteristika problematiky
5. Zhodnocení vybraných technologií a technologických zařízení
6. Závěr a diskuze
7. Seznam literatury
8. Přílohy

Doporučený rozsah práce

30 až 40 stran

Klíčová slova

Vedlejší produkty, oběhové hospodářství, zplyňování, výhřevnost, biopalivo

Doporučené zdroje informací

Malaták, J.; Jevič, P.; Vaculík, P.: Účinné využití tuhých biopaliv v malých spalovacích zařízeních s ohledem na snižování emisí znečišťujících látek. 2010, Powerprint, Praha, 240 str., ISBN 978-80-87415-02-3
Malaták, J.; Vaculík, P.: Biomasa pro výrobu energie. ČZU v Praze, Technická fakulta, tisk. Powerprint, Praha 2008, 206 s., ISBN: 978-80-213-1810-6
Malaták, J.; Velebil, J.; Jankovský, M.; Tamelová, B.; Malatáková, J.; J. Passian, L.: Aplikace zplyňovacích technologií při energetickém využití jehličnatých dřevin z kůrovcové a kalamitní těžby. Praha: Lesy České republiky, s. p., Hradec Králové, 2020, 270 s.
Obroučka, K.: Termické zneškodňování odpadů. VŠB Ostrava, Ostrava 1997, 140 s., ISBN 80-248-0009-8
Pastorek, Z.; Kára, J.; Jevič, P.: Biomasa – obnovitelný zdroj energie. Nakladatelství FCC Public, Praha 2004, 284 s., ISBN 80-86534-06-5
Příslušné zákony, nařízení vlády, vyhlášky, ČSN, oborové předpisy a odborné časopisy
Směrnice Evropského Parlamentu a Rady 2009/28/EC o podpoře užívání energie z obnovitelných zdrojů a o změně a následném zrušení směrnic 2001/77/ES a 2003/30/ES. Štrasburk, 23.4.2009

Předběžný termín obhajoby

2023/2024 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Petr Vaculík, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra technologických zařízení staveb

Elektronicky schváleno dne 6. 11. 2023

doc. Ing. Jan Malaták, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 11. 1. 2024

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 12. 01. 2024

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci „Popis a zhodnocení současného stavu využití zplyňovacích technologií pro vedlejší produkty oběhového hospodářství“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 30. března 2024

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval doc. Ing. Petru Vaculíkovi, Ph.D., za odborné vedení, za pomoc a rady při zpracování této bakalářské práce. Současně bych chtěl poděkovat Katedře technologických zařízení staveb za umožnění měření v laboratořích Technické fakulty. A dále bych rád poděkoval rodině a přátelům za podporu při studiu na vysoké škole.

Popis a zhodnocení současného stavu využití zplyňovacích technologií pro vedlejší produkty oběhového hospodářství

Abstrakt

Hlavním cílem práce je rešeršní průzkum současného využití zplyňovacích technologií, které jsou konstruovány pro zpracování biomasy. Úvodní část práce se lehce dotýká historie této technologie a obecně vysvětluje principy zplyňování a přibližuje nejjednodušší typy generátorů. V další části je vysvětlen pojem biomasa a popsány její jednotlivé druhy. Následující část se pak zaměřuje na popis současných technologií zplyňování, na vysvětlení, na jakém principu pracují jednotlivé generátory, jaké jsou možnosti jejich kombinace nebo jak vypadá spojená výroba plynu a elektrické energie a popis produktů těchto generátorů a metod jejich využití. V praktické části je pak zkoumán konkrétní materiál a jeho vhodnost pro tento druh zpracování. A nakonec vyhodnocení, jaký generátor by byl vhodný pro tento materiál.

Klíčová slova: Zplyňování, biomasa, generátorový plyn, zplyňovací generátor, energetické využití biomasy

Description and evaluation of the current state of the use of gasification technologies for by-products of the circular economy

Abstract

The main objective of this thesis is a research survey of the current use of gasification technologies designed for biomass processing. The introductory part of the thesis touches on the history of this technology, explains the principles of gasification in general, and introduces the simplest types of generators. In the next section, the concept of biomass is explained and its different types are described. The following section then focuses on a description of current gasification technologies, explaining the principles on which the different generators work, the possibilities of combining them, or what the combined production of gas and electricity looks like, and a description of the products of these generators and the methods of their use. The practical part then examines a specific material and its suitability for this type of processing. Finally, there is an evaluation of which generator would be suitable for this material.

Keywords: Gasification, biomass, generator gas, gasification generator, biomass energy recovery

Obsah

1 Úvod	1
2 Cíl práce	3
3 Metodika práce	4
4 Literární přehled	5
4.1 Základní právní předpisy	5
4.2 Biomasa a její energetické zpracování	6
4.2.1 Procesy zpracování biomasy	8
4.3 Zplyňování – charakteristika problematiky	10
4.4 Historie zplyňování	12
4.5 Generátorový plyn	12
4.5.1 Čištění generátorového plynu	14
4.6 Základní rozdělení zplyňovacích procesů	15
4.7 Způsob zajištění tepla	16
4.8 Použité zplyňovací médium	16
4.9 Použitý tlak	17
4.10 Základní konstrukce generátorů	17
5 Analýza vybraných vzorků	25
5.1 Návrh zplyňovací linky	25
5.2 Výběr vzorků	26
5.3 Laboratorní měření	26
5.3.1 Vlhkost	27
5.3.2 Dehet	28
5.3.3 Pevné částice	28
5.3.4 Alkalické sloučeniny	28
5.3.5 Síra	29
5.3.6 Dusík	29
5.3.7 Chlor	29
5.4 Předúprava vzorků	29
5.5 Horkovzdušná sušárna	30
5.6 Střížný mlýn Retsch SM 100	31
5.7 Termogravimetrická analýza	31
5.8 Stanovení dusíku, uhlíku a vodíku	33
5.9 Stanovení obsahu síry	34
5.10 Stanovení spalného tepla	36
5.11 Výsledky měření	37
5.12 Vyhodnocení výsledků, využití v zařízení GLOCK CHP 18	40

6	Výsledky měření a diskuze	43
7	Závěr.....	45
8	Seznam použitých zdrojů	47
	Seznam obrázků.....	53
	Seznam tabulek	55
	Přílohy.....	57

1 Úvod

Jedním z hlavních témat ve světě je v posledních desetiletích v důsledku snižující se zásoby fosilních paliv, růstu světové populace, zvyšujících se nároků na energie a obav z globálního oteplování přechod na obnovitelné zdroje energie. U nás nejen z důvodu splnění evropských cílů v rámci Vnitrostátního plánu České republiky v oblasti energetiky a klimatu, kde je popsán cíl snížit celkové emise skleníkových plynů oproti roku 2005 o 30 % do roku 2030 (což odpovídá snížení emisí o 44 milionů tun CO₂ekv) a zvýšit podíl obnovitelných zdrojů na 22 % ve výrobě elektrické energie, ale i směřování k energetické soběstačnosti, tedy snížení závislosti na dovozu a zajištění dostatečného rozvoje energetické infrastruktury (Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2023). Z tohoto závazku vyplývá požadavek na maximální možné využití obnovitelných zdrojů. Obnovitelné zdroje česká legislativa definuje v zákoně 165/2012 Sb., o podporovaných zdrojích energie, jako „obnovitelné nefosilní zdroje energie, jimiž jsou energie větru, energie slunečního záření (termální a fotovoltaická), geotermální energie, energie okolního prostředí, energie z přílivu nebo vln a jiná energie z oceánů, energie vody, energie biomasy a paliv z ní vyráběných, energie skládkového plynu, energie kalového plynu z čistíren odpadních vod a energie bioplynu“ (Česko, 2012).

Zplyňováním se rozumí proces, který bez spalování mění organické materiály na syntetický plyn, jehož hlavními složkami jsou vodík a oxid uhličitý. V procesu zplyňování biomasy lze použít nejen levné suroviny, ale také mnoho organických odpadů, jako je pevný komunální odpad. Jedná se o vospělou a k přírodě šetrnou technologii likvidace odpadů a jednu z alternativ k jejich konvenčnímu spalování. Zplyňovací technologie má potenciál přispět státnímu snažení o snížení energetické závislosti přechodem na obnovitelné zdroje energie. Zároveň se jedná o technologii, která má nízké emise skleníkových plynů. Nevýhodou je pak vysoká počáteční investice, náročnost na údržbu a menší účinnost.

V současnosti existují firmy, které vyvíjí nebo již vyrábějí zplyňovací technologie na zpracování pevných odpadů (např. Eco-waste environmental protection technology, <https://www.energy-xprt.com/companies/eco-waste-environmental-protection-technology-72246>), předkládaná bakalářská práce je ale zaměřena na zplyňovací technologie, které jsou určeny ke zpracování biomasy, konkrétně dřevní biomasy. Primárním produktem je pak generátorový plyn, který je možno přímo spalovat na výrobu elektrické a tepelné energie nebo může být použit jako vstupní surovina pro výrobu biopaliv a olejů.

Úvodní kapitoly práce seznamují se základní legislativou a definicí užívaných pojmů, a pojednáním o vstupním materiálu tedy biomase.

Následující kapitoly popisují samotnou technologii a různé typy reaktorů, které se pro zplyňování používají.

Vlastní práci autora shrnuje pátá kapitola, v níž je provedena analýza tří vybraných vzorků. Vstupní materiály jsou laboratorně zkoumány dle vhodnosti pro konkrétní zplyňovací linku určenou na výrobu elektrické a tepelné energie. Analýza vstupní biomasy a její výstupy jsou popsány a vyhodnoceny. Zplyňovací linka je podrobena základnímu ekonomickému zhodnocení s ohledem na návratnost počátečních investic. Výstupem je posouzení vybraných vzorků a jejich fyzikálně-chemických vlastností a hrubé ekonomické zhodnocení navržené technologie.

2 Cíl práce

Hlavním cílem práce je popsat technologii zplynování a přiblížit využití a náklady na provoz této technologie. První část seznamuje s problematikou využití biomasy jako vstupního materiálu pro výrobu generátorového plynu s potenciálem na spálení v zařízení vyrábějícím elektrickou energii, specifika generátorového plynu a zařízení na výrobu elektřiny jsou popsána v dalších kapitolách.

V praktické části je cílem provést analýzu tří vybraných vzorků a zhodnotit jejich vhodnost pro konkrétní vybrané zařízení. Výstupem je posouzení vybraných vzorků a jejich fyzikálně-chemických vlastností a hrubé ekonomické zhodnocení navrhnuté technologie.

3 Metodika práce

Bakalářská práce metodicky vychází z analýzy současného stavu problematiky v technologii zplyňování biomasy. V rámci řešení této práce, bude metodika sestavena z těchto dílčích úkolů:

- charakteristika biomasy,
- technologie zplyňování,
- analýza odebraných vzorků,
- vyhodnocení analýzy,
- posouzení vhodnosti vzorků pro konkrétní zplyňovací linku,
- ekonomické zhodnocení navržené linky.

4 Literární přehled

4.1 Základní právní předpisy

Vyhláška č. 110/2022 Sb.

Vyhláška č. 110/2022 Sb., o stanovení druhů a parametrů podporovaných obnovitelných zdrojů a kritérií udržitelnosti a úspory emisí skleníkových plynů pro biokapaliny a paliva z biomasy, zapracovává předpisy Evropské unie a upravuje druhy a parametry obnovitelných zdrojů využívajících biomasu a biokapaliny, způsoby využití podporovaných obnovitelných zdrojů pro výrobu elektřiny, tepla a biometanu. Udává rozsah uchovávaných dokumentů o použitém palivu při výrobě elektřiny a tepla z obnovitelných zdrojů a biometanu a o způsobu jeho výroby, kritéria udržitelnosti a úspory emisí skleníkových plynů pro biokapaliny a paliva z biomasy a suroviny vymezující pokročilý biometan.

Vyhláška č. 415/2012 Sb.

Vyhláška č. 415/2012 Sb., o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší zapracovává předpisy Evropské unie a mimo jiné stanovuje požadavky na kvalitu paliv, požadavky na způsob prokazování jejich plnění a formát a rozsah ohlašování splnění těchto požadavků, požadavky na výrobky s obsahem těkavých organických látek, provozní náležitosti spalovacího stacionárního zdroje na pevná paliva o celkovém jmenovitém tepelném příkonu od 10 do 300 kW včetně, který slouží jako zdroj tepla pro teplovodní soustavu.

Vyhláška č. 415/2012 Sb. byla novelizována vyhláškami č. 155/2014 Sb., č. 146/2015 Sb., č. 171/2016 Sb., č. 452/2017 Sb., č. 190/2018 Sb., č. 216/2019 Sb. a naposledy vyhláškou č. 265/2022 Sb.

Nařízení vlády č. 189/2018 Sb.

Nařízení vlády č. 189/2018 Sb., o kritériích udržitelnosti biopaliv a snižování emisí skleníkových plynů z pohonných hmot. Vládní nařízení se týká § 19 odst. 12, § 20a odst. 7, § 20b odst. 5 a § 21 odst. 13 zákona č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší ve znění zákona č. 172/2018 Sb. Zapracovává příslušné předpisy Evropské unie a upravuje mimo jiné kritéria udržitelnosti biopaliv, obsahové náležitosti zprávy o emisích, seznam surovin pro výrobu pokročilých biopaliv a náležitosti samostatného prohlášení pěstitele biomasy o splnění kritérií udržitelnosti, dílčího prohlášení o shodě s kritérii udržitelnosti a prohlášení o shodě s kritérii udržitelnosti.

Normy vztahující se k technologii zplynování

ČSN P CEN/TS 15439 (838400) – Zplyňování biomasy – Dehet a částice v plynných produktech – Vzorkování a analýza.

4.2 Biomasa a její energetické zpracování

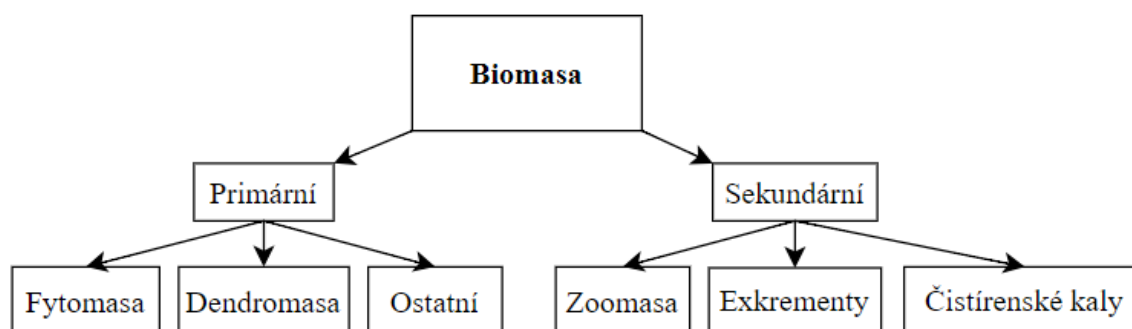
Vyhláška č. 415/2012 Sb. v § 2 definuje biomasu ke spalování jako produkt, který je tvořen z rostlinného materiálu pocházejícího ze zemědělství nebo lesnictví a který lze použít jako palivo za účelem získání jeho energetického obsahu, a dále následující odpad použitý jako palivo – rostlinný odpad ze zemědělství nebo lesnictví, rostlinný odpad z potravinářského průmyslu, pokud se využije vyrobené teplo, rostlinný odpad z výroby čerstvé vlákniny a z výroby papíru z buničiny, pokud se spaluje v místě výroby a vzniklé teplo se využije, korkový odpad.

Hlavním zdrojem energie potřebným pro vznik biomasy je sluneční záření, které je za pomoci různých přeměn (převážně fotosyntézy) přetvářeno na energii chemické vazby. Jedná se o rostliny (fytomasa) a živočichy (zoomasa) žijící v přírodě, produkty a zbytky existence živočichů, a to i člověka, odumřelou biomasu (sláma, spadané listí) a taky materiál, který vznikl technologickou přeměnou výše zmíněných (např. rostlinné oleje, alkohol, papír, organická součást odpadů).

Dle původu vzniku můžeme biomasu rozdělit na primární a sekundární (viz obr. 1).

Materiál vzniklý přímo fotosyntézou s vyžitím slunečního záření pak označujeme jako primární biomasu a dále ho můžeme rozdělit na fytomasu, dendromasu a ostatní biomasu. Fytomasa představuje obecně zemědělskou biomasu a její zbytky. Dendromasou je pak myšlena dřevní biomasa (z lesnického průmyslu) a její zbytky, které definuje nařízení vlády 189/2018. Ostatní biomasa představuje zbytky z průmyslu potravinářského, papírenského atp. Organické produkty vzniklé v důsledku přeměny nebo rozkladu ve vyšších organismech (zvířata) bez přímého působení slunce (hnůj, exkrementy, nebo tělesné schránky po zvířatech) nazýváme sekundární biomasou (Kaltschmitt et al., 2009; Vobořil, 2017).

Obrázek 1 Rozdělení biomasy podle vzniku



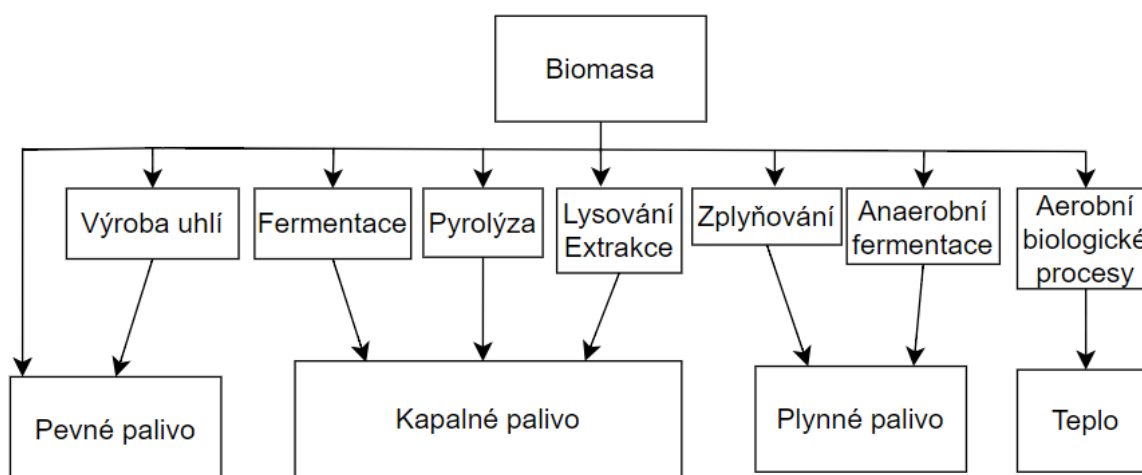
Upraveno podle Kaltschmitt et al., 2009

Biomasa lze dále dělit podle okolností jejího vzniku na biomasu pěstovanou pro energetické využití (cukrová řepa, obilí, brambory pěstované pro výrobu etanolu, olejniny, nebo rychle rostoucí dřeviny) a odpadní biomasu (sláma, listí, prořezy parků či lesů).

Další možnost rozdělení je dle obsahu vody, který je důležitý zejména při volbě technologie energetického využití biomasy. Ta se dělí na suchou (dřevní hmota, sláma atp.) a mokrou (tekuté zvířecí exkrementy nebo čistírenské kaly).

Biomasa je zpracovávána mnoha způsoby, vhodný způsob je vždy závislý na žádaném výsledném produktu. Možné způsoby zpracování biomasy jsou znázorněny na obr. 2. Toto schéma znázorňuje způsoby zpracování biomasy podle výsledného produktu, kterým jsou paliva pevná, kapalná a plynná anebo teplo.

Obrázek 2 Možné způsoby využití biomasy podle výstupního produktu



Zdroj: upraveno podle Tauchman, 2007

4.2.1 Procesy zpracování biomasy

Termické zpracování biomasy

Spalování

Spalování je nejzákladnějším zpracováním biomasy pro získání energie. Při spalování dochází k exotermickým chemickým reakcím, jedná se o oxidaci biomasy, která probíhá za dostatečného přístupu kyslíku, díky kterému dochází k dokonalému spalování, při kterém se uvolňuje velké množství tepla (Ochodek et al., 2007; Jakubes et al., 2006).

Karbonizace

Karbonizace je jednou z termických přeměn, jimiž se vyrábí dřevěné uhlí. Oproti spalování tento proces probíhá za nepřístupu vzduchu, dochází k odstranění těkavých složek a výsledný produkt má zvýšený obsah uhlíku a koncentrace kyslíku a vodíku je snížena (Ochodek, et al., 2007; Jakubes et al., 2006).

Pyrolýza

Stejně jako karbonizace probíhá i pyrolýza za nepřístupu vzduchu. Při jejím procesu dochází k rozkladu organických látek na stálé nízkomolekulární produkty a tuhý zbytek. Pyrolýza probíhá buď za teploty do 500 °C jako nízkoteplotní pyrolýza, nebo od 500-800 °C jako středněteplotní, nebo jako vysokoteplotní pyrolýza, a to za teplot vyšších než 800 °C. Při tomto procesu může vznikat více produktů v plynném pevném i kapalném skupenství, tak mohou být vytvořeny produkty pyrolýzy z jakýchkoliv organických materiálů (Vobořil, 2017; Jakubes et al., 2006).

Jednou z nových technologií, které mají velký potenciál, je tzv. rychlá pyrolýza. Rychlou pyrolýzou se zpracovává převážně dendromasa, ale je možné zpracovat i další odpadní biomasu. Proces začíná rychlým dodáním tepla do materiálu a následným udržením teploty (450–600 °C) v pyrolýzním reaktoru. V reaktoru zůstane materiál po dobu asi 2 sekund v reakční zóně. Produkty rychlé pyrolýzy jsou páry a aerosoly doprovázené plynem a pevnými částmi. Produkty se následně ochlazují a dochází ke kondenzaci, čímž vzniká látka o nízké viskozitě nazývaná bioolej (Ochodek et al., 2007; Jakubes et al., 2006).

Zplynování

Podstatou technologie zplynování je vytváření plynu. Konkrétně vytváření plynu z organických materiálů. Zplynování se skládá z více procesů, z nichž hlavními jsou sušení, pyrolýza, oxidace a redukce. V první fázi se palivo ohřeje a suší ($t=150\text{ °C}$). Druhou fází je

pyrolýza ($t=300-500\text{ }^{\circ}\text{C}$), palivo je podrobno tepelnému rozkladu na plynné složky, kondenzující látky, polokoks a následné štěpení par na pevný uhlík a plyn. Poslední fází je redukce ($t=700-1100\text{ }^{\circ}\text{C}$), při té nastává zplynování pevného uhlíku párou nebo oxidem uhličitým (Ochodek et al., 2007; Jakubes et al., 2006).

Katalytické zkapalňování

Katalytické zkapalňování označované také jako hydrolýza je nízkoteplotní ($t=300-350\text{ }^{\circ}\text{C}$) a vysokotlaký proces (12-20 MPa), který dokáže produkovat kvalitní bioolej se sníženým obsahem kyslíku a vyšší energetickou hustotou. Dalším produktem je voda, která obsahuje rozpustné organické látky (Ochodek et al., 2007).

Biochemické procesy

Anaerobní fermentace

Anaerobní fermentace nebo také anaerobní digesce či vyhnívání je jedním z hlavních procesů biochemické přeměny biomasy. Jedná se hlavně o zpracování biologicky rozložitelných složek komunálního odpadu, čistírenských kalů, složek zvířecích exkrementů bez přístupu vzduchu při teplotě $35-45\text{ }^{\circ}\text{C}$. Hlavními produkty jsou pak bioplyn a digestát (Ochodek et al., 2007).

Fermentace

Fermentace nebo také alkoholová fermentace je založena na principu kvašení glukózy. Mezi hlavní podmínky správného průběhu kvašení patří teplota $27-32\text{ }^{\circ}\text{C}$, hodnota pH 4–6, obsah růstových látek, koncentrace a aktivita kvasinek, přítomnost kontaminace, koncentrace rozpuštěného kyslíku atd. Produktem je pak etanol, který se hojně využívá v potravinářském průmyslu, ale pro jeho energetické vlastnosti je využitelný i jako příměs do paliv pro spalovací motory (Jakubes et al., 2006).

Fyzikálně-chemické procesy

Esterifikace

Esterifikace je technologie zpracování olejnatých rostlin za účelem získání rostlinných olejů. Proces probíhá ve dvou stupních, prvním je ohřev semen rostlin na teplotu $80-90\text{ }^{\circ}\text{C}$, semena se následně namelou a lisují, tím je získáno asi 50 % oleje obsaženého v rostlinách, ten se dále separuje pomocí rozpouštědel v extraktoru (Jakubes et al., 2006).

4.3 Zplyňování – charakteristika problematiky

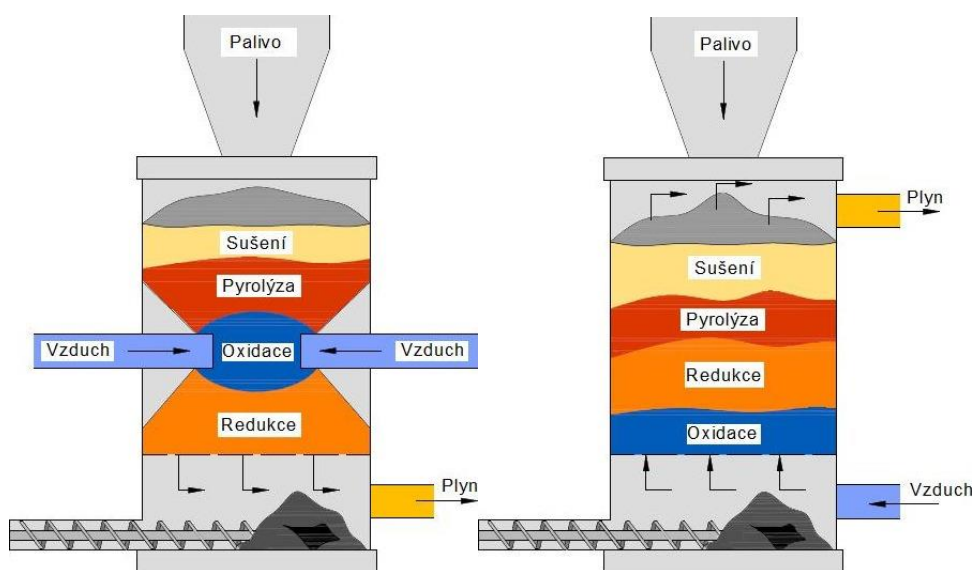
Zplyňování je technologie co možná nejúplnější termické přeměny vstupního paliva pevného či kapalného skupenství na palivo skupenství plynného působením zplyňovacího média. Při dokonalé přeměně lze získat stejné množství energetického obsahu generátorového plynu, jako byl energetický obsah vstupního paliva.

Zplyňováním je myšlena termochemická přeměna uhlíkatého materiálu v pevném či kapalném skupenství na výhřevný energetický plyn pomocí zplyňovacích médií a tepla. Produktem je plyn obsahující výhřevné složky (H_2 , CO , CH_4 a další minoritní sloučeniny), doprovodné složky (CO_2 , H_2O , N_2) a znečišťující složky (dehet, prach, sloučeniny síry, chlóru, alkálie a další) (Pohořelý et al., 2010).

„Pro zplyňování je vhodná suchá biomasa, v ideálním případě s nízkým obsahem popelovin a sulfidů (sloučenin síry). Palivo se vysušuje při teplotě do $200\text{ }^\circ\text{C}$, přitom dochází k odpařování vody vázané v palivu. Sušení potřebuje velké množství tepla pro zajištění optimální vlhkosti paliva 15 %“ (Peer a Friedel, 2016, s. 2). „Požadavky se různí u konkrétních generátorů. Výsledným produktem zplyňování je pak generátorový plyn, jehož výhřevnost se pohybuje v rozmezí $4\text{--}7\text{ MJ}\cdot\text{m}^3$ “ (Najser a Kyjovský, 2007, s. 149).

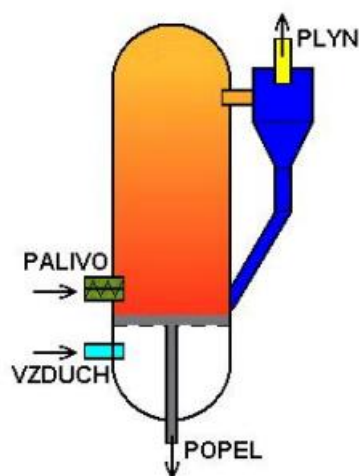
Zplyňování je komplexní proces, jehož součástí je celá řada reakcí. Nejvýznamnějšími činiteli jsou pak tyto čtyři: sušení, pyrolýza, redukce a oxidace. Během zplyňování probíhají tyto procesy buď postupně při použití sesuvných generátorů (viz obr. 3) nebo se odehrávají souběžně, a to v generátorech s fluidním ložem (viz obr. 4).

Obrázek 3 Schéma dvou různých typů sesuvných generátorů (souproutý a protiproudý reaktor)



Zdroj: Peer a Friedel, 2016

Obrázek 4 Schéma generátoru s fluidním ložem

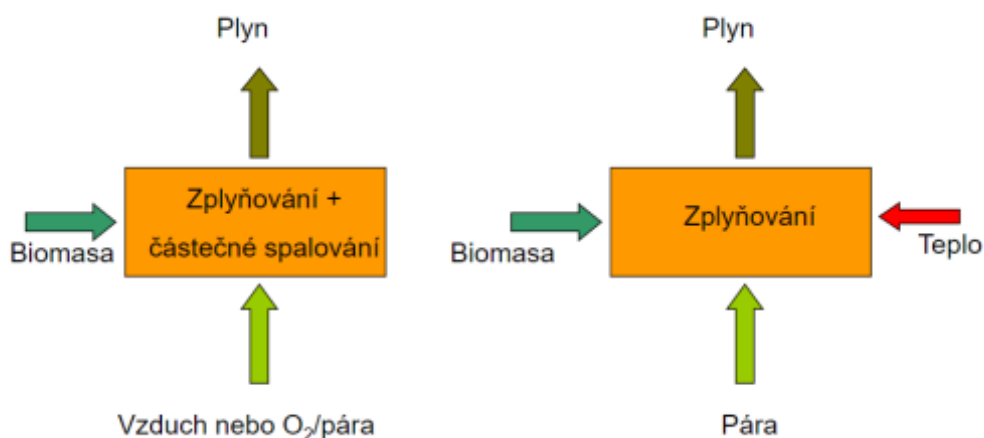


Zdroj: Najser a Kyjovský, 2007, s. 148

První tři procesy, tj. sušení, pyrolýza a redukce, jsou endotermní (spotřebovávají teplo). Potřebné teplo může být získáno přímo v reaktoru oxidací (hořením) části paliva, nebo může být přivedeno z okolního prostředí (Pohořelý et al., 2010).

První způsob, tedy spalování části paliva pro pokrytí potřebného tepla pro endotermní reakce, se nazývá *autotermní* nebo také *přímé zplyňování*. Druhý způsob, přivedení potřebného tepla z okolí reaktoru, je pak nazýván *alotermní* neboli *nepřímé zplyňování*. Rozdíl je znázorněn i na obr. 5.

Obrázek 5 Principy zplyňování dle zásobování tepla vlevo autotermní, vpravo alotermní způsob



Zdroj: Pohořelý et al., 2012, s. 265

Palivem pro technologii zplyňování může být teoreticky jakýkoliv materiál obsahující uhlík. Já se v této práci zaměřím však na ten nejdostupnější a nejčastěji využívaný materiál, hovoříme-li o získávání energie, a tím je biomasa. V teoretické části se práce orientuje na popis

samotné technologie, tedy jak vypadají jednotlivé typy generátorů, jaké jsou požadavky na kvalitu vstupních materiálů, jak probíhá jejich zpracování a jakou kvalitu má pak výstupní produkt – generátorový plyn (GP). V druhé části práce popisuje konkrétní vstupní materiály a jejich vhodnost pro tuto formu energetického zpracování. V tomto případě se jedná o odpadní piliny a hobliny z dřevovýroby a slámu jako odpad z úpravy zatravněné plochy.

4.4 Historie zplyňování

V této práci se věnuji energetickému zpracování biomasy. Popis toho, co to biomasa je a jaké jsou její vlastnosti, obsahuje následující kapitola. Zplyňováním biomasy vzniká nízko výhřevný plyn, který se dá dále zpracovat na výrobu energie elektrické a tepelné nebo může být palivem pro spalovací motory (Larsson, 2021).

První patent na technologii zplyňování získal Robert Gardner v roce 1788. K praktickému využití došlo o čtyři roky později Wiliamem Murdochem, který s pomocí energie získané spalováním GP zajistil energii pro osvětlení svého domu (Peer a Friedel, 2016).

Za první úspěšnou konstrukci zplyňovacího reaktoru můžeme pak považovat vynález bratří Siemensů patentovaný v roce 1861. O 15 let později sestrojil Nicolas August Otto první čtyřtákní motor a ten byl poháněn plynem generovaným z uhlí. Z této historie se nám dochoval pojem „plynový pedál“ (Peer a Friedel, 2016).

V roce 1922 německý výzkumník Winkler vyvinul fluidní zplyňovací generátor zpracovávající uhelný prach. O rok později si francouzský inženýr Imbert nechal patentovat souproudý zplyňovací reaktor. První tlakový reaktor s pohyblivým ložem představila firma Lurgi v roce 1931 a pánové Koppers a Torzek v 1941 pak vyvinuli reaktor s unášivým ložem (lože nesená proudem plynu) (Peer a Friedel, 2016).

Z důvodu nedostatku pohonných hmot se jako palivo hojně užíval GP za druhé světové války, nemálo automobilů bylo poháněno zplyňovacím kotlem napojeným na spalovací motor. Fenomén zplyňování po konci 2. světové války upadá zvýšenou dostupností ropy a ani během ropných krizí se význam zplyňovací technologie nevrátil k předválečné popularitě.

4.5 Generátorový plyn

Jednoduše můžeme složky plynu pojmenovat dle jejich vlivu na vlastnosti produkovaného plynu:

- žádané (výhřevné) složky: CO, H₂, CH₄,
- balastní (doprovodné) složky: N₂, CO₂, H₂O,

- nežádoucí (znečišťující) složky: tuhé znečišťující látky (TZL), dehet, sloučeniny síry, sloučeniny dusíku, sloučeniny chlóru a další alkalické sloučeniny.

Při využití GP jsou problematické znečišťující látky. Při zplynování biomasy jsou spíše v minoritním zastoupení, ale přesto je žádoucí, aby byl jejich obsah co nejmenší. Seznam znečišťujících látek, jejich zastoupení v GP, jejich nežádoucí vliv a možnost odstranění je vyobrazeno na obr 6.

Obrázek 6 Složky plynu ze zplynování dendromasy vzduchem, vodní párou a paro-kyslíkovou směsí

Parametr	Zplynování vzduchem	Zplynování parou (alotermní)	Zplynování paro-kyslíkovou směsí (autotermní)
Výhřevnost [MJ m ⁻³]	4–6	12–14	12–15
H ₂ [%]	11–16	35–40	25–30
CO [%]	13–18	25–30	30–35
CO ₂ [%]	12–16	20–25	23–28
CH ₄ [%]	3–6	9–11	8–10
N ₂ [%]	45–60	<1	<1

Zdroj: upraveno podle Pohořelý et al., 2012

Jedním z typů nežádoucích látek jsou „tuhé nežádoucí látky“ (TZL), nebo taky tuhé zbytky nezplyněného paliva – anorganické složky paliva jinak taky popeloviny a u fluidního typu zplynování materiál fluidní vrstvy. Problém může vzniknout, když se TZL zkombinují s kondenzujícím dehtem během chladnutí GP, v tu chvíli může docházet k aglomeraci TZL s dehtem a na kontaktních plochách se vytváří nánosy tzv. fouling (Ochodek a Najser, 2014).

Dle Kohouta a Baláše (2005) můžeme název „dehty“ obecně popsat jako vyšší složité uhlovodíkové sloučeniny. Zbylé znečišťující látky jsou pro tuto práci dostatečně popsány na obr 7.

Obrázek 7 Příklady znečišťujících látek GP a možnosti jejich odstranění

	Příklady	Problémy	Způsoby čištění
TZL	popel, biochar, inerty fluidní vrstvy	vymílání	filtrace, cyklóny, mokré čištění (pračky)
Alkálie	sloučeniny uhličitanu sodného (Na_2CO_3) a	vymílání, koroze	keramické filtry, adsorpce
Dehty	organické molekuly o vysoké molární hmotnosti	usazování, fouling	mokré vypírání, tepelný a katalytický rozklad
Sloučeniny dusíku	amoniak (NH_3), kyanovodík (HCN)	koroze, degradace mazacího oleje, emise NO_x	mokré vypírání, katalytický rozklad
Sloučeniny síry	sulfan (H_2S)	koroze, degradace mazacího oleje, emise SO_x	adsorpce (mokrý vypírka), adsorpce
Sloučeniny chlóru	chlorovodík (HCl)	koroze, degradace mazacího oleje, katalytický jed	adsorpce (mokrý vypírka), adsorpce

Zdroj: Upraveno z Kubiček, 2004, s. 71-75

4.5.1 Čištění generátorového plynu

Plyn produkovaný zplyňovacím generátorem můžeme označit jako surový plyn. Teplota plynu se pohybuje v řádu stovek stupňů Celsia, podle konkrétní metody, a obsahuje výše zmíněné nežádoucí látky. Pro následné použití plynu jako paliva na výrobu elektrické energie je nutné plyn chladit a čistit. Plyn je možné spalovat v na kvalitu nenáročném kotli, ve spalovacím motoru, v plynové turbíně ale i v technologii palivových článků, chronologicky se u těchto technologií zvyšují nároky na čistotu plynu, kdy technologie palivových článků je v tomto ohledu nejnáročnější, což vyplývá z obr. 8 Ochodek a Najser, 2014). Konkrétní požadavky na čistotu energoplynu pro dané zařízení však uvádí vždy dodavatel, obr. 8. udává hodnoty spíše orientační

Obrázek 8 Nejvyšší přípustné koncentrace znečišťujících složek

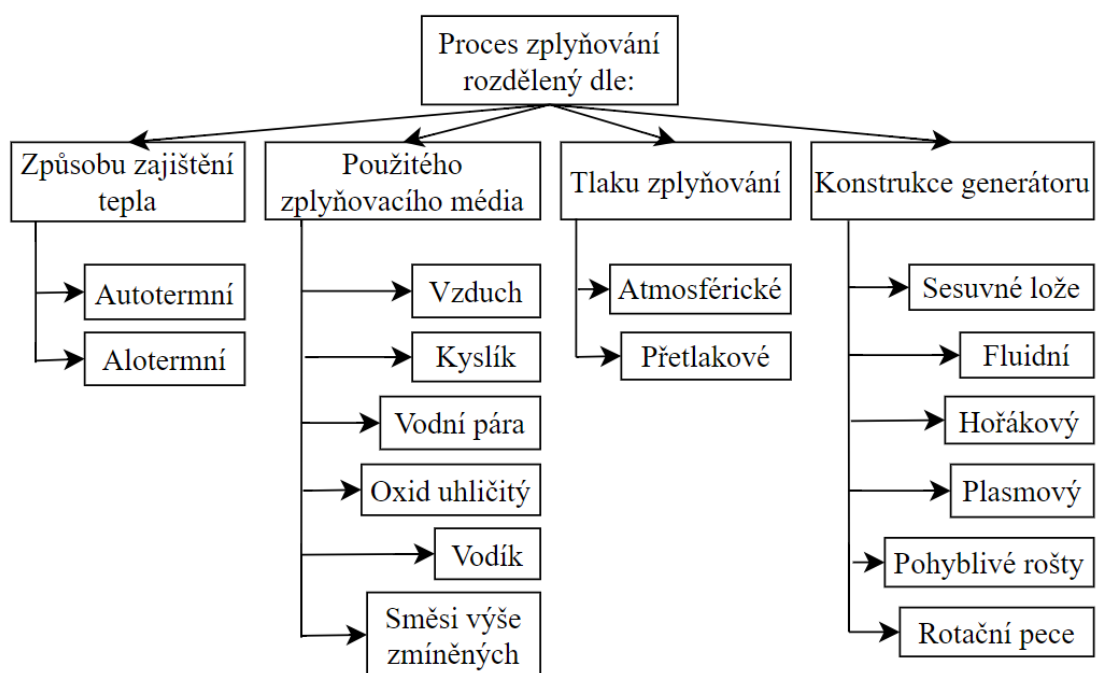
Typ zařízení	Nejvyšší přípustné koncentrace znečišťujících složek								
	Dehet	TZL	Velikost částic	HCl	Sloučeniny síry	NH ₃	Na	K	Alkalické kovy
Plynový kotel	bez problému								
Spalovací motor	< 100 mg/m ³	< 50 mg/m ³	< 10 μm	-	-	-	-	-	-
	< 50 mg/m ³	< 50 mg/m ³	-	-	-	-	-	-	-
Plynová turbína	< 5 mg/m ³	< 1 ppm	-	< 0,5 ppm	< 1 ppm	-	< 1 ppm	< 1 ppm	< 1 ppm
	0 ppm	< 30 mg/m ³	< 5 μm	-	-	-	-	-	< 0,24 mg/m ³
	0 ppm	< 10 ppm	< 10 μm	-	-	-	-	-	< 0,2 ppm
Palivový článek	PEMFC	0 ppm	velmi nízká	-	-	-	-	-	-
	PAFC	0 ppm	velmi nízká	-	-	-	-	-	-
	MCFC	0 ppm	< 100 ppm	< 1 μm	-	-	-	-	< 10 ppm
	SOFC	-	-	< 1 μm	< 1 ppm	< 1 ppm	< 5000 ppm	-	-

Zdroj: Ochodek a Najser, 2014

4.6 Základní rozdělení zplynovacích procesů

Zplyňování můžeme rozdělit několika způsoby (viz obr. 9) podle toho, jakým způsobem zajišťujeme v procesu teplo, podle média, které nám umožňuje zplyňovat biomasu, podle tlaku, ve kterém proces probíhá nebo podle samotné konstrukce generátoru.

Obrázek 9 Rozdělení zplyňovacích procesů



Zdroj: Ochodek a Najser, 2014

4.7 Způsob zajištění tepla

Způsob zásobování zplyňovacího procesu teplem dělíme na autotermní a alotermní. Při autotermním procesu dochází k částečnému spalování vstupní biomasy pro pokrytí sušení a tepelných potřeb endotermických reakcí. Pro umožnění část spalování je nutná přítomnost molekulárního (volného) kyslíku ve zplyňovacím médiu. Při alotermním způsobu zplyňování je potřebné teplo dodáváno externě do generátoru, není tedy potřeba částečného spalování biomasy. Teplo je možno externě dodávat více způsoby. Jedním způsobem je nepřímý ohřev teplosměnné plochy pomocí teplosměnného média, nebo dodáváním ohřátého inertního materiálu, kterým může být písek, nebo popel fluidní vrstvy. Dalším způsobem je i přivedení tepla pomocí vstupních materiálů, tedy předehřátím zplyňovacího média.

4.8 Použité zplyňovací médium

Na obr. 9 jsou zobrazené varianty plynů, které se využívají jako zplyňovací médium (ZM). Můžeme je ale rozdělit ještě do podskupin s volným kyslíkem (vzduch a O_2), vázaným kyslíkem (vodní pára a CO_2) a vodíkem. Rozdělení je pro nás důležité v souvislosti s dodáváním tepla. Zplyňovací médium s volným kyslíkem je určeno přirozeně pro autotermní

zplyňování a pro aloternní je užíváno medií s vázaným kyslíkem. U medií s vázaným kyslíkem je tedy nutné externě dodávat potřebné teplo, způsoby dodávání již byly výše popsány.

„Zplyňování čistým kyslíkem za použití tlaku nebo kombinací kyslíku a tlaku s vodní párou má výhodu hlavně v nižším obsahu dusíku, který je v případě GP odpadem. Při zplyňování kyslíkem lze u GP dosáhnout hodnot od 14–18 MJ.m³“ (Najser a Kyjovský, 2007, s. 149).

„Zplyňování vodní párou zapříčiňuje tvorbu produktů reakce vodního plynu a heterogenní metanizace, kde nezreagovaná vodní pára má možnost kondenzovat při chlazení GP, čímž se zvýší koncentrace výhřevných plynů, neboť předehříváním reakční vodní páry na odcházejícím popelu se využije jeho odpadní fyzické teplo. Výhřevnost GP je typická 4-7 MJ.m⁻³“ (Najser a Kyjovský, 2007, s. 149). V případě reakce s vodní párou je nutno dodávat teplo. Technologie je zastaralá a dnes se prakticky nepoužívá (ČVUT, 2020).

4.9 Použitý tlak

Při zplyňování se používá jak tlak atmosférický, tak přetlakové prostředí. Způsoby použití a vlastnosti jednotlivých prostředích jsou již popsány v předchozích kapitolách nebo je vysvětlí kapitola následující.

4.10 Základní konstrukce generátorů

K základním konstrukcím generátorů patří generátory se sesuvnou vrstvou, fluidní generátory, hořákové generátory a zařízení s integrovaným zplyňováním.

Zplyňovací generátory se sesuvnou vrstvou

Zplyňovací reaktor se sesuvnou pevnou vrstvou je jedním z nejpoužívanějších typů reaktorů. Máme-li hovořit o nejvíce používaných reaktorech, jedná se o souproutý a protiproutý generátor (PG) (viz obr. 3). Liší se v již v maximálním přípustném obsahu vody v palivu, u protiproutého je vyšší. Souproutý generátor (SG) má naopak tu výhodu, že GP produkovaný SG má nižší obsah dehtu, díky tomu je vhodnější pro použití ve spalovacích motorech. U PG je obsah dehtu v GP v rozmezí 5–20 %, což je pro použití ve spalovacích motorech nežádoucí a je nutné ho před použitím vyčistit (Reed a Das, 1988).

Protiprouté autotermní generátory fungují tak, jak z předchozího popisu vyplývá, že palivo je přiváděno v horní části generátoru a postupně prochází jednotlivými fázemi procesu zplyňování – tedy sušení, pyrolýza, redukce a naposledy oxidace materiálu. Proti proudu paliva

je ve spodní části pod roštem přiváděno zplyňovací médium (vzduch), který okysličuje palivo ve zplyňovací zóně, tam dochází ke spalování nezreagovaného uhlíku ze zóny redukční fáze. Teplo vytvořené spalováním je využito při endotermních reakcích v horní části generátoru (redukce, pyrolýza a sušení). Velký obsah dehtu je způsoben přechodem pyrolýzních olejů do GP, zapříčiněno je to posloupností jednotlivých reakcí, generátorový plyn je tedy nucen stoupat vzhůru (Reed a Das, 1988).

U souproudého generátoru je produkce dehtů výrazně nižší než u ostatních generátorů. Je to způsobeno konstrukčním uspořádáním generátoru. Od protiproudého generátoru se jeho konstrukční uspořádání liší tím, že redukce nastává až po oxidační fázi (Ochodek a Najser, 2014).

Tím že oxidační oblast je hned za pyrolýzní, je dosaženo nižšího obsahu dehtů. Pyrolýzní oleje jsou v oxidační oblasti spalovány, a tak se nemísí s GP (Reed a Das, 1988).

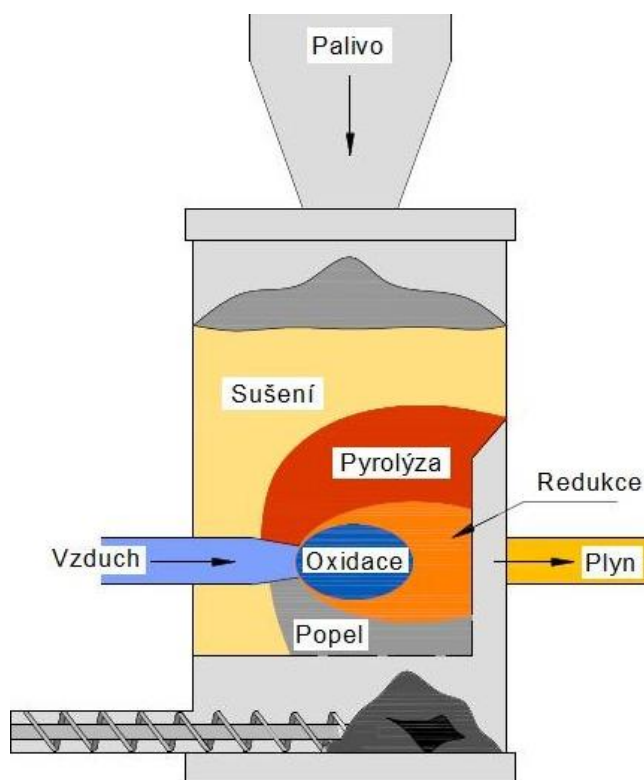
Teplota generátorového plynu vystupujícího z pod roštu se může pohybovat okolo 800 °C. Z toho důvodu je generátor většinou dvouplášťový, aby část tepla GP byla použita v rámci endotermních reakcí. Přesto je i po tomto využití teplota GP velmi vysoká a dochází tedy ke zchlazení, v tu chvíli se stává s teploty plynu odpadní teplo a tím je možné vyjádřit ztrátu a tedy nižší účinnost (Reed a Das, 1988).

Souproudé generátory vyžadují vlhkost paliva nižší než 20 %, jinak se zvyšuje obsah dehtů v palivu (Beňo et al., 2008).

Dalším typem je generátor s křížovým tokem, palivo je přiváděno podobným způsobem jako u předešlých dvou typů, ale vzduch je vedený jedinou tryskou, proudí skrz palivo a biochar¹. Okolo trysky je oxidační zóna a tu obklopuje zóna pyrolýzní, kromě části směru proudění zplyňovacího média, tam se nachází redukční zóna. V relativně malé oxidační zóně je dosahováno vysokých teplot, tím dochází k nízké produkci dehtů. Pyrolyzovaná část paliva a sušená biomasa je pro plášť generátoru izolací od žáru v oxidační zóně, schéma generátoru je znázorněno na obr. 10.

¹ Biochar nebo také biouhel – jedná se o produkt zplyňování – zbytek po zplynění materiálu

Obrázek 10 Schéma reaktoru s křížovým tokem



Zdroj: Peer a Friedel, 2016

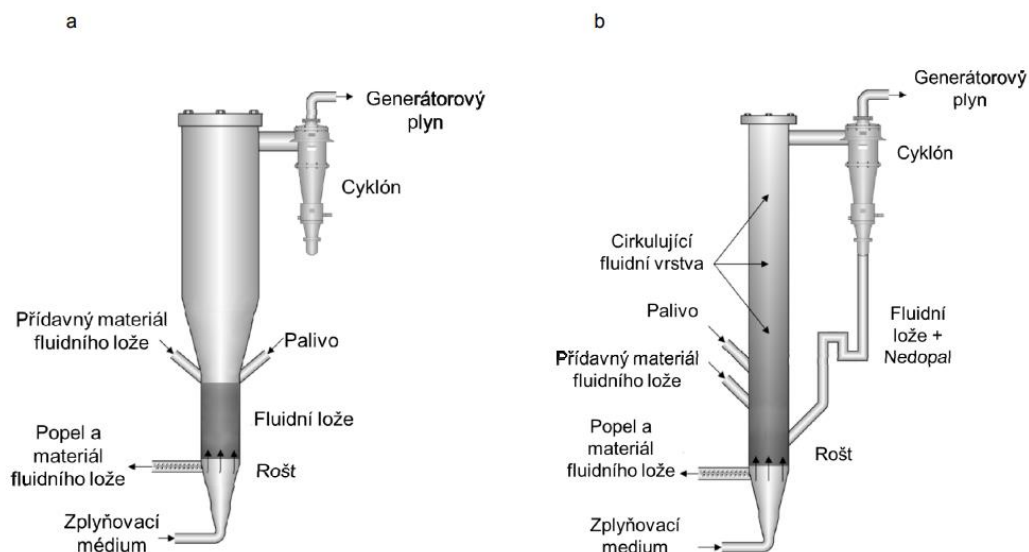
Fluidní generátory

Jiným typem, než jsou předchozí generátory, je tzv fluidní generátor (viz obr. 11), kde proces zplynování využívá fluidní vrstvy, která se skládá z inertních materiálů, u zplynování biomasy se většinou jedná o písek a paliva. Samotný generátor je obvykle tvořen válcovou nádobou s roštem, nazývaným taky distributorem. Skrz rošt je přiváděno zplyňovací médium, které zároveň pomáhá vznášení paliva a inertních částí fluidního procesu. Hlavním rozdílem od předchozích typů je skutečnost, že zde probíhají všechny fáze zplynování na každé části paliva zároveň nikoliv postupně a v různých částech reaktoru.

„Typické teploty pro zplyňování ve fluidním loži jsou u biomasy v rozmezí 750-950 °C. Vyšší teploty jsou žádoucí pro minimalizaci množství dehtu v plynu, nesmí ovšem být překročena teplota měknutí popela, neboť by docházelo k aglomeraci částic, zvětšování jejich objemu a hmotnosti, což by mělo za následek slepení částic vrstvy, její defluidaci a následné provozní problémy“ (Pohořelý et al., 2012, s. 268).

Generátory s fluidní vrstvou jsou oproti jiným typům zplyňovacích reaktorů technologicky pokročilé. Vzájemné promíchání fluidní vrstvy je rychlé a tím je zaručena rovnoměrná distribuce tepla v reaktoru. Díky skvělým vlastnostem technologie reaktoru lze zplyňovat palivo s proměnlivou vlhkostí a s vyšším obsahem popela (Pohořelý et al., 2012).

Obrázek 11 Generátory se stacionární (a) s cirkulující, (b) s fluidní vrstvou



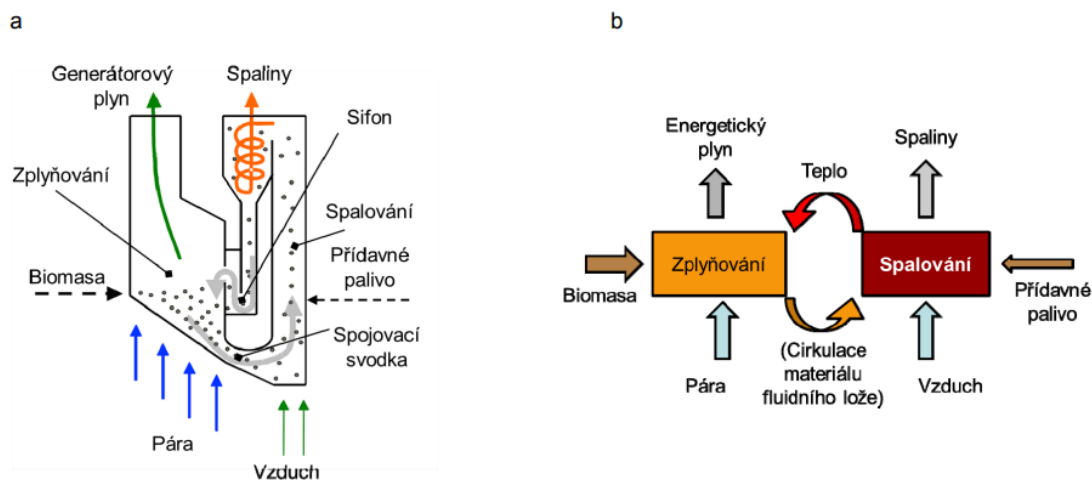
Zdroj: Pohořelý et. al., 2012, s. 268

Fluidní generátory se dělí podle rychlosti proudění plynu a z toho vyplývají i konstrukční odlišnosti, které můžeme pojmenovat jako generátory se stacionární fluidní vrstvou (rychlost proudění $0,5\text{--}3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) a na generátory s cirkulující vrstvou ($3\text{--}10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) (Pohořelý et al., 2012), jak je znázorněno na obr. 9.

V generátorech s cirkulující vrstvou je lože s jemnějšími částicemi paliva recirkulováno, zatímco větší částice setrvávají v loži déle. Tato recirkulace se projevuje v nižším podílu nedopalu, větší rychlosti proudění a ve vyšším objemovém výkonu (Higman a Van der Burgt, 2008; Knoef a Sánchez Angrill, 2012).

S podstatou fluidního generátoru pracuje i proces FICFB (viz obr. 12), který fyzicky odděluje zplyňovací a spalovací reakce a tím získá plyn s velmi nízkým obsahem dusíku.

Obrázek 12 průběh zplyňování v reaktoru FICFB (a) Přenos tepla fluidní vrstvou v reaktoru FICFB (b)



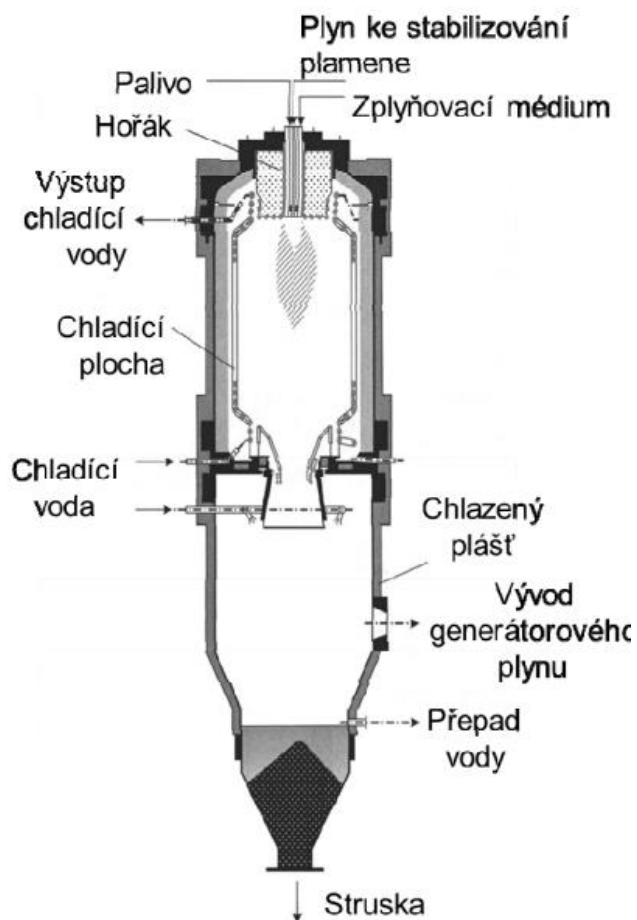
Zdroj: podle Hofbauer, 2016, s. 3

Biomasa vstupuje do prvního zplyňovacího reaktoru, kde je vysušena, odplyněna, a přeměněna na CO, CO₂, CH₄, H₂, vodní páru a dehty. Zároveň probíhají reakce s vodní parou. Zplyňovací a spalovací prostor je propojen svodkou, kterou je transportován materiál fluidní vrstvy se zbytky uhlíku do spalovacího prostoru, kde je téměř všechen zbývající uhlík spálen. Ohřátý materiál fluidní vrstvy je oddělen od spalin na cyklónu a dávkován přes fluidní sifón zpět do zplyňovací části. Potřebné teplo k ohřátí fluidní vrstvy je získáno spálením zbytku uhlíku a regulováno částečnou recirkulací vyrobeného energetického plynu do spalovací části nebo přidáním dalšího paliva. Ve zplyňovací části je fluidačním médiem vodní pára a ve spalovací části vzduch. Teplo potřebné ke zplynění biomasy v prvním reaktoru je procesu dodáváno cirkulací materiálu fluidní vrstvy ze spalovací části a přes společnou teplosměnnou plochu spalovací a zplyňovací části (Hofbauer et al., 2003).

Hořákové generátory

Hořákové generátory (viz obr. 13) pracují s vysokými teplotami přibližně 1300-1600 °C, za těchto teplot je popel již v kapalně formě a odchází z generátoru ve formě strusky. Proces využívá nejen vysokých teplot, ale i vysokých tlaků 2–7 MPa a palivo zplyňované obvykle směsí vodní páry a kyslíku se v zdrží v generátoru jen na krátkou dobu (Higman a Van der Burgt, 2008).

Obrázek 13 Schéma hořákového generátoru



Zdroj: Higman a Van der Burgt, 2008

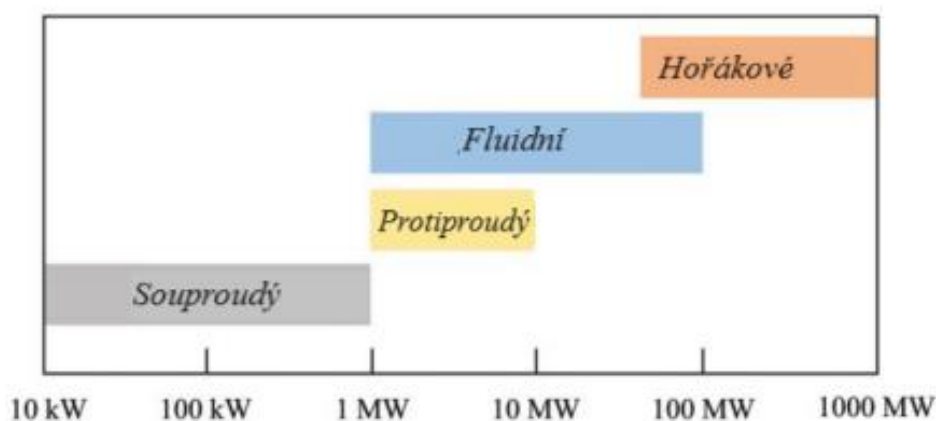
Proces využívá vysokých tlaků, protože je plyn vzniklý tímto způsobem zplynování dále využíván v technologiích pracujících za tlaku (např. výroba amoniaku, metanolu). Komprese paliva je díky menšímu objemu levnější, než kdyby se stlačoval následně vzniklý plyn, a díky vysokým teplotám je mimo jiné dosaženo i vysoké čistoty plynu, plyn téměř neobsahuje nižší uhlovodíky ani dehet (Knoef a Sánchez Angrill, 2012).

Na druhou stranu jsou ale tyto generátory zvláště citlivé na volbu paliva, které se do generátoru přivádí ve formě suspenze nebo prášku (Olofsson et al., 2005). Hořákovému generátoru nevdá ani velmi popelnatá paliva, avšak musí být upravena na velikost částic pod 100 μm , což je technicky možné např. u uhlí a samozřejmě u kapalných paliv, ale u biomasy, která má vláknitou strukturu, je tato podmínka zásadní překážkou její přímé aplikace (Mediavilla et al., 2009).

V praxi se pak biomasa termicky upravuje, aby bylo palivo vhodné pro tento typ generátoru (Pohořelý, 2012).

Na obr. 14 je zobrazeno porovnání jednotlivých základních typů generátorů podle tepelného příkonu, z čehož se dá odhadnout vhodnost pro různé úrovně použití. Lépe tak vidíme, že pro malou městskou část bude vhodný souproudý nebo protiproudý generátor, ale určitě ne hořákový typ generátoru, ten jak již bylo výše zmíněno, bude vhodný pro větší chemický provoz.

Obrázek 14 Grafické rozdělení základních typů generátorů dle tepelného příkonu

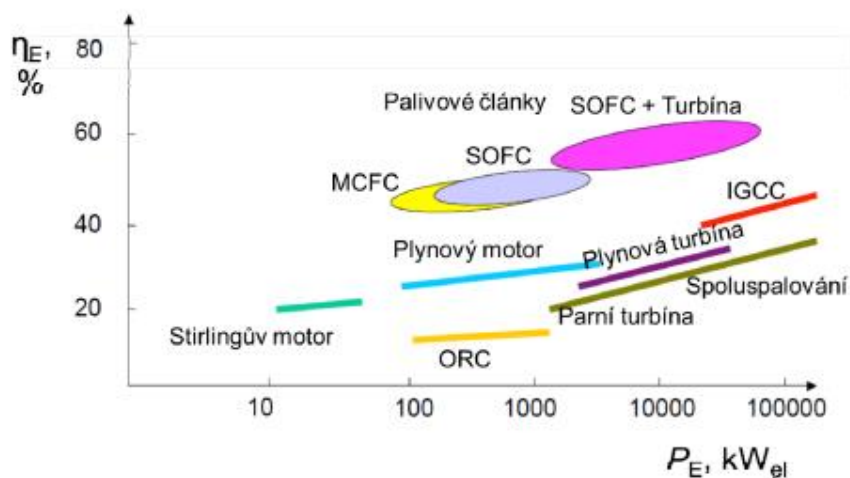


Zdroj: upraveno podle Tiango et al., 1996

Zařízení s integrovaným zplyňováním

Zplyňovací generátor je možné nakombinovat přímo se zařízením, které přemění energii uchovanou v GP na elektrickou energii a energii tepelnou. Taková linka představuje technologicky energetický celek, který zjednodušeně musí obsahovat tyto části: zásobník paliva, sušárnu, zásobník suchého paliva, zplyňovací generátor, chlazení a čištění GP a plynový motor a plynovou turbínu nebo palivové články (Pohořelý et al., 2012) a elektrický generátor. Na obr. 15 je zobrazena teoretická účinnost jednotlivých generátorů.

Obrázek 15 Přehled jednotlivých technologií pro kogenerační výrobu elektřiny a tepla spolu s jejich orientační účinností (η_E) a výkonovým měřítkem



Zdroj: Pohořelý et al., 2012, s. 271

V současnosti je nejvíce užívanou formou zpracování GP ze zplynování biomasy na výrobu elektřiny plynový motor napojený na elektrický generátor. Pro bezproblémový chod motoru je nutné z plynu odstranit nečistoty, hlavně snížit množství dehtu v plynu pod 100 mg.m^{-3} a odprášit plyn na hodnoty koncentrace pevných částic pod 5 mg.m^{-3} (Skoblia et al., 2006).

Při použití spalovacích turbín pro výrobu elektřiny z GP narážíme na vysoké nároky na kvalitu plynu a vysoké náklady na počáteční investice na výstavbu zařízení pro čištění generátorového plynu. Tedy jejich použití je zatím jen teoretické.

Palivové články jsou schopné měnit chemickou energii na energii elektrickou. Tyto články jsou v zásadě schopné dosahovat vyšší účinnosti přeměny energie paliv na elektrickou energii než konvenční termické systémy se spalováním paliv a tepelnými motory pro přeměnu tepla na elektrickou energii. U vysokoteplotních palivových článků pracujících za teplot nad $600 \text{ }^\circ\text{C}$ byly doposud vyvinuty dva základní typy: palivový článek využívající jako elektrolyt roztavenou směs alkalických uhličitánů (tzv. molten carbonate fuel cell – MCFC) a pracující za teplot nejčastěji okolo $650 \text{ }^\circ\text{C}$ a palivový článek s pevným oxidovým elektrolytem, tj. palivový článek s pevnými stabilními oxidy (tzv. solid oxide fuel cell – SOFC) pracující za teplot 700 až $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ (Svoboda et al., 2003).

5 Analýza vybraných vzorků

V rámci analýzy byly vybrány vzorky dřevních pilin, konkrétně vzorky pilin ze smrku, dále vzorky sena z úpravy travnatých ploch a pak vzorky prachu z podlahy haly, kde se tyto suroviny suší, a to z toho důvodu, aby se dal odhadnout vliv obsahu tohoto vzorku na kvalitu pilin a sena jako paliva pro technologii zplynování.

5.1 Návrh zplyňovací linky

Jako navrhovaná linka byl vybrán model nižší řady od firmy GLOCK ecotech GmbH. Konkrétně se jedná o model GLOCK CHP 18 (viz obr. 16). Linka bude sloužit k hodnocení kvality měřených vzorků a demonstrativně pro představu návratnosti investice do zařízení zplyňovací technologie.

Obrázek 16 Technologické parametry zařízení GLOCK CHP 18

Společnost	GLOCK ecotech GmbH
Adresa	GLOCK ecotech GmbH, Bengerstraße 1, 9112 Griffen, AUSTRIA
Kontakt	Tel: +43 2247 90300-600 Mail: office@glock-ecotech.com www.glock-ecotech.com
Zplyňovací zařízení	GLOCK CHP 18
Výkon zařízení	GLOCK CHP 18 Jmenovitý elektrický výkon 18 kW Jmenovitý tepelný výkon 44 kW Spotřeba paliva: Pelety 12 - 15 kg/h, dřevní štěpka 19 kg/h
Požadavky na materiál	dřevěné pelety dle normy EN ISO 17225-2, nebo dřevní štěpka s vlhkostí do 30 % hm
Počáteční investice	Od 175 000 € cca 4,5 mil Kč
Provoz	Možná doba chodu až 8000 h/rok. V rámci produktu dostane uživatel podrobný plán údržby s intervaly adekvátními k zátěži zařízení.

Zdroj: upraveno podle Malaták et al., 2020

Společnost GLOCK ecotech GmbH je evropskou společností zabývající se zplyňováním odpadní biomasy za účelem následné výroby elektrické energie a tepla. Společnost se sídlem

v Rakousku nabízí dva typy zplyňovacích jednotek podle velikosti, jsou to GLOCK CHP 18 a GLOCK CHP 50 s jmenovitým elektrickým výkonem 50 kW, dále je v nabídce společnosti spojení 14 linek GLOCK CHP 50.

Biomasa je nejprve transportována dopravníkem do sušící jednotky a po usušení do zplyňovacího reaktoru. Reaktor pracuje dle Imbertova principu a převádí dřevní štěpku na dřevní plyn. Plyn je speciálním filtrem čištěn od popílku a následně ochlazen ve výměníku tepla (teplo je zpětně použito v procesu). Plyn projde skrz další filtr sloužící jako ochrana pro spalovací motor. Čistý plyn je spalován v motoru, který pohání generátor.

5.2 Výběr vzorků

Jedním ze vzorků jsou dřevní piliny s majoritním obsazením pilin ze smrkového dřeva. Jedná se o odpadní materiál malé truhlářské dílny a pily. Hmotnost odebraného vzorku je cca 10 g.

Dalším vzorkem je seno zbylé z úpravy areálu dílny. Sena bylo odebráno cca 10 g.

Posledním vzorkem je prach z haly. Důvodem zařazení tohoto materiálu do analýzy je skutečnost, že piliny vysychají v prostorách haly a do zařízení se může dostat jisté procento prachu, který se nachází na podlaze.

Odběr vzorků a příprava vzorků vychází z normovaných metod:

- ČSN EN 14778 (83 8211) Tuhá biopaliva – Vzorkování
- ČSN EN 14780 (83 8213) Tuhá biopaliva – Příprava vzorku.

5.3 Laboratorní měření

Vyhodnocení vzorků proběhlo v laboratořích Technické fakulty České zemědělské univerzity v Praze. Zde byla provedena analýza kvalitativních parametrů jednotlivých vzorků biomasy. Jednalo se o vzorky pilin z pilin a dřevovýroby, o směs pilin a prachu a vzorky sena z úpravy zatravněných ploch (viz obr. 17).

Obrázek 17 Vlevo vzorek pilin, vprostřed vzorek prachu a pilin, vpravo vzorek sena



Zdroj: autor

Pro vyhodnocení vzorku bylo použito vybavení Laboratoře analýzy organických materiálů na Technické fakultě České zemědělské univerzity v Praze. V laboratoři se stanovilo spalné teplo, obsah uhlíku, vodíku, dusíku a síry, z čehož byl následně dopočítán obsah kyslíku. Všechny rozborů pro vzorky byly stanoveny třikrát, kromě rozboru pro vzorek směsi prachu a pilin z důvodu nedostatečného množství vzorku.

Pro stanovení spalného tepla bylo použito kalorimetru LECO AC-600, obsahy dusíku, uhlíku, vodíku a síry se stanovily pomocí analyzátoru LECO CHN628+S. V neposlední řadě byla stanovena vlhkost, obsah popelovin a prchavých hořlavín jednotlivých vzorků, a to na analyzátoru LECO TGA-701.

5.3.1 Vlhkost

Při analýze vzorků jsou důležité hodnoty výhřevnosti a spalného tepla kvůli následnému zužitkování materiálu, ale zajímají nás i jiné hodnoty, a to jsou hodnoty obsahu balastních látek, těmi je myšleno vše, co následně nepřispívá k vyšší kvalitě výsledného produktu, a látky nežádoucí, jejichž přítomnost v GP může být nebezpečná pro prostředí nebo lidské zdraví (Cortazar et al., 2023).

Vlhkost materiálu přispívá k dehtování zplynovače, neboli zanesení prostoru generátoru vrstvou sloučenin, které se dohromady nazývají dehet, zanesením se zmenšuje reakční část generátoru a procesu zplynování. Proto je pro vstupní materiál vhodné její obsah snížit na minimum (Cortazar et al., 2023). Vysoký obsah vlhkosti má další nežádoucí účinky, jako je delší doba setrvání paliva ve zplynovači. Autoři článku Korus a Sziek (2015) nezohledňují

technické aspekty konstrukce zplyňovače, takže velikost reaktoru a doba zdržení suroviny nejsou do výpočtů zahrnuty.

5.3.2 Dehet

Dehet je sloučeninou několika organických látek kondenzujících při ochlazení plynu. Za nízkých teplot pyrolýzního procesu se uvolňuje prchavá hořlavina, a to je zásadní důvod vzniku dehtu. V tomto případě se jedná o nestabilní kyslíkaté sloučeniny (estery a kyseliny), druhů dehtů je totiž více. Dělíme je na:

- primární dehet – kyseliny, aldehydy, fragmenty holocelulosity a ligninu alkoholy, furany, furfuraly a jiné,
- sekundární dehet – převážně stabilnější fenoly a olefiny,
- terciální dehet – polyaromatické uhlovodíky (naftalen, methylnaftaleny, indan, acenaftalen, pyren), benzen, alkylátory (xylen, ethylbenzen, toluen, styren).

Dehet obsažený v GP lze částečně eliminovat již ve zplyňovacím zařízení pomocí termického rozkladu, sorbčních metod, katalytického rozkladu a mokré vypírky (Skoblja, 2004; Kiel, 2004).

5.3.3 Pevné částice

Pevnými částicemi v plynu jsou myšleny anorganické látky jako např. fluidní popeloviny – a nezreagované části paliva, které se nazývají polokoks. Část pevných částic odejde s popílkem, a část v energoplynu. Z plynu se pak separuje pomocí cyklónových odlučovačů (Stevens, 2001).

5.3.4 Alkalické sloučeniny

Nejrozšířenější alkálií v biomase je draslík. Záleží na tom, jaké množství alkalických sloučenin GP obsahuje, protože mají vliv na vlastnosti popelovin. Konkrétně na bod měknutí, tání a odpařování popelovin. Zároveň jsou alkalické sloučeniny problémem pro konstrukci generátoru, na kterou mají korozivní účinky. Vzniku těchto látek se dá předejít tím, že se plyn ochladí a odloučí se lehké částice, na kterých kondenzují soli (Klass, 1998; Stevens, 2001).

5.3.5 Síra

Dendromasa obsahuje velmi malé množství síry, maximálně 0,1 % hm., ale i takto malý obsah síry je nežádoucí. Při zplyňování se ze síry stávají sulfany H_2S nebo oxidy síry SO_x . Síra má korozní vliv na zplyňovací zařízení a zůstane-li v plynu nebezpečí koroze, ohrožuje mechanismus, ve kterém je plyn zužitkován. Odstraňuje se buď mokrou vypírkou nebo použitím vhodného sorbetu, který se sírou zreaguje (Klass, 1998; Stevens, 2001).

5.3.6 Dusík

Dusík je nehořlavý plyn, v GP je tedy balastní složkou. Za vyšších teplot tedy i při zplyňování vzniká z dusíku amoniak NH_3 , ten má negativní vliv na životní prostředí. Při spalování amoniaku vznikají NO_x , ty jsou nežádoucí. Zplyňování je v tomto ohledu ekologičtější než spalování.

5.3.7 Chlor

Obsah chloru v biomase není častý, ale může se zde vyskytnout ve formě HCl . Může napomoci vzniku perzistentních látek, které způsobují korozi konstrukce reaktoru. Chlor je možné odstranit vodní vypírkou (Stevenson, 2001).

5.4 Předúprava vzorků

Vzorky pilin a prachu jsou ve formě jemných pilin, nebylo tedy třeba je více rozmělnovat. Vzorky slámy byly rozdrceny střížným mlýnem na velikost 1 mm. Po odběru byly vzorky sušeny horkovzdušnou sušárnou při teplotě 105 °C a za pomoci laboratorní váhy Sartorius SP124 S (obr. 18) byla zjišťována přesná hmotnost před a po každé analýze pro vyhodnocení obsahu vlhkosti a dalších zjišťovaných parametrů. Příprava vzorků vychází z normovaných metod.

ČSN EN 14780 (83 8213) Tuhá paliva – Příprava vzorku.

Obrázek 18 Laboratorní váha Sartorius SP124 S



Zdroj: autor

5.5 Horkovzdušná sušárna

Všechny vzorky jsou po odběru sušeny v horkovzdušné sušárně UF30 (výrobce Memmert) (viz obr. 19). Materiály sušeny za teploty 45 °C po dobu 24 h, tím je zamezeno přílišnému ovlivnění vzorku.

Obrázek 19 Horkovzdušná sušárna Memmert UF30



Zdroj: Malaták et al., 2020, s. 16

Tato sušárna má v komoře zabudovaný ventilátor s nuceným prouděním vzduchu. Ventilátor napomáhá rovnoměrnějšímu rozložení teplot a urychluje sušení vsádky. Komoza sušárny je z nerezové oceli. Sušárna je vybavena výfukovou klapkou, která v případě sušení

extrémně vlhké vsádky pomáhá s odvodem vlhkého vzduchu z komory. V sušárně lze nastavit teplotu v rozsahu od 20 °C do 300 °C. Objem této sušárny je 32 l (Malat'ák et al., 2020).

5.6 Střížný mlýn Retsch SM 100

Po vysušení vzorků slámy je tento materiál rozmělněn na velikost 1mm pomocí střížného mlýnu. Vzorky jsou drceny na základě střížných sil pomocí tří nožů umístěných na rotoru mlýnu. Ten je možno vyjmout a nasadit bez použití nářadí. Mlýn je možné nastavit na různou hrubost namletého materiálu díky spodním výměnným sítům, a to od velikosti 0,25 do 20 mm (Malat'ák et al., 2020).

5.7 Termogravimetrická analýza

Termogravimetrická analýza se provádí na termogravimetrickém analyzátoru LECO TGA-701 (viz obr. 20). Měří se úbytek hmotnosti vzorku v závislosti na teplotě v řízené atmosféře vzduchu obohaceného dusíkem. Přístroj je složen ze dvou částí, z analyzátoru a z počítače, ten slouží k ovládání jednotlivých funkčních částí přístroje a k jejich vzájemnému propojení a zároveň připojení: pec, integrovaný karusel a interní váhy. Analyzované vzorky jsou vkládány do samostatných kelímků (19 kelímků + 1 referenční kelímek) a jsou zváženy pomocí interních vah. Referenční kelímek je umístěn na karuselu v poloze 0. Pro vlastní měření je možné nastavit metodu na měření obsahu vlhkosti, prchavé hořlaviny a obsahu popela, nebo je možné zvolit kombinaci těchto tří metod (Malat'ák et al., 2020).

Obrázek 20 Termogravimetrický analyzátor LECO TGA-701



Zdroj: autor

Prázdné kelímky jsou vloženy do analyzátoru. Každý vzorek je rozmístěn do tří kelímků, ty jsou uzavřeny víčkem a navážka se automaticky zváží. Pomocí počítače je měřený úbytek hmotnosti během rostoucí teploty pece, která je řízena dle zvolené analytické metody. Procento úbytku je možné pozorovat díky grafickému znázornění na počítači. Z výsledků analýzy je stanovený obsah vody, popela a prchavé hořlaviny jednotlivých vzorků podle normovaných metod.

- ČSN EN 14774-2 (83 8220) Tuhá biopaliva – Stanovení obsahu vody – Metoda sušení v sušárně – Část 2: Celková voda – Zjednodušená metoda;
- ČSN EN 14775 (83 8210) Tuhá biopaliva – Stanovení obsahu popela;
- ČSN EN 15148 (83 8222) Tuhá biopaliva – Stanovení obsahu prchavé hořlaviny (Malat'ák et al., 2020).

K analýze je potřeba mít na analyzátor napojené tlakové láhve s plyny (vzduch, kyslík, dusík) (viz obr. 21).

Obrázek 21 Tlakové nádoby s plyny



Zdroj: autor

5.8 Stanovení dusíku, uhlíku a vodíku

Pro stanovení hořlavin obsažených v organických materiálech se používá elementární analyzátor LECO CHN628 (viz obr. 22). K přístroji jsou napojeny laboratorní váhy (Santorius SP124 S) a průběh analýzy je řízen počítačem obsahujícím software výrobce.

Obrázek 22 Analyzátor LECO CHN628



Zdroj: autor

Příprava vzorků k analýze probíhá ručně, vzorky jsou vkládány do fóliových kelímků a zváženy, propojení počítače a váhy usnadňuje přenos informací. Po zvážení se zakroucením uzavřou fóliové kelímky. Vzorky (cca 1g) jsou pak vloženy do automatického podavače přístroje.

Zvážený a zabalený vzorek je z podavače vkládán do promární pece obsahující pouze čistý kyslík. V peci probíhá spálení (oxidací) v atmosféře kyslíku. Přítomné prvky – uhlík, vodík, dusík – jsou oxidovány na oxid uhličitý, vodu a oxidy dusíku a pomocí nosného kyslíku jsou dopraveny do sekundární pece, kde dochází k další oxidaci (Malat'ák et al., 2020).

5.9 Stanovení obsahu síry

Obsah síry se analyzuje zvlášť na přidaném modulu LECO CHN628 + S (viz obr. 23). Stejně jako přístroj LECO CHN628 je tento modul připojen k vahám a k počítači.

Obrázek 23 Analyzátor LECO CHN628+S



Zdroj: autor

Vzorky se vkládají do spalovací lodičky (obr. 24) a v té jsou v atmosféře kyslíku spalovány v peci za 1350 °C (viz obr. 25). Uvolňováním síry se tvoří oxid siřičitý.

Obrázek 24 Spalovací lodičky pro stanovení obsahu síry



Zdroj: autor

Obrázek 25 Detail spalovací pece analyzátoru LECO CHN628 + S



Zdroj: autor

Spalné plyny ze vzorku opouštějící pec, jsou nejprve vedeny zářázkou lodičky do zadní části vnitřní spalovací trubice a pak dopředu mezi vnitřní a vnější spalovací trubicí. Plyny tak zůstávají delší dobu v zóně o vysoké teplotě, což přináší účinnější oxidaci. Ze spalovacího prostoru proudí plyny trubicí s anhydronem (chloristan hořečnatý) k odstranění vlhkosti, regulátorem průtoku, který nastavuje průtok plynů ze vzorku na $2,5 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$, a pak infračervenou detekční komorou. Analýza trvá 60 až 120 vteřin (Malat'ák et al., 2020).

Při analýze obsahu uhlíku, vodíku, dusíku a síry se vychází z norem:

- ČSN EN 15104 (83 8216) Tuhá biopaliva – Stanovení obsahu celkového uhlíku, vodíku a dusíku – Instrumentální metody,
- ČSN EN 15289 (83 8226) Tuhá biopaliva – Stanovení obsahu celkové síry a celkového chlóru,
- ČSN EN 15296 (83 8225) Tuhá biopaliva – Přepočet výsledků analýz pro různé stavy biopaliv (Malat'ák et al., 2020).

5.10 Stanovení spalného tepla

Vzorek je spálen v řízeném prostředí poloautomatického kalorimetru LECO AC-600. (viz obr. 26) Vybraný vzorek je nejprve zvážen a poté slisován ručním lisem do tvaru tablety (cca 1g). Po slisování se vzorek opět váží a data jsou odeslána do počítače, který je s kalorimetrem propojen.

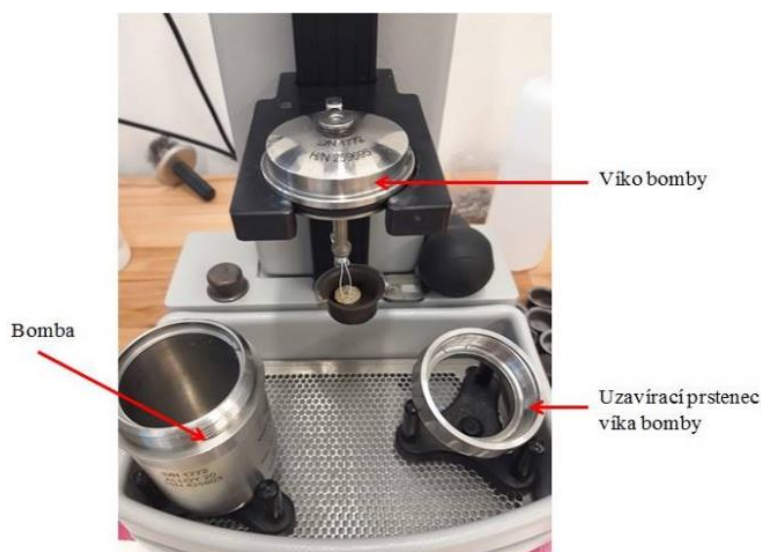
Obrázek 26 Kalorimetr LECO AC-600



Zdroj: autor

Samotné spálení probíhá ve speciální spalovací bombě. Bomba se skládá s kovového těla, víka a uzavíracího prstence (viz obr. 27).

Obrázek 27 Spalovací bomba



Zdroj: Malaťák et al., 2020, s. 20

Tableta je vložena do kelímku a ten společně s ní do držáku víka bomby kalorimetru (viz obr. 27). Na držáku víka je zapalovací drátek, na který je uvázána zapalovací nit, ta se musí dotýkat tablety. Bomba je následně uzavřena a manuálně natlakována kyslíkem. Natlakovaná bomba je nainstalována na víko analyzátoru. V průběhu analýzy je pak bomba ve vodní lázni, jejíž teplota je přesně regulována teploměrem s rozlišením 0,0001 °C.

Stanovená spalného tepla je stanovena spálením vzorku v řízeném prostředí. Uvolněné teplo je přímo úměrné spalnému teplu vzorku. Doba trvání analýzy je nastavena buď na 5, nebo 9 minut. Výhřevnost je stanovena výpočtem z výsledků elementární a proximální analýzy jednotlivých vzorků. Stanovení spalného tepla a výhřevnosti vychází z normované metody:

- ČSN EN 14918 (83 8214) Tuhá biopaliva – Stanovení spalného tepla a výhřevnosti.

5.11 Výsledky měření

Pro laboratorní měření byly zvoleny vzorky dřevních pilin a sena pro určení spalného tepla, obsahu hořlavých látek a obsahu popelovin a vody.

Jako první byla provedena analýza obsahu vlhkosti a popelovin (viz tab. 1–3).

Tabulka 1 výsledky analýzy přístroje LECO TGA701 pro vzorky pilin

Název	Metoda	Vlhkost [mg]	Popeloviny [mg]
Piliny	ISO A,M bez víčka / zvýšené průtoky, 550, odplynění	10,32	1,05
Piliny	ISO A,M bez víčka / zvýšené průtoky, 550, odplynění	10,37	1,26
Piliny	ISO A,M bez víčka / zvýšené průtoky, 550, odplynění	10,35	1,39
Průměrná hodnota		10,3478	1,2319
Derivace		0,02362	0,17204
RSD		0,228	13,97

Tabulka 2 Výsledky analýzy přístroje LECO TGA701 pro vzorky pilin a prachu

Název	Metoda	Vlhkost [mg]	Popeloviny [mg]
Prach+piliny	ISO A,M bez víčka / zvýšené průtoky, 550, odplynění	3,97	56,1
Prach+piliny	ISO A,M bez víčka / zvýšené průtoky, 550, odplynění	4,29	52,59
Průměrná hodnota		4,1318	54,3482
Derivace		0,22718	2,48611
RSD		5,498	4,574

Tabulka 3 Výsledky analýzy přístroje LECO TGA701 pro vzorky sena

Název	Metoda	Vlhkost [mg]	Popeloviny [mg]
Seno	ISO A,M bez víčka / zvýšené průtoky, 550, odplynění	7,92	5,57
Seno	ISO A,M bez víčka / zvýšené průtoky, 550, odplynění	7,89	5,45
Seno	ISO A,M bez víčka / zvýšené průtoky, 550, odplynění	7,83	5,68
Průměrná hodnota		7,8811	5,5658
Derivace		0,04723	0,11347
RSD		0,599	2,039

Všechny vzorky byly do analyzátoru vkládány po vzorcích o váze cca 1 g. Z výsledných hodnot je možné spočítat, že dřevní piliny mají obsah vlhkosti cca 10 %, dřevní piliny spolu s prachem 4 % a seno okolo 8 %. Obsah popelovin je po přepočtu na procenta u dřevních pilin 1–1,3 %, u prachu a pilin přes 50 % a u sena 6 %, což je téměř 6krát tolik než u dřevních pilin.

Na analyzátoru LECO CHN628 byl změřen procentuální a hmotnostní obsah uhlíku, vodíku, dusíku (viz tab. 4–6).

Tabulka 4 Výsledky analýzy přístroje LECO CHN628 pro dřevní piliny

Název	Uhlík %	Vodík %	Dusík %	Uhlík mg	Vodík mg	Dusík mg
Piliny	45,827	6,6173	0,11615	52,461	7,2071	0,13566
Piliny	45,912	6,6295	0,10244	50,894	6,9916	0,11586
Piliny	45,371	6,5626	0,09469	52,519	7,227	0,11183
Průměrné hodnoty	45,703	6,6031	0,10442	51,958	7,1419	0,12111
Derivace	0,2905	0,03561	0,010865	0,9219	0,13056	0,012755
RSD	0,636	0,539	10,4	1,774	1,828	10,53

Tabulka 5 Výsledky analýzy přístroje LECO CHN628 pro piliny a prach

Název	Uhlík %	Vodík %	Dusík %	Uhlík mg	Vodík mg	Dusík mg
Prach+piliny	21,66	3,0152	0,25882	27,279	3,6129	0,33258
Prach+piliny	23,715	3,221	0,2356	26,149	3,3789	0,26505
Prach+piliny	21,758	2,9223	0,24316	26,593	3,398	0,30321
Průměrné hodnoty	22,378	3,0528	0,24586	26,674	3,4633	0,30028
Derivace	1,1595	0,15288	0,01184	0,5694	0,12991	0,033859
RSD	5,181	5,008	4,816	2,135	3,751	11,28

Tabulka 6 Výsledky analýzy přístroje LECO CHN628 pro seno

Název	Uhlík %	Vodík %	Dusík %	Uhlík mg	Vodík mg	Dusík mg
Seno	43,883	6,249	1,7356	52,645	7,1323	2,1244
Seno	43,819	6,354	1,8162	45,052	6,2153	1,9052
Seno	43,794	6,3812	1,8337	45,928	6,3668	1,9621
Průměrné hodnoty	43,832	6,3281	1,7952	47,875	6,5714	1,9972
Derivace	0,0459	0,06982	0,05231	4,154	0,49155	0,11378
RSD	0,105	1,103	2,914	7,48	7,48	5,697

Poslední měřenou hodnotou je spalné teplo. Zatímco výhřevnost definuje pouze energetický obsah paliva, spalné teplo udává, kolik tepelné energie lze celkově získat z paliva. Hodnota spalného tepla pomocí kalorimetru LECO AC-600 (viz tab. 9–11).

Tabulka 7 Hodnota spalného tepla pro vzorky pilin

Název	Spalné teplo [kJ/]	hmotost [g]
Piliny	17,9162	1,009

Tabulka 8 Hodnota spalného tepla pro vzorky pilin a prachu

Název	Spalné teplo	hmotost [g]
Prach + piliny	-0,0775684	1,5982

Tabulka 9 Hodnota spalného tepla pro vzorky sena

Název	Spalné teplo	hmotost [g]
Seno	17,3965	1,103

Podle studijních materiálů Ústavu energetiky Fakulty strojní ČVUT (ČVUT, 2024) je spalné teplo množství tepla uvolněné úplným spálením tepla v kalorimetrické nádobě (jak bylo popsáno v kapitole 5.10) a hodnota výhřevnosti je hodnota spalného tepla zmenšená o výparné teplo vody, tedy o vlhkost. Budeme-li podle tohoto návodu postupovat, vyjdou nám hodnoty výhřevnosti, viz tab. 10.

Z naměřených hodnot lze spočítat výhřevnost pro jednotlivé vzorky. Výpočet se provádí z hodnot výhřevnosti měrného paliva (čistý uhlík), výhřevnosti vodíku, dusík řadíme mezi nehořlavé prvky, tvoří v palivu balast.

Tabulka 10 Průměrná výhřevnost analyzovaných vzorků

Vzorky	Výhřevnost [MJ.kg ⁻¹]
Piliny	16,5
Seno	16,04

5.12 Vyhodnocení výsledků, využití v zařízení GLOCK CHP 18

Za předpokladu, že všechna elektrická a tepelná energie bude zužitkována, bude závěrem této kapitoly proveden výpočet návratnosti technologie.

Popis funkce zplyňovací linky

Zařízení GLOCK CHP 18 je kompletní linkou pro výrobu tepla a elektřiny z biomasy. Generátor je konstruován na palivo ve formě dřevěných pelet nebo štěpky. Jmenovitý výkon jednotky je 18 kW elektřiny a 44 kW tepla. Zařízení je pak blíže popsáno v příloze 1.

Požadavky na materiál

Společnost uvádí jako vhodný materiál dřevěnou štěpku anebo pelety z dřevního odpadu dle normy EN ISO 17225-2. Případné drobné kousky paliva se vytrídí ve speciálním podavači zařízení GLOCK CHP 18.

Výpočet návratnosti technologie

Pro výpočet předpokládáme, že náklady na prostor potřebný pro zařízení a náklady na materiál, jakožto odpad z pily a dílny, jsou nulové. Materiál ve formě pilin bude zpracován lisem na pelety (viz obr. 28). Jeho parametry znázorňuje obr. 29.

Obrázek 28 Peletovací lis Cronimo MP – 150



Zdroj: Lis na pelety, <https://www.malotraktorysilesia.cz/peletovaci-technika/lis-na-pelety/> [cit. 2024-02-02]

Obrázek 29 Parametry paletovacího lisu Cronimo MP - 150

Model	Efektivita	Matrice	Výkon motoru	Hmotnost	Cena v Kč
Cronimo MP - 150	70-150 kg/h	průměr pelet 6mm	4 kW	105 kg	33 990

Zdroj: Lis na pelety, <https://www.malotraktorysilesia.cz/peletovaci-technika/lis-na-pelety/> [cit. 2024-02-02]

Vstupní parametry pro představu o návratnosti investic

Vstupními hodnotami jsou cena elektřiny od společnosti ČEZ, náklady na zařízení (linka + lis na pelety, cena materiálu, cena prostor a náklady na obsluhu.

- Cena elektrické energie pro vlastní spotřebu je 4,3 Kč/kWh (ČEZ, 2024).
- Cena kogenerační linky GLOCK CHP 18 je 150 000,- EUR,

- při kurzu 1 EUR=25,37 Kč je cena 3 805 500 Kč
- Cena paletovacího lisu Cronimo MP – 150 je 33 990 Kč.
- Cena vstupního materiálu a náklady na prostory a obsluhu jsou nulové.
- Výrobce udává hodnota produkce elektřiny je 18 kWh s možností provozu víc než 8 000 h ročně.

Použitý vztah

$$\mathbf{PI/RCE=x \text{ [rok]}}$$

PI – Počáteční investice

RCE – Roční cena ušetřené el. Energie

X – počet let návratu investice

Výpočet

$$(3\,805\,500 + 33\,990) / (8000 * 18) = 26,7 \text{ let}$$

6 Výsledky měření a diskuze

V práci Aplikace zplyňovacích technologií při energetickém využití jehličnatých dřevin z kůrovcové kalamity a kalamitní těžby, dále jen AZT, jejímž odpovědným řešitelem je doc. Ing. Jan Malat'ák, Ph.D., bylo celkově zkoumáno 240 vzorků jehličnatých stromů napadených kůrovcem, jednalo se o smrky a borovice z celkem pěti oblastí České republiky. Zaměříme se na hodnoty smrkového dřeva, kde při hodnocení vysušených vzorků jsou uvedeny průměrné hodnoty spalného tepla od 19,99 do 21,07 MJ.kg⁻¹ a průměrné hodnoty výhřevnosti od 18,69 do 18,99 MJ.kg⁻¹, bereme-li v potaz 10 % hm. vlhkosti, zatímco výsledky spalného tepla zkoumané v rámci této práce jsou pro smrkové piliny 17,9 MJ.kg⁻¹ a hodnota výhřevnosti pilin v této práci je 16,5 MJ.kg⁻¹. Hodnoty výhřevnosti jsou tedy podstatně nižší. Co se týče hodnot sena, vychází hodnoty spalného tepla 17,4 MJ.kg⁻¹ a hodnoty výhřevnosti 16,04 MJ.kg⁻¹ při průměrné vlhkosti 7,87 % hm. Ve srovnání s výsledky výzkumu Frydrycha a Volkové (2014), kde je hodnota měřené výhřevnosti sena 18,19 MJ.kg⁻¹, má vzorek v této práci o poznání nižší výhřevnost.

Nejdůležitější parametr pro technologii zplyňování je vlhkost vstupního materiálu. Čerstvé dřevo obsahuje 50–100 % hm. vody (Khestl, b.r.). Při použití pelet jako vstupního materiálu je nutné piliny a seno vysušit předem v ideálním případě na hodnoty vlhkosti okolo 10 % hm. Vzorky hodnocené v této práci jsou pro zvolenou technologii v tomto směru vhodné, jelikož hodnoty vlhkosti sena jsou v průměru 7,87 % hm. a hodnoty pilin se v průměru pohybují v hodnotách 10,35 % hm a zařízení udává požadovanou hodnotu vlhkosti ≤ 23 % hm. Maximální hodnota vlhkosti přípustná pro samotný reaktor je pak 10–15 % hm.

Důležitým faktorem je i obsah popela, který je u slámy téměř 6krát vyšší než u pilin. Obsah popela závisí nejen na druhu dřeva, ale také na lokalitě, ve které stromy rostou. Podle Malat'áka a Vaculíka (2008) se pak obsah popela pohybuje v rozmezí 0,5–1,1 % hm. v sušině dřevěné biomasy. V případě slámy je u sena nižší tavný bod popela, tzn., že při zplyňování může dojít k zanesení reaktoru (Pavlíček, 2009).

Vzorky měřené v rámci práce Malat'áka a Vaculíka (2008) vychází dle hodnot nadprůměrně, nejvyšší hodnoty u pilin jsou 1,39 mg a u sena je to až 5,68 mg, což je podobné jako u Frydrycha a Volkové. (2014), kde u suché luční trávy je hodnota popelovin 5,3 % hm. Pro využití sena by tedy muselo být ve vyhovujícím poměru mícháno s pilinami, aby bylo dosaženo uváděné účinnosti zařízení a nedocházelo k jeho zanesení.

Posledním zásadním parametrem je hodnota výhřevnosti, většina výrobců udává optimální hodnotu výhřevnosti cca 18 MJ.kg^{-1} , tuto hodnotu nespĺňuje však ani seno, ani piliny analyzované v této práci.

Co se týče vzorku prachu, bylo prokázáno pomocí měření, že jeho přítomnost je pro tuto technologii nežádoucí a měl by se z obsahu paliva eliminovat.

Výsledky laboratorního měření ukázaly, že hodnocené vzorky nejsou zcela vhodné pro zplynování.

7 Závěr

Cílem této práce je popsat problematiku energetického využití biomasy pomocí zplyňovacích technologií. V první části byla popsána vstupní surovina pro zplyňovací technologii, tedy biomasa, a její rozdělení, dále byly popsány termické, termochemické, chemické a biologické procesy zpracování této suroviny.

V další části byla rozebrána technologie zplyňování, průběh reakcí, současné i minulé typy zplyňovacích reaktorů na zpracování biomasy, možnosti využití plynu i nežádoucí složky plynného produktu řešené technologie.

Zplyňování je technologií téměř bezemisní, technologií využívající obnovitelné zdroje, která nabízí možnost energetické soběstačnosti i pro menší spotřebitele. V České republice není dosud zplyňování zcela známé a atraktivní, ale se zvyšující se potřebou elektrické energie a ve snaze přejít na výrobu z obnovitelných zdrojů je zplyňování jednou z možných variant, které se v Česku mohou realizovat. Jde o technologii zajímavou nejen pro zpracování biomasy, ale i jiných materiálů, např. komunálních odpadů. Následný produkt pak může být buďto spálen za účelem výroby elektrické a tepelné energie nebo zušlechtěn k výrobě plynných či kapalných biopaliv.

V praktické části byla provedena analýza vybraných vzorků pilin, sena a prachu, u nichž byl hodnocen obsah uhlíku, vodíku, dusíku a obsah popelovin a vlhkosti. Průměrné hodnoty obsahu prvků naměřené u pilin byly C 45,7 % hm., H 6,6 % hm., N 0,1 % hm. (viz tab. 4). Obsah popele u pilin byl v průměru 1,23 % hm. při naměřené vlhkosti 10,34 % hm. (viz tab. 1.), kde hodnoty popele jsou více než dvojnásobné, než uvádí Malaťák et al. (2020, s. 160).

U sena byly hodnoty prvků obdobné jako u pilin C 43,83 % hm., H 6,32 % hm., kromě dusíku, jehož hodnota byla několikanásobně vyšší než u pilin N 1,7 % hm. (viz tab. 6). Obsah popele u sena byl v průměru 5,6 % hm. při naměřené vlhkosti 7,8 % hm. (viz. tab. 3).

Dalšími měřeními parametry biomasy byly hodnoty spalného tepla a výhřevnosti. U pilin vyšla výhřevnost $16,5 \text{ MJ.kg}^{-1}$ a u sena $16,04 \text{ MJ.kg}^{-1}$ a hodnoty spalného tepla $17,9 \text{ MJ.kg}^{-1}$ u pilin a $17,4 \text{ MJ.kg}^{-1}$ u sena.

Z hrubého výpočtu návratnosti vychází, že námi zvolená technologie je spíše nerentabilní. Majitel technologie by při stanovených takřka ideálních podmínkách čekal na navrácení investovaných peněz téměř 27 let. Technologie však může být cestou pro oblasti s trvalým přísunem paliva a špatnou dostupností zdrojů elektrické energie nebo v případě, že

přednost dostane přidaná hodnota této technologie, kterou je její téměř bezemisní provoz nezávislý na změnách počasí a zároveň se jedná o obnovitelný zdroj elektřiny a tepla.

8 Seznam použitých zdrojů

BEŇO, Zdeněk et al., 2008. Renaissance zplyňovacích generátorů typu Imbert v České. In: BOGDÁLEK, Jan a Jiří MOSKALÍK, Jiří, eds., 2008. *Energie z biomasy IX: sborník příspěvků ze semináře: Vysoké učení technické v Brně, FSI-EÚ-OEI: 2008* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. [cit. 2023-04-30]. ISBN 978-80-214-3803-3. Dostupné z: <https://eu.fme.vutbr.cz/file/Sbornik-EnBio/2008/15%20-%20Beno.pdf>.

BUREŠ, David, 2017. Alternativní paliva nejsou nic nového: historické Škodovky jezdily na dřevoplyn? In: *Auto.cz* [online]. 19. 6. 2017 [cit. 2024-01-02]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/alternativni-paliva-nejsou-nic-noveho-historicke-skodovky-jezdily-na-drevoplyn-107758>

CORTAZAR, Maria et al., 2023. A comprehensive review of primary strategies for tar removal in biomass gasification. *Energy Conversion and Management* [online], **276**, 15. 1. 2023, 116496 [cit. 2023-12-20]. ISSN 0196-8904. Dostupné z: doi:[10.1016/j.enconman.2022.116496](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116496)

ČEZ, 2024. Ceníky. In: *Skupina ČEZ* [online]. ©2024 [cit. 2024-02-10]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/podpora/ceniky.html?commodity=ele>

ČVUT, 2020. Zplyňování a pyrolýza odpadů. In: *Ústav energetiky Fakulty strojní ČVUT v Praze* [online]. 6. 4. 2020 [cit. 2024-01-23]. Dostupné z: <https://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/ELO-pr9-full.pdf>.

ČVUT, 2024. Měření v energetice: hrubý rozbor paliva. In: *Ústav energetiky Fakulty strojní ČVUT v Praze* [online]. [cit. 2024-02-15]. Dostupné z: https://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/E_rozbor_paliva.pdf

FRYDRYCH, Jan a Pavla VOLKOVÁ, 2014. Trávy jako obnovitelné zdroje energie se zřetelem na spalování. In: *Tzbinfo* [online]. Publikováno 18. 8. 2014 [cit. 2024-02-19]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/biomasa/11599-travy-jako-obnovitelne-zdroje-energie-se-zretelem-na-spalovani>

HIGMAN, Christopher a Maarten Van der BURGT, 2008. *Gasification*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier. ISBN 978-0-7506-8528-3.

- HOFBAUER, Hermann et al., 2003. Biomass CHP Plant Güssing – a success story. In: BRIDGWATER, A. V., ed. *Pyrolysis and Gasification of Biomass and Waste: Proceedings of an Expert Meeting: Strasbourg, France, 30 September - 1 October 2002* [online]. Newsbury: CPL Press [cit. 2024-01-02]. ISBN 978-1-872691-77-0. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/242422623_Biomass_CHP_plant_Gssing_-_A_success_story
- JAKUBES, Jaroslav, Helena BELLINGOVÁ a Michal ŠVÁB, 2006. *Moderní využití biomasy: technologické a logistické možnosti* [online]. Česká energetická agentura [cit. 2024-02-03]. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/dokument/02.pdf>
- KALTSCHMITT, Martin, Hans HARTMANN a Hermann HOFBAUER, eds., 2009. *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren* [online]. 2. rev. Aufl. Berlin: Springer [cit. 2024-01-10]. ISBN 978-3-540-85094-6. Dostupné z: doi: 10.1007/978-3-540-85095-3,
- KHESTL, Filip, 2024. Dřevo – základní fyzikální vlastnosti dřeva. In: *VŠB, Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební* [online]. [cit. 2024-02-19]. Dostupné z: https://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=drevo_zk
- KIEL, Jacob H. A., ed., 2004. *Primary measures to reduce tar formation in fluidised-bed biomass gasifiers: final report SDE project P1999-012* [online]. March 2004 [cit. 2024-02-02]. Dostupné z: <https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/4367413/57669>
- KLASS, Donald L., 1998. *Biomass for renewable energy, fuels, and chemicals* [online]. Academic Press [cit. 2024-02-12]. ISBN 978-0-12-410950-6. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-410950-6.X5000-4>
- KNOEF, Harrie a Luis SÁNCHEZ ANGRILL, 2012. *Handbook biomass gasification*. 2nd ed. Enschede: BTG Biomass Technology Group. ISBN 978-90-819385-0-1.
- KOHOUT, Přemysl a Marek BALÁŠ, 2005. Snižování tvorby dehtů při zplyňování biomasy dvkováním inertních materiálů do fluidního lože. In: BALÁŠ, Marek, ed., et al. *Energie z biomasy: sborník příspěvků ze semináře IV* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, s. 45–50, [cit. 2023-01-15]. ISBN 80-214-3067-2. Dostupné z: <https://eu.fme.vutbr.cz/file/Sbornik-EnBio/2005/09.Kohout.pdf>.
- KORUS, Agnieszka a Andrzej SZLEK, 2015. The effect of biomass moisture content on the IGCC efficiency. *Biomass and Bioenergy* [online], **80**, September 2015, s. 222–228 [cit. 2023-12-20]. ISSN 0961-9534. Dostupné z: doi:[10.1016/j.biombioe.2015.05.014](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.05.014)

KUBÍČEK, Jiří; 2004. Úprava energoplynu pro jeho využití ve spalovacích motorech. In: *Energie z biomasy III – seminář: sborník příspěvků ze semináře* [online]. Brno: Vysoké učení technické, FSI - EÚ – OEI [cit. 2023-04-30]. ISBN 80-214-2805-8. Dostupné z:

https://eu.fme.vutbr.cz/file/Sbornik-EnBio/2004/10_Kubicek.pdf.

KUBÍČEK, Jiří, 2006. *Mokrý čištění energoplynu před jeho využitím ve spalovacím motoru* [online]. Brno [cit. 2023-12-20]. Zkrácená verze Ph.D. thesis. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Energetický ústav. Dostupné z:

https://www.vut.cz/vutium/spisy?action=ukazka&id=490&publikace_id=13812

LARSSON, Anton et al., 2021. Steam gasification of biomass – Typical gas quality and operational strategies derived from industrial-scale plants. *Fuel Processing Technology* [online], **212**, February 2021, 106609 [cit. 2023-02-20]. ISSN 0378-3820. Dostupné z: doi:[10.1016/j.fuproc.2020.106609](https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106609)

MALAŤÁK et al., Jan, 2020. *Aplikace zplyňovacích technologií při energetickém využití jehličnatých dřevin z kůrovcové a kalamitní těžby: závěrečná zpráva projektu* [online]. Praha: Česká zemědělská univerzita [cit. 2024-01-05]. Dostupné z: https://lesy.cz/wp-content/uploads/2019/12/GS_ZZ_zplynovaci-technologie.pdf

MALAŤÁK, Jan a Petr VACULÍK, 2008. *Biomasa pro výrobu energie*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze. ISBN ISBN978-80-213-1810-6.

MEDIAVILLA, Irene, Miguel J. FERNÁNDEZ a Luis S. ESTEBAN, 2009. Optimization of pelletisation and combustion in a boiler of 17.5 kW_{th} for vine shoots and industrial cork residue. *Fuel Processing Technology* [online], **90**(4), 621–628 [cit. 2024-01-03]. ISSN 0378-3820. Dostupné z: doi:[10.1016/j.fuproc.2008.12.009](https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.12.009)

MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU ČR (2023). *Aktualizace Vnitrostátního plánu České republiky v oblasti energetiky a klimatu* [online]. Publikováno 20. 10. 2023 . [cit. 2024-02-03]. Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/strategicke-a-koncepcni-dokumenty/2023/10/Aktualizace_NKEP_10_2023_final.pdf

NAJSER, Jan, 2005. Návrh technologie vysokoteplotního čištění energoplynu. In: BALÁŠ, Marek, ed., et al. *Energie z biomasy: sborník příspěvků ze semináře IV* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, s. 73–78, [cit. 2024-01-15]. ISBN 80-214-3067-2. Dostupné z: <https://eu.fme.vutbr.cz/file/Sbornik-EnBio/2005/14-Najser.pdf>.

NAJSER, Jan a Miroslav KYJOVSKÝ, 2007. Zplyňování v experimentálním reaktoru s pevným ložem. In: LISÝ, Martin, Marek BALÁŠ a Jan BOGDÁLEK, eds. *Energie z biomasy VII: sborník příspěvků ze semináře* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, s. 147–153 [cit. 2024-01-15]. ISBN 978-80-214-3542-1. Dostupné z:

https://eu.fme.vutbr.cz/file/Sbornik-EnBio/2007/27_Najser.pdf

Nařízení vlády č. 189/2018 Sb., o kritériích udržitelnosti biopaliv a snižování emisí skleníkových plynů z pohonných hmot. In: *Zákony pro lidi* [online], Praha: ©AION CS, 2010–2024 [cit. 2024-02-19]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2018-189>

OLOFSSON, Ingemar, Anders NORDIN a Ulf SÖDERLIND, 2005. *Initial review and evaluation of process technologies and systems suitable for cost-efficient medium-scale gasification for biomass to liquid fuels*. Umeå: University of Umeå, Energy Technology & Thermal Process Chemistry. ETPC Report. ISSN 1653-0551.

OCHODEK, Tadeáš, Jan KOLONIČNÝ a Michal BRANC, 2007. „*Technologie pro přípravu a energetické využití biomasy*“: studie v rámci projektu „*Možnosti lokálního vytápění a výroby elektřiny z biomasy*“. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava. ISBN 978-80-248-1426-1.

OCHODEK, Tadeáš a Jan NAJSER, 2014. *Zplyňování biomasy*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. ISBN 978-80-248-3302-6.

PAVLÍČEK, Libor, 2009. Využití univerzálního kotle na spalování celých balíků sena. In: *Biom.cz* [online]. Publikováno 18.5. 2009 [cit. 2024-03-19]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyuziti-univerzalniho-kotle-na-spalovani-celych-baliku-sena>>.

PEER, Václav a Pavel FRIEDEL, 2016. Zplyňování – principy a reaktory. In: *Tzbinfo* [online]. Publikováno 25. 1. 2016 [cit. 2024-01-31]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-pevnymi-palivy/13729-zplynovani-principy-a-reaktory>

POHOŘELÝ, Michael et al., 2010. Zplyňování biomasy – možnosti uplatnění [online]. *Biom.cz*. 24. 11. 2010. Poslední změna 7. 12. 2010 [cit. 2023-12-03]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/zplynovani-biomasy-moznosti-uplatneni>

POHOŘELÝ, Michael et al., 2012. Zplyňování biomasy. *Chemické listy*, **106**(4), 264–274. ISSN 0009-2770.

- REED, T. B. a A. DAS, 1988. *Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems* [online]. SERI/SP-271-3022, 5206099. March 1988 [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/docs/legosti/old/3022.pdf>
- SKOBLIA, Sergej et al., 2003. Výroba energie z biomasy a odpadu: perspektivy zplyňování a produkce čistého plynu. In: *Energie z biomasy III: sborník příspěvků ze semináře* [online]. Brno: Vysoké učení technické, FSI – EÚ, s. 89–97 [cit. 2024-01-30]. ISBN 80-214-2805-8. Dostupné z: https://eu.fme.vutbr.cz/file/Sbornik-EnBio/2003/11_Skoblia.pdf.
- SKOBLIA, Sergej, 2004. *Úprava složení plynu ze zplyňování biomasy* [online]. Praha [cit. 2024-01-02]. Doktorská disertační práce. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. Fakulta technologie ochrany prostředí. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/293824010_Uprava_slozeni_plynu_ze_zplynovani_biomasy_Upgrading_of_gas_composition_from_biomass_gasification
- SKOBLIA, Sergej et al., 2006. Využití biomasy jako obnovitelného zdroje energie. *Chemické listy*, **100**(S1), 20–24. ISSN 0009-2770.
- STEVENS, D. J., 2001. *Hot gas conditioning: recent progress with larger-scale biomass gasification systems; update and summary of recent progress* [online]. NREL/SR-510-29952. B.m.: National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States) [cit. 2024-03-25]. Dostupné z: doi:[10.2172/786288](https://doi.org/10.2172/786288)
- SVOBODA, Karel et al., 2003. Vysokoteplotní palivové články, vhodná paliva a možnosti jejich využití. *Chemické listy*, **97**(1), 9–23. ISSN 0009-2770.
- TAUCHMAN, David, 2007. Biomasa v soustavách měst a obcí – projekty a zkušenosti (I). In: *Tzbinfo* [online]. Publikováno 5. 2. 2007 [cit. 2024-02-02]. Dostupné z: <https://www.tzbinfo.cz/3865-biomasa-v-soustavach-mest-a-obci-projekty-a-zkusenosti-i>
- TIANGCO, Valentino M., Bryan M. JENKINS a John R GOSS, 1996. Optimum specific gasification rate for static bed rice hull gasifiers. *Biomass and Bioenergy* [online], **11**(1), 51–62 [cit. 2024-02-02]. ISSN 1873-2909. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0961-9534\(95\)00110-7](https://doi.org/10.1016/0961-9534(95)00110-7).
- VOBOŘIL, David, 2017. Biomasa – využití, zpracování, výhody a nevýhody, energetické využití v ČR. In: *O energetice* [online]. Publikováno 6. 2. 2017 [cit. 2024-01-30]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje-energie/biomasa-vyuziti-zpracovani-vyhody-a-nevyhody>.

Vyhláška 110/2022 Sb., o stanovení druhů a parametrů podporovaných obnovitelných zdrojů a kritérií udržitelnosti a úspory emisí skleníkových plynů pro biokapaliny a paliva z biomasy. In: *Zákony pro lidi* [online], Praha: ©AION CS, 2010–2024 [cit. 2024-02-19]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2022-110>

Vyhláška č. 415/2012 Sb., o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. In: *Zákony pro lidi* [online], Praha: ©AION CS, 2010–2024 [cit. 2024-02-19]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-415#cast1>

Zákon 165/2012 Sb., o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů. In: *Zákony pro lidi* [online], Praha: ©AION CS, 2010–2024 [cit. 2024-02-19]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-165#>

Seznam obrázků

Obrázek 1 Rozdělení biomasy podle vzniku	7
Obrázek 2 Možné způsoby využití biomasy podle výstupního produktu	7
Obrázek 3 Schéma dvou různých typů sesuvných generátorů (souproutý a protiproutý reaktor).....	10
Obrázek 4 Schéma generátoru s fluidním ložem.....	11
Obrázek 5 Principy zplyňování dle zásobování tepla vlevo autotermní, vpravo alotermní způsob.....	11
Obrázek 6 Složky plynu ze zplyňování dendromasy vzduchem, vodní párou a parokyslíkovou směsí	13
Obrázek 7 Příklady znečišťujících látek GP a možnosti jejich odstranění.....	14
Obrázek 8 Nejvyšší přípustné koncentrace znečišťujících složek.....	15
Obrázek 9 Rozdělení zplyňovacích procesů.....	16
Obrázek 10 Schéma reaktoru s křížovým tokem.....	19
Obrázek 11 Generátory se stacionární (a) s cirkulující, (b) s fluidní vrstvou	20
Obrázek 12 průběh zplyňování v reaktoru FICFB (a) Přenos tepla fluidní vrstvou v reaktoru FICFB (b)	21
Obrázek 13 Schéma hořákového generátoru	22
Obrázek 14 Grafické rozdělení základních typů generátorů dle tepelného příkonu	23
Obrázek 15 Přehled jednotlivých technologií pro kogenerační výrobu elektřiny a tepla spolu s jejich orientační účinností (η_E) a výkonovým měřítkem	24
Obrázek 16 Technologické parametry zařízení GLOCK CHP 18	25
Obrázek 17 Vlevo vzorek pilin, vprostřed vzorek prachu a pilin, vpravo vzorek sena.....	27
Obrázek 18 Laboratorní váha Sartorius SP124 S	30
Obrázek 19 Horkovzdušná sušárna Memmert UF30	30
Obrázek 20 Termogravimetrický analyzátor LECO TGA-701	32
Obrázek 21 Tlakové nádoby s plyny	33
Obrázek 22 Analyzátor LECO CHN628	33
Obrázek 23 Analyzátor LECO CHN628+S	34
Obrázek 24 Spalovací lodičky pro stanovení obsahu síry.....	35
Obrázek 25 Detail spalovací pece analyzátoru LECO CHN628 + S	35
Obrázek 26 Kalorimetr LECO AC-600.....	36
Obrázek 27 Spalovací bomba.....	37

Obrázek 28 Peletovací lis Cronimo MP – 150	41
Obrázek 29 Parametry paletovacího lisu Cronimo MP - 150.....	41

Seznam tabulek

Tabulka 1 výsledky analýzy přístroje LECO TGA701 pro vzorky pilin	38
Tabulka 2 Výsledky analýzy přístroje LECO TGA701 pro vzorky pilin a prachu	38
Tabulka 3 Výsledky analýzy přístroje LECO TGA701 pro vzorky sena	38
Tabulka 4 Výsledky analýzy přístroje LECO CHN628 pro dřevní piliny	39
Tabulka 5 Výsledky analýzy přístroje LECO CHN628 pro piliny a prach	39
Tabulka 6 Výsledky analýzy přístroje LECO CHN628 pro seno	39
Tabulka 7 Hodnota spalného tepla pro vzorky pilin	40
Tabulka 8 Hodnota spalného tepla pro vzorky pilin a prachu	40
Tabulka 9 Hodnota spalného tepla pro vzorky sena	40
Tabulka 10 Průměrná výhřevnost analyzovaných vzorků	40

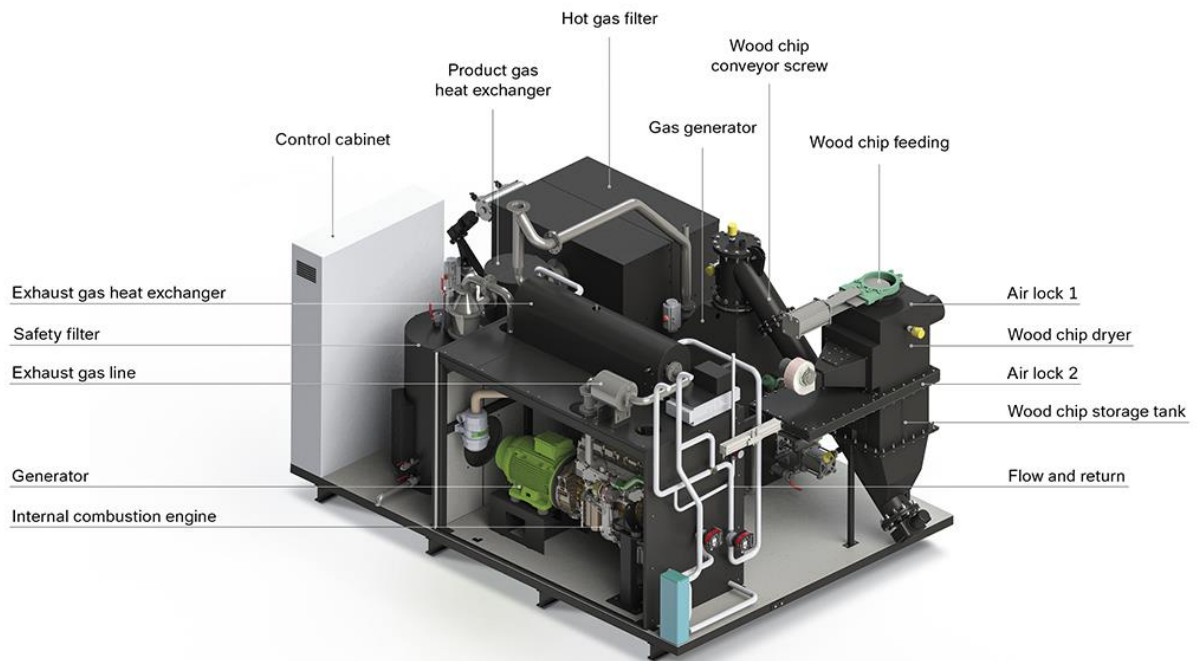
Seznam použitých zkratk

GP	generátorový plyn
PG	protiproudý generátor
SG	souproudý generátor
TZL.....	tuhé nežádoucí látky
ZM	zplyňovací médium

Přílohy

Příloha 1 Popis částí technologie GLOCK CHP 18

Příloha 1 Popis částí technologie GLOCK CHP 18



Zdroj: GLOCK Ecotech, dostupné z: <https://www.glock-ecotech.com/en/GLOCK-CHP> [cit. 2024-02-19]

1. Kontrolní panel
2. Výměník tepla GP
3. Bezpečnostní filtr
4. Výměník tepla spalin
5. Elektrický generátor
6. Spalovací motor
7. Filtr horkého plynu
8. Zplynovací generátor
9. Šnekový dopravník paliva
10. Přívod paliva
11. Vzduchová uzávěra
12. Sušárna paliva
13. Druhá vzduchová uzávěra
14. Zásobník paliva
15. Potrubí spalin
16. Potrubní okruh generátoru