



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

ENERGETICKÉ VYUŽITÍ DIGESTÁTU

ENERGY USE OF DIGESTATE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Zdeněk Kaška

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Zdeněk Kaška**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

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:

Energetické využití digestátu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V poslední době je biomasa velmi oblíbeným palivem pro domovní vytápění i jako zdroj energie pro centrální zásobování teplem či výrobu elektrické energie. TO má za důsledek nedostatku dřevní biomasy na trhu a hledání nových zdrojů. Jedním takovým zkoumaným palivem je i digestát vznikající při výrobě bioplynu. Náplní práce bude ověření možnosti tohoto paliva v kotli na tuhá paliva.

Cíle bakalářské práce:

Cílem bakalářské práce je posouzení možností využití digestátu pro výrobu tepelné energie. Konkrétně je třeba splnit následující úkoly:

- rešerše vlastností biomasy se zaměřením na digestát
- roční bilance digestátu v ČR
- experimentální ověření možnosti využití digestátu

Seznam doporučené literatury:

BALÁŠ, Marek. Kotle a výměníky tepla. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4770-7.

JANDAČKA, Jozef. Technologie pre zvyšovanie energetickeho potencialu biomasy. 1. Žilina: BALPO, 2007. ISBN 978-80-969595-4-9.

MALAŤÁK, Jan a Petr VACULÍK. Biomasa pro výrobu energie. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008. ISBN 978-80-213-1810-6.

QUASCHNING, Volker. Obnovitelné zdroje energií. Praha: Grada, 2010. Stavitel. ISBN 978-80-247-3250-3.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 26. 10. 2017



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

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se v první kapitole zabývá rešerší biomasy obecně, jejích druhů a zpracovávání. V dnešní době se biomasa jeví jako ekologicky a finančně přijatelná náhrada fosilních paliv kvůli stále přísnějším normám vůči produkci emisí. V druhé části se pak zabývá jejím konkrétním typem a to digestátem. Je zjišťováno, zda-li se jím opravdu může fosilní palivo nahradit, popřípadě jak bude změněn proces výroby energie.

Klíčová slova

Anaerobní digesce, digestát, biomasa, spalování, obnovitelný zdroj energie

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the research of biomass in general, its types and processing. Nowadays, biomass appears to be an environmentally and financially acceptable substitute for fossil fuels due to increasingly stringent emissions standards. The second part deals with its particular type, digestate. It is investigated whether the fossil fuel can be replaced or how the energy production process could be changed.

Key words

Anaerobic digestion, digestate, biomass, combustion, renewable energy source

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KAŠKA, Z. *Energetické využití digestátu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 43 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Energetické využití digestátu** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Zdeněk Kaška

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Marku Balášovi, Ph.D. za poskytnutí cenných rad a připomínek a celkovou vstřícnost při zpracovávání této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat mé rodině a přítelkyni. Především pak rodičům, kteří mě podporují a díky kterým mohu studovat.

Obsah

ÚVOD.....	11
1 Biomasa	12
1.1 Definice, terminologie, pojmy	12
1.2 Úprava a zpracování biomasy pro energetické účely	13
1.2.1 Mechanická úprava pevných biopaliv.....	13
1.2.2 Mechanická úprava energetických stébelnin.....	14
1.3 Využití biomasy	15
1.4 Druhy Biomasy	17
1.4.1 Dřevo a zemědělské produkty	18
1.4.2 Biologicky rozložitelný odpad	19
1.4.3 Bioplyny	19
2 Digestát.....	22
2.1 Anaerobní digesce.....	22
2.2 Dělení digestátu	23
2.3 Jednotlivé frakce digestátu.....	24
2.4 Výroba tepelné energie	24
3 Experiment	26
3.1 Použité přístroje	26
3.2 Průběh měření	30
3.3 Palivo	32
3.4 Výpočet účinnosti kotle	33
3.5 Emise a škodliviny	36
ZÁVĚR.....	39
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	40
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	42

ÚVOD

Život bez zásobování energií by se dneska jen těžko dal představit. Poptávka po ní je s rozvíjející se společností však čím dál tím větší. Získávání energie z fosilních paliv není trvalým řešením, jelikož jeho zásoby nejsou nevyčerpatelné. Proti tomu jde trend poslední doby, kdy se zadávají určité environmentální cíle, které jsou hlavně ve snižování produkce emisí. Obě tyto kritéria splňuje výroba energie z obnovitelných zdrojů. Konkrétně v tomto případě spalování určitého druhu biomasy. Mezi bezesporu největší výhody této metody patří vyrovnaná bilance produkce oxidu uhličitého a fakt, že jde o téměř nevyčerpatelný zdroj energie. Biomasa je velmi rozsáhlý pojem a obsahuje spoustu druhů materiálů, od rostlinných až po živočišné. Ne však každý takový materiál je vhodný k výrobě energie. Toto je motivací pro výzkum jednotlivých druhů a jejich zhodnocení jako paliva pro určení co největší efektivity výroby.

První kapitola se zabývá terminologií a pojmy okolo biomasy obecně. Dále je zde její rozdělení, výhody či nevýhody a způsoby úpravy pro další zpracovávání.

Druhá kapitola pojednává čistě o digestátu. Je zde uvedena jeho výroba, možné druhy a použití. Digestát není obvyklé palivo, používá se spíše k hnojení půdy, avšak s jeho cenou by energetické využití bylo velmi levným zdrojem energie.

Třetí kapitola zahrnuje samotný výzkum. Ze vzorku pelet digestátu je pomocí experimentu spalováním v kotli vyhodnoceno zda-li odpovídá současným nebo i budoucím nárokům na použití.

1 Biomasa

Biomasaou můžeme nazvat hmotu všech organismů na Zemi, která se účastní koloběhu živin v naší atmosféře. Zahrnuje jak samotné organismy, tak i jejich živé či neživé produkty činnosti. Je buď záměrně získávána jako výsledek výrobní činnosti nebo jde o využití odpadů z průmyslu.

Základním producentem biomasy jsou rostliny, které díky chlorofylu (zelenému barvivu) umí při zachycení světelné energie produkovat sacharidy a bílkoviny, což jsou látky, ze kterých se skládají veškeré organismy.

Z energetického hlediska nás zajímá taková biomasa, která se dá energeticky využít. Teoreticky to může být jakákoliv z jejích forem, jelikož základ vždy tvoří uhlík a jeho chemické vazby, které obsahují energii.

Biomasa jako zdroj energie je prakticky nevyčerpatelná, jelikož suroviny nejsou nijak omezené. Stromy budou růst vždycky a odpad bude také vždy existovat. Limitujícím faktorem však může být potřebná produkční plocha pro pěstování rostlin. [1]

1.1 Definice, terminologie, pojmy

Bioplynová stanice

Zařízení, které zpracovává biologicky rozložitelný odpad pomocí anaerobní digesce a vzniká při tom bioplyn.

Bioplyn

Poslední dobou je velmi populární, a to díky trendu tzv. ekologických postupů a metod. Výroba bioplynu se jeví jako ekologicky čistá a šetrná k životnímu prostředí. Obecně je bioplyn každý plyn, který vznikl jako produkt činnosti mikroorganismů. Bioplyn je směs plynů tvořená převážně z metanu a oxidu uhličitého, který vzniká rozkládáním organické hmoty. Za minimální hranici se považuje 50% obsahu metanu. V reálném světě však obsahuje i minoritní příměsi. Tyto příměsi mohou vypovídat o poruchách anaerobní digesce nebo o přítomných prvcích. [1,3]

Anaerobní digestce

Může být někdy také nazývána jako metanové kvašení. Jejím produktem je bioplyn vznikající rozkládáním organických látek například, jako jsou rostliny, hnůj, či výkaly hospodářských zvířat. Tento proces probíhá bez přístupu kyslíku v uzavřené nádobě. Může také probíhat volně v přírodě např. na dně jezer nebo bažinistích. V bioplynové stanici se biomasa zahřívá na provozní teplotu (15°-55°C), průběžně se promíchává a dále se plyn odvádí do zásobníků. Samotný druh biomasy ovlivňuje stabilitu anaerobního procesu a tím i vybavení bioplynové stanice. [1,3,4]

Digestát

Je to vedlejší produkt anaerobní digesce. Jedná se o odpad z bioplynové stanice, který již neobsahuje složky pro efektivní výrobu metanu. Musí splňovat kvalitativní vyhlášky o biologických metodách zpracování biologicky rozložitelných materiálů. Na první pohled působí jako organické hnojivo s rostlinnými živinami a relativně vysokým poměrem uhlíku a dusíku, ale jsou v něm i příměsi, které se v půdě rozkládají delší dobu. Dále se dělí na fugát a separát. [5]

Fugát

Kapalná fáze digestátu. Lze ji oddělit například odstředivkou či centrifugou. Používá se pro ředění čerstvého substrátu a vlivem recirkulace se snižuje potřebný objem uskladňovací jímky. [3]

Separát

Tuhá fáze digestátu. [3]

1.2 Úprava a zpracování biomasy pro energetické účely

Úpravu zpracování biomasy můžeme rozdělovat do dvou kategorií. První je úprava pevných biopaliv ke sjednocení rozměrů a druhá je úprava energetických stébelnin jejich sběrem a homogenizací do balíků pro jednodušší přepravu.

1.2.1 Mechanická úprava pevných biopaliv

Mechanickou úpravou biopaliva rozumíme zpracování dřeva a dřevního odpadu na námi požadované rozměry. Podle výsledného rozměru produktu rozdělujeme tato zařízení na stříhací zařízení, sekačky a drtiče. [1]

Rozdělení:

- **Stříhací zařízení**

Výroba klasického kusového dřeva z odpadů dřevařského průmyslu. Zařízení funguje na principu gilotiny, kdy se do násypky vhodí materiál, který je dál posunován směrem k nožům. Dřevo je stříháno na délku zhruba 30 cm a součástí bývá i svazkovací zařízení.

- Sekačky

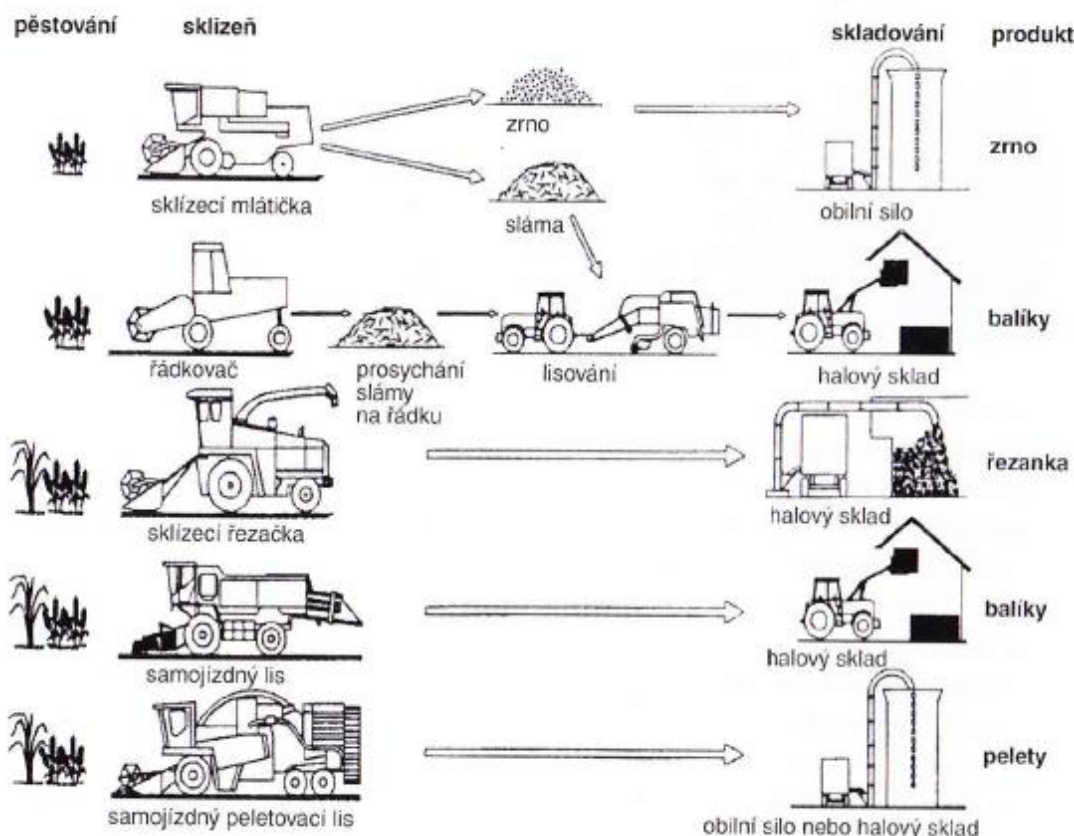
Sekačky slouží k beztržiskovému dělení dřeva na velmi malé rozměry – dřevní štěpku.

- Podle účelu použití
 - stacionární sekačky
 - Sekací stroj, který se skládá ze statoru a rotoru, je trvale uložen na jednom místě a dřevo je k němu dopravováno podávacím zařízením.
 - Mobilní sekačky
 - Sekací stroj namontovaný na podvozek, kterým se přepravuje.
- Podle sekacího orgánu
 - Diskové sekačky
 - Nejrozšířenější druh, konstrukce je provedena tak, že zařízení samo vyvolá sílu potřebnou ke vtažení dřeva dovnitř.
 - Bubnové sekačky
 - Vzhledem ke konstrukci a setrvačným momentům není vhodné k sekání dřeva větší tloušťky.
 - Šroubové sekačky
 - Malé sekačky, které pracují podobně jako mlýnek na maso.
- Zařízení na paketování, peletování a briketování
 - Jedná se o různé druhy lisů, které stlačují materiál na menší objem pro lepší manipulaci a skladování.

1.2.2 Mechanická úprava energetických stébelnin

Lisování

Nejvíce používaná technologie pro zpracovávání stébelnin v suchém stavu jako např. slámy obilnin a olejnin, energetických obilnin, konopí a dalších. Výsledkem lisování je balík s objemem slámy až 3 m³ o hmotnosti až 500 kg. Balíky mají buď tvar válce nebo kvádrů. Stroje pro válcové balíky jsou levnější, avšak teplárny preferují tvar kvádrů kvůli lepší skladnosti. [1]



Obr. 1.1 Různé způsoby mechanické úpravy energetických stébelnin [1]

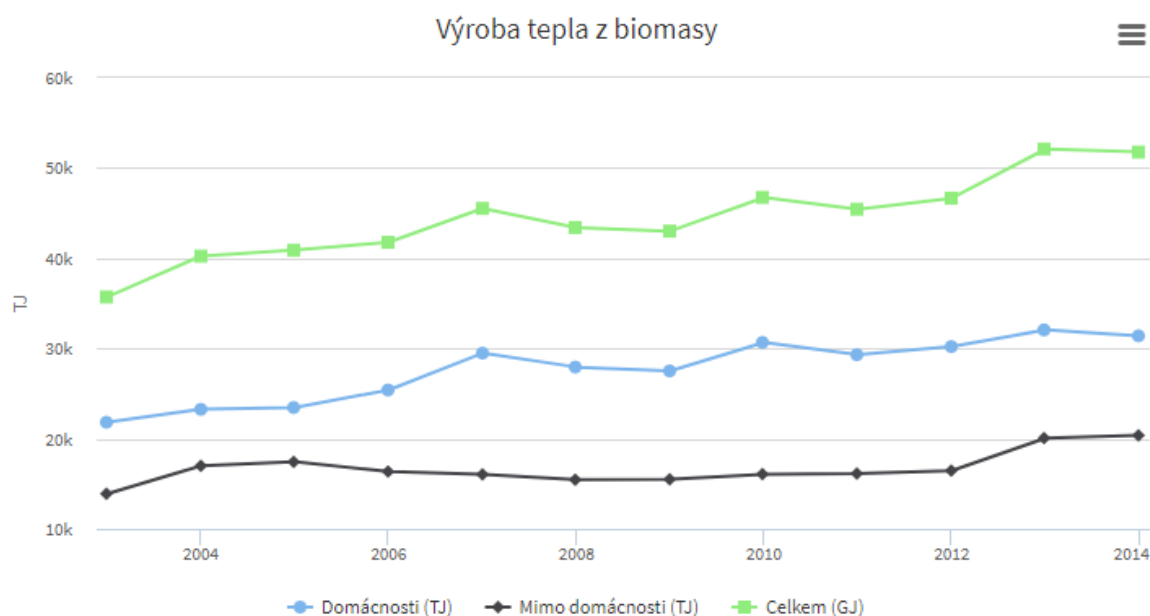
1.3 Využití biomasy

Z průmyslového hlediska má biomasa přednost využití k energetickým účelům. Tato přednost je předurčena jejími chemickými a fyzikálními vlastnostmi. Důležitým parametrem směsi je obsah sušiny v celém objemu. Hraniční hodnotou je zde 50 % a podle toho se určuje, zda jde o suché procesy (obsah sušiny je větší než 50%) nebo o mokré procesy (obsah sušiny je menší než 50%).

Z principiálního hlediska lze dělit na:

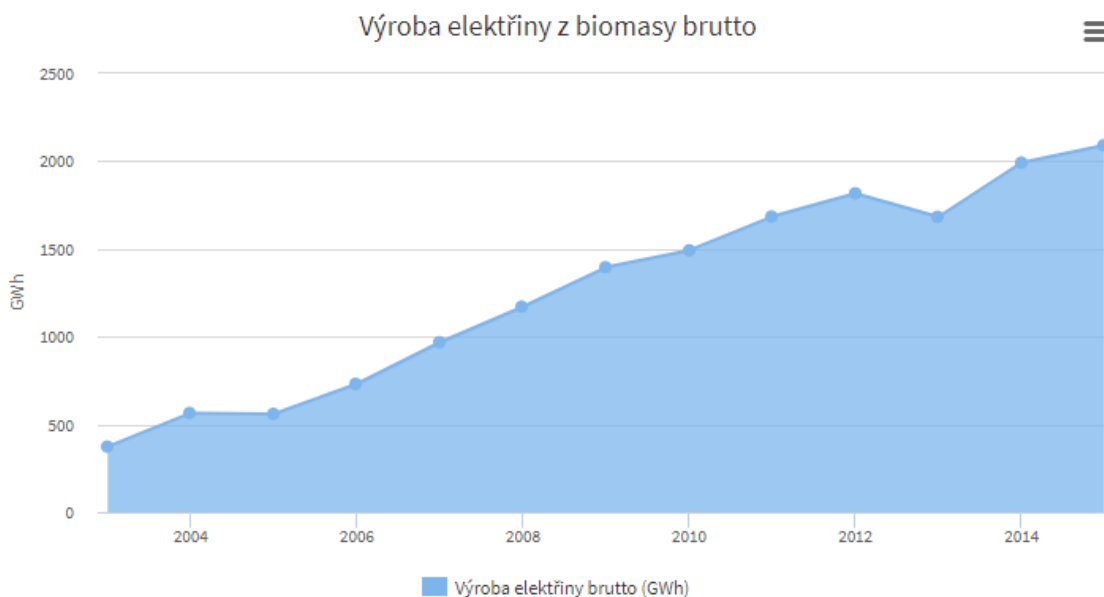
- Suché procesy (termomechanické přeměny)
 - Spalování
 - Pyrolýza
 - Zplyňování
- Mokré procesy (biochemická přeměna)
 - Alkoholové kvašení
 - Metanové kvašení
- Fyzikální a chemická přeměna
 - Mechanicky (lisování, drcení)
 - Chemicky (esterifikace)
- Získávání odpadního tepla
 - Kompostování

Biomasa je také využívána jako zdroj tepelné energie určená pro domácnosti např. ve formě briket či pelet pro speciální kotle. Děje se tak pomocí nejstarší metody získávání energie – spalováním. Jedná se o složitý proces, jelikož jde o poměrně složité palivo, a to z důvodu různých teplot spalování různých plynů obsažených v celém objemu. Velkou výhodou tohoto paliva, hlavně oproti fosilním palivům, je však téměř nulová bilance oxidu uhličitého. Množství uvolněného plynu prakticky odpovídá množství plynu absorbovaného během svého života při fotosyntéze.



Obr. 1.2 Výroba tepla spalováním biomasy v jednotlivých letech [2]

Poslední dobou je rostoucí trend také výroby elektřiny pomocí biomasy, a to hlavně díky provozní podpoře výroben elektřiny z biomasy. [1,2]



Obr. 1.3 Výroba elektřiny z biomasy v jednotlivých letech [2]

1.4 Druhy Biomasy

Biomasu můžeme rozdělit na různé druhy z různých úhlů pohledů.

Dělení biomasy z hlediska původu:

- Rostlinná biomasa, která se dále dělí na dendromasu (dřevní biomasu) a fytomasu (jednoleté a víceleté rostliny),
- živočišná biomasa – zoomasa,
- komunální a průmyslný odpad.

Dle zdroje jejího vzniku:

- lesní biomasa – palivové dřevo, větve, kořeny, kůra, piliny,
- zemědělská biomasa – fytomasa – obilná sláma, obilí, konopí
– zoomasa – exkrementy, odpady,
- komunální a průmyslové odpady

Rozdělení podle vlastností:

- suchá – lze jí přímo spalovat
- vlhká – nelze spalovat přímo, výroba bioplynu – tekuté odpady
- speciální – olejnin, cukernaté a škrobové plodiny ze kterých se získávají energetické látky jako bionafta a líh

Biomasa pěstovaná pro energetické účely.

Většinou jde o rychle rostoucí dřeviny a rostliny bylinného charakteru, které mají přednosti v podobě krátkého vegetačního období, snadného výsevu, popřípadě i využití na neenergetické účely. [2,6,7]

- Rychle rostoucí dřeviny – topol, vrba, olše
- Rostliny bylinného charakteru – šťovík, ostřík
- Travní porosty – sloní tráva, trvalé travní porosty
- Obiloviny
- Olejnaté rostliny – výroba surových olejů – slunečnice, řepka olejná
- Škrobo-cukernaté rostliny – cukrová řepa, cukrová třtina

1.4.1 Dřevo a zemědělské produkty

Většina z dnes používané biomasy jsou domácí pěstované rostliny. Dřevo (kůra, štěpky, piliny) tvoří asi 44 % z celkové produkce. Dalšími zdroji jsou zemědělské odpady z ovoce a kukuřice. Ze dřeva a dřevního odpadu se vyrábí elektrická energie. Většinu této energie pak využívají průmyslové podniky vyrábějící odpad. Například papírenské společnosti, které většinu z odpadních produktů používají k výrobě páry a elektřiny. Dřevo je populární také díky nízké ceně, snadným podmínkám na skladování a lehké dostupnosti. [8]

Palivové dřevo

Každé dřevo má specifický způsob hoření a různou výhřevnost. Palivové dřevo rozdělujeme na tvrdé a měkké. Podle druhu topení používáme tvrdé dřevo pro topení v krbech, kamnech a měkké dřevo pro topení v kotlích. Výrobci zařízení na spalování dřeva se snaží stále zlepšovat proces spalování tak, aby výhřevnost byla co největší a odpad z hoření co nejmenší. [9]

Tvrdé dřevo

- Dub – vysoká tvrdost a pevnost, velmi vhodné dřevo na topení, je potřeba ho nechat proschnout aspoň dva roky, skvělá výhřevnost s pomalým plamenem
- Buk – ideální dřevo do krbu
- Habr – nejvyšší výhřevnost ze všech palivových dřev

Měkké dřevo

- Lípa – výborně hoří, ale jen krátkou dobu
- Smrk – nepoužívanější palivové dřevo, nejlepší výhřevnost z měkkých dřev

Dřevní odpad

Hlavním producentem dřevního odpadu jsou dřevozpracující závody. Další jsou například okenní a dveřní rámy, nábytek, palety, přepravky a další. Takové dřevo ale nesmí být nijak chemicky znečištěno barvami nebo olejem, aby jej bylo možné dále využít.

1.4.2 Biologicky rozložitelný odpad

Za biologicky rozložitelný odpad (BRO) lze považovat cokoliv, co podléhá aerobnímu či anaerobnímu rozkladu. Jedná se o velkou skupinu, která představuje skoro čtvrtinu veškeré produkce odpadu.

Biologicky rozložitelný komunální odpad (BRKO) tvoří významnou část komunálního odpadu. Většinou se jedná o kuchyňské zbytky, odpad při údržbě zahrad či parků (větve, posekaná tráva). Pro přehlednost byl zaveden tzv. koeficient biologického rozkladu, který v rozmezí od 0 do 1 označuje podíl rozložitelné složky v daném materiálu. Jednička znamená 100% podíl, čím nižší koeficient, tím hůře je látka rozložitelná. [10,11]

Kód odpadu	Název druhu odpadu	Koeficient biologického rozkladu
20 01 01	Papír a lepenka	1
20 01 08	Biologicky rozložitelný odpad z kuchyní a stravoven	1
20 01 10	Oděvy	0,60
20 01 11	Textilní materiály	0,50
20 01 38	Dřevo neuvedené pod č. 20 01 37	1
20 02 01	Biologicky rozložitelný odpad	1
20 03 01	Směsný komunální odpad	0,54
20 03 02	Odpad z tržišť	0,80
20 03 07	Objemný odpad (započteno koeficientem dle 1)	0,50

Tab. 1.1 Koeficienty biologického rozkladu různých druhů odpadu

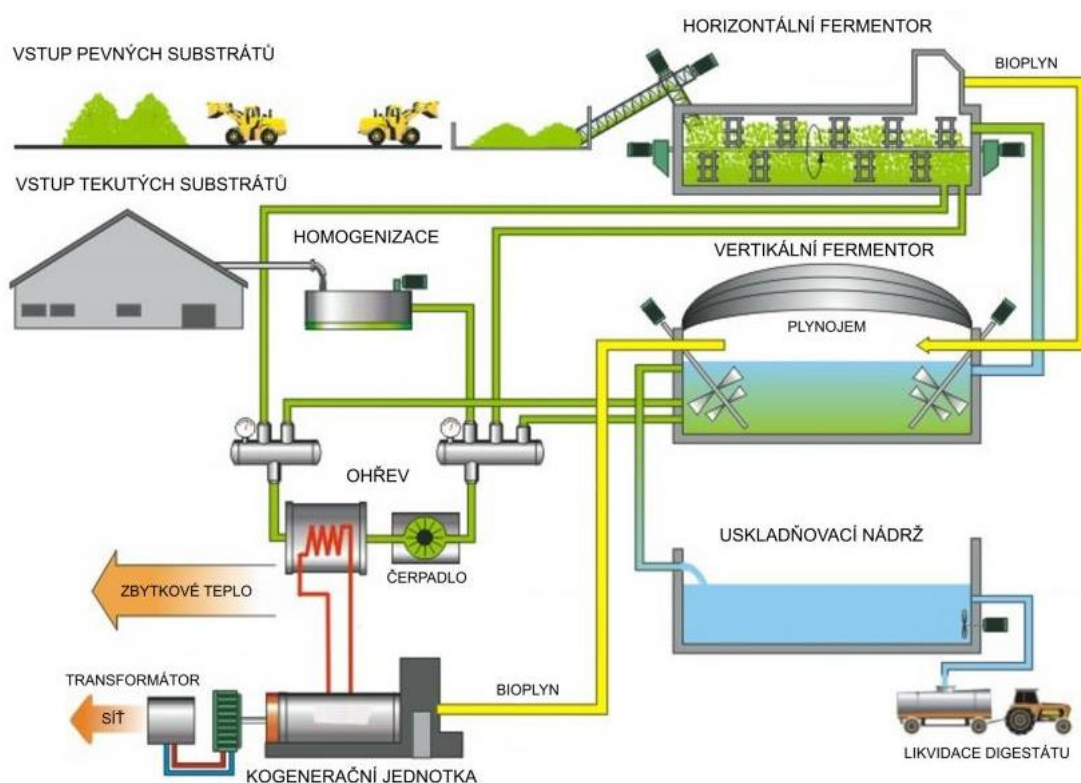
1.4.3 Bioplyn

Bioplyn je směs plynů, kde hlavní zastoupení tvoří metan a oxid uhličitý. Jeho nejčastější zdroje jsou hnoje, kejdy a odpadové hospodářství. Vzniká tak, že bakterie a houby bez přístupu kyslíku rozkládají organické hmoty a při tomto procesu vzniká tzv. metanový plyn. Tento proces se postupem času zpomaluje, tak jak hmota degraduje. Plyn ale neustále vzniká a musí být například na skládkách dle předpisů shromažďován z ekologických a bezpečnostních důvodů. Plyn je bezbarvý, bez zápachu, avšak velmi hořlavý.

Použití bioplynu:

- výroba tepla
- výroba tepla a elektřiny – nejčastější případ
- výroba tepla, elektřiny a chladu
- pohon dopravních prostředků

Jako nejlepší se jeví kogenerační využití, což znamená výrobu elektřiny a tepla zároveň. Někdy je využívána i mechanická energie, tím je možno dosáhnout až 95 % účinnosti. Pro kogeneraci se nejčastěji používají naftové motory. Plyn se nijak nečistí, jen se do něj přidává asi 5-10 % nafty z důvodu mazání a chlazení. Při takovémto provozu je nutno počítat s častějšími poruchami.



Obr. 1.4 Schéma bioplynové stanice [14]

Aby bylo možné takto nashromážděný bioplyn použít k pohánění dopravního prostředku musí být upraven na požadované vlastnosti. Především jde o zbavení nežádoucích příměsí, a to hlavně oxidu uhličitého a sirovodíku. Výsledný biometan obsahuje více než 95 % metanu a má srovnatelnou výhřevnost se zemním plynem. Od zemního plynu se očištěný bioplyn liší prakticky jen v původu vzniku, což znamená, že při pohonu motoru jej lze bezproblémově zaměnit. [12,13]

Výhody:

- tišší chod motoru oproti benzinu
- vozidla poháněna bioplynem jsou díky jeho fyzikálním vlastnostem bezpečnější
- nízké emise při spalování

Nevýhody

- jen lokální výroba
- náročnost očištění bioplynu od nežádoucích příměsí

2 Digestát

V České republice se k 31. 12. 2016 nachází 567 bioplynových stanic s celkovou elektrickou produkcí 83 289 GWh. Konkrétní čísla pro produkci digestátu jsou však velmi těžko dohledatelná. Jako příklad však může posloužit modelová situace, kdy uvažujeme bioplynovou stanicí s elektrickým výkonem 1000 kW/den. Pro získání těchto hodnot byl použit digestát z kukuřičné biomasy. Hodnoty uvedené v tab 2.1 mohou být považované za minimální, jelikož přídavek kejdy či jiného zemědělského odpadu by obsah živin zvýšil. [27,28]

Nutrienty a složky digestátu	Koncentrace [%]	Produkce [t/rok]
Sušina	7,3	943
K ₂ O	0,78	202
P ₂ O ₅	0,18	23
Celkový dusík N	0,63	81

Tab. 2.1 Produkce digestátu a koncentrace obsažených látek [27]

2.1 Anaerobní digesce

Je to velmi složitý biochemický proces. Skládá se z několika na sebe navazujících dílčích fyzikálních, fyzikálně-chemických a biologických procesů. Na konci působení metanogenních, autotrofních a hydrogentrofních mikroorganismů získáváme dva výstupní produkty ve formě bioplynu a zbytkového fermentovaného materiálu – digestátu. Pro popsání celého procesu byly vymyšleny celkem tři modely. Nejstarší je dvoufázový popis, který byl v roce 1981 nahrazen třífázovým. V dnešní době je uznáván čtyřfázový popis. [1]

Popis anaerobní digesce pomocí čtyřfázového modelu:

1. fáze – **Hydrolýza**

Hlavním předpokladem pro vznik hydrolýzy je dostatečný obsah vlhkosti aspoň 50 % hmotnostního podílu. Nastává enzymatický rozklad, který mění polymery (polysacharidy, proteiny, lipidy) na monomery (jednodušší organické látky). Celá tato fáze probíhá v čase, kdy prostředí ještě obsahuje vzdušný kyslík.

2. fáze – **Acidogeneze**

Dochází k definitivnímu odstranění zbytků vzdušného kyslíku a tím vytvoření anaerobního prostředí. Celý proces zajišťují četné kmeny fakultativních anaerobních mikroorganismů aktivujících se v obou prostředích. Díky tomu vznikají oxid uhličitý CO₂, vodík H₂ a kyselina octová CH₃COOH, které umožňují metanogenním bakteriím tvorbu metanu.

3. fáze – **Acetogeneze**

Také označovaná jako mezifáze. Transformace vyšších organických kyselin na kyselinu octovou pomocí acidogenních specializovaných kmenů bakterií.

4. fáze – **Metanogeneze**

Nejpomalejší ze všech fází. Probíhá až pětikrát pomaleji než ostatní fáze. Probíhá rozklad kyseliny octové na metan a oxid uhličitý. Hydrogentrofní bakterie produkují metan z vodíku a oxidu uhličitého.

2.2 Dělení digestátu

1. Rozdělení digestátu podle vstupních surovin

Surovin, které mohou být použity jako vstupní surovina do bioplynové stanice je velké množství. Mohou to být např. biomasa, kejda, hnůj, rostlinné suroviny a další. Podle jednotlivých druhů vstupních surovin je nutné rozlišovat různé požadavky pro bioplynové stanice a digestát samotný. Kvůli tomu Ministerstvo životního prostředí vydalo pokyn k podmínkám schvalování bioplynových stanic před jejich uvedením do provozu. [15]

1.1. Statková hnojiva a materiály rostlinného původu.

Tyto digestáty jsou složeny ze slámy, všech typů obilovin i olejnin, travní biomasy a kukuřičné siláže. Do tohoto typu digestátu podle zákona č. 185/2001 Sb. nelze použít odpady a ve znění pozdějších předpisů ani vedlejší živočišné produkty. Nařízení ES č. 1774/2002 také určuje podmínky, které musí hnůj splňovat, aby mohl být použitý. Jedná se o normy pro indikátorové organismy viz tab 2.2.

Indikátorové organismy	Počet vzorků, které mají být testovány	Prahová hodnota počtu bakterií	Maximální hodnota počtu bakterií	Počet vzorků, kde je povolena hodnota mezi prahovou a maximální
<i>Salmonella</i> (nepřítomnost v 25 g)	5	0	0	0
<i>Enterococaceae</i> (nepřítomnost v 1 g)	5	0	1 000	5
<i>Escherichia coli</i> (nepřítomnost v 1 g)	5	0	1 000	5

Tab. 2.2 Hodnocení hygienizace digestátu v průběhu nebo ihned po zpracování [15]

1.2. Digestáty, kde je aspoň jednou ze složek odpad

Jako vstupní suroviny můžou být použity bioodpady, materiály rostlinného charakteru, statková hnojiva. Bioplynovou stanicí s těmito vstupy lze provozovat jen za souhlasného rozhodnutí orgánu kraje. Tento orgán také schvaluje provozní řád stanice

1.3. Vedlejší živočišné produkty

Takovýto digestát může obsahovat části poražených zvířat, kůže, kopyta, zmetkové potraviny živočišného původu, krev a další. Použití těchto produktů na výrobu bioplynu je upraveno nařízením Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1774/2002.

2. Rozdělení podle obsahu sušiny

- tekuté
- tuhé

3. Rozdělení podle použití

Podle použití digestátu musí speciálně upravena bioplynová stanice

- použití v zemědělství
- použití mimo zemědělství (rekultivační materiál)
- energetické účely

2.3 Jednotlivé frakce digestátu

Digestát můžeme rozdělovat různými separačními metodami na jednotlivé frakce, podle toho, kolik % hmotnostního podílu sušiny obsahuje. Je-li obsah sušiny větší než 13 %, pak se jedná o separát. Obsah sušiny pod 3 % nazýváme fugát a třetí frakcí je surový digestát, který obsahuje 3–13 % sušiny. [16]

2.4 Výroba tepelné energie

Digestát se donedávna používal pouze jako hnojivo v zemědělství. Problém může ale nastat, jestliže obsahuje nebezpečné látky, které jsou nežádoucí pro zemědělské použití, např. těžké kovy. Tyto látky se mohou dostat do procesu digesce prostřednictvím exkrementů hospodářských zvířat, kterým jsou podávány nějaké léky, ať už jako léčba či jenom prevence proti onemocnění. Další zdrojem nežádoucích látek je například kal z čistírny odpadních vod.

V posledních letech se ale objevuje nové využití a tím je jeho termické spalování. Separát je lisován do formy pelet, které jsou následně spalovány. Důležitým faktorem pro tyto pelety je jejich otěruvzdornost, která je stanovena normou ČSN P CEN/TS 15210-1. Tento způsob výroby energie je však teprve ve fázi výzkumu a není tolik používán. Zjišťují se ideální podmínky a způsoby pro jeho zpracování, za účelu co největší výnosnosti. [17]

	Nakládání s odpady celkem	z toho				
		Využití odpadů (kromě energetického využití)	z toho Recyklace	Energetické využití	Spalování na pevnině	Skládkování
2008	28 183 522	6 416 438	4 858 334	555 769	68 769	4 660 750
2009	27 658 315	6 471 054	4 851 084	578 189	74 975	4 182 747
2010	27 952 975	7 389 483	4 515 307	767 285	55 497	4 086 079
2011	30 506 667	8 271 077	5 211 842	934 558	72 708	4 968 365
2012	30 237 544	8 420 101	5 726 180	959 048	76 172	3 628 127
2013	28 994 027	8 814 035	5 780 053	939 552	79 088	3 577 193
2014	30 876 896	9 552 410	6 239 170	1 016 414	79 130	3 418 594
2015	34 205 451	11 109 396	7 755 881	1 057 005	81 152	3 517 562
2016	34 484 528	11 343 800	8 375 039	1 032 496	80 979	3 800 384

Tab. 2.3 Způsoby nakládání s odpadem [18]

To, že jde opravdu o malý poměr vůči zemědělské aplikaci digestátu dokazuje tab 2.3 zpracování kalů. Avšak, jak čísla naznačují, procentuální podíl spalování má stoupající tendenci.

Usušený separát lze použít pro výrobu alternativních tuhých paliv. Ideální je kombinace separátu s dalšími druhy biomasy. Palivářské vlastnosti jednotlivých směsí ukazuje tab. 2.4.

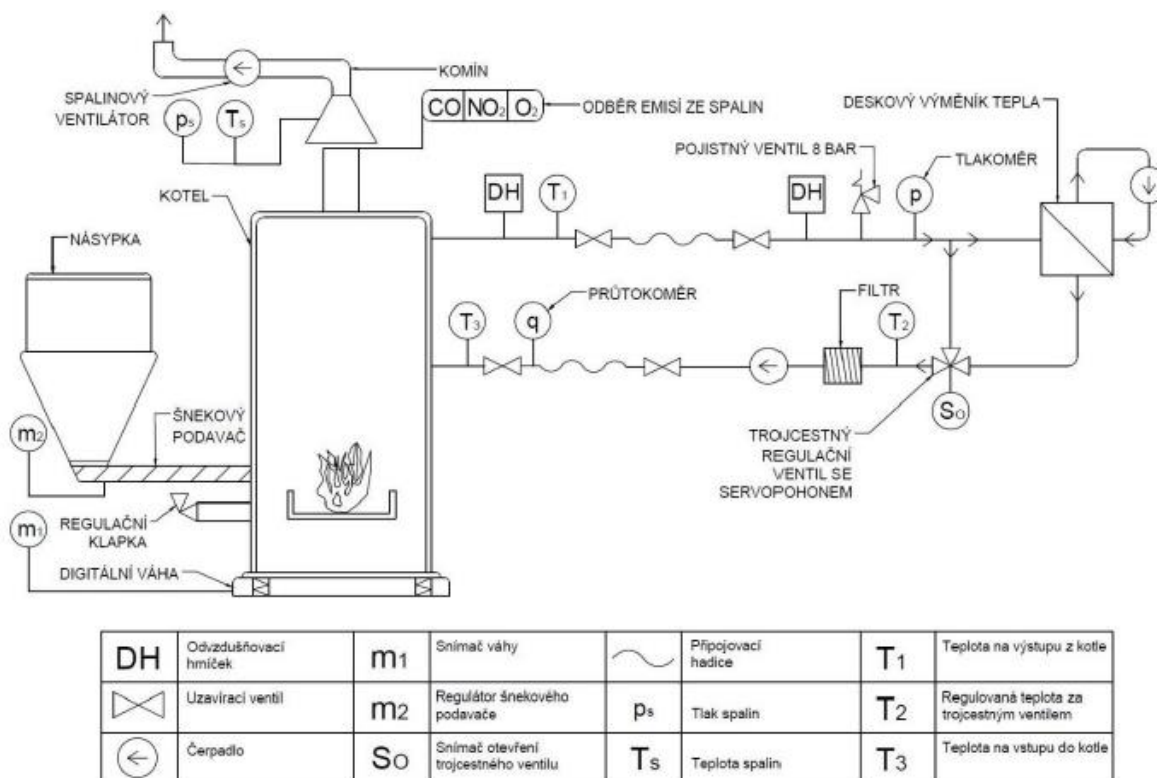
Složení	Jednotka	Separát z vepřové kejdy	Separát a piliny 3:7	Separát a piliny 1:1	Separát z BPS na kukuřici
Hořlavina					
voda	% hm.	9,53	8,08	9,14	2,31
prchavá hořlavina	% hm.	67,1	73,03	70,79	63
neprchavá hořlavina	% hm.	16,54	15,83	15,87	17,78
popel	% hm.	6,83	3,06	4,2	16,91
C	% hm.	38,45	45,25	43,78	41,73
H	% hm.	5,92	6,26	6,46	5,4
N	% hm.	1,58	< 0,1	0,77	2,45
S	% hm.	0,15	0,08	0,1	0,26
O	% hm.	37,37	37,14	35,42	30,4
Cl	% hm.	0,17	0,13	0,13	0,54
spalné teplo	MJ*kg ⁻¹	16,53	17,51	17,25	17,53
výhřevnost	MJ*kg ⁻¹	15,24	16,15	15,85	16,3
Popel					
bod měknutí	°C	1180	1180	1190	990
bod tání	°C	1190	1185	1195	1010
bod tečení	°C	1200	1190	1200	1030

Tab. 2.4 Složení různých druhů digestátu [19]

Je-li obsah rizikových složek digestátu nad povolenou hranicí, nelze jej využít jako hnojivo, ale musí být zlikvidován podle zákona o odpadech. Zvolením správných vstupních složek se lze takovéto situaci vyhnout. [19]

3 Experiment

Experiment se zabýval spalováním pelet z digestátu. Celá zkouška byla prováděna ve zkušebně energetického ústavu VUT FSI.

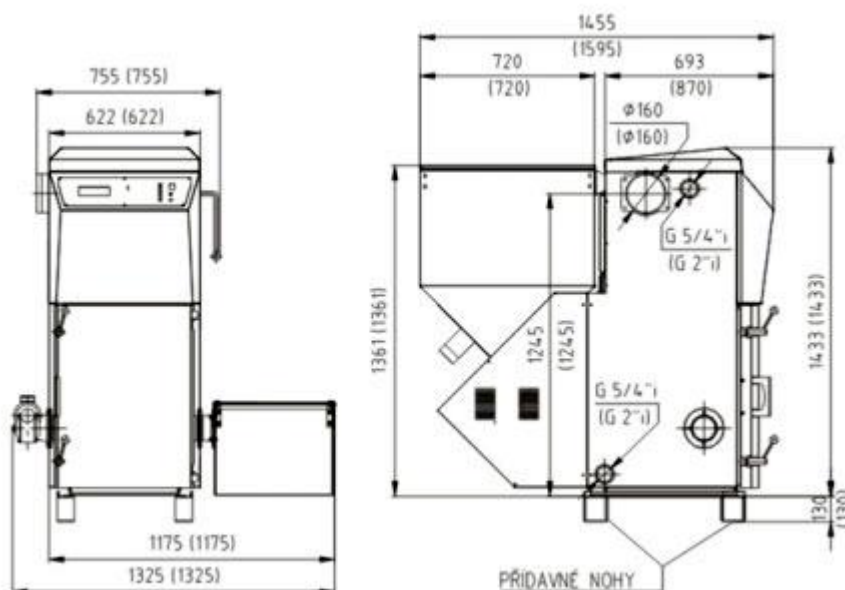


Obr. 3.1 Schéma topného systému [20]

3.1 Použité přístroje

KOTEL

Proces spalování probíhal na kotli na tuhá paliva od firmy VERNER, konkrétně typ A251. Jmenovitý výkon kotle je 25 kW a je možné jej regulovat od 30 až do 120 % výkonu. Výrobce garantuje účinnost 92 % při spalování více jak 50 druhů paliv. Uvedené schéma kotle úplně neodpovídá realitě, jelikož kotel byl upraven pro laboratorní podmínky. Kvůli požadavkům na váhu byl vyměněn zásobník na pelety za menší. [21,22]



Obr. 3.2 Schéma kotle VERNER A251[22]

Spalování probíhá ve speciálně navrženém hořáku, který má funkci samočinného roštování, díky kterému je možné spalovat paliva s vyšší spékavostí. Palivo je umístěno v násypce na zadní straně kotle a je dopravováno do hořáku pomocí šnekového podavače.

Hlavní části kotle:

Hořák – místo spalování pelet. Celý je obložen tvarovkami ze speciální jakostní keramiky. Na zadní stěně vystupují 3 otvory pro vhánění primárního vzduchu a 2 otvory pro vhánění sekundárního vzduchu. Dno tvoří pohyblivý rošt, který zajišťuje odvod popela do speciální nádoby.

Kotlové těleso – skládá se z ocelových plechů a tloušťce 4 a 5 mm, v rizikových místech až 8 mm. Nachází se nad hořákovým prostorem. Spodní části jsou v kontaktu s plamenem, tudíž jsou dvojité, chlazené vodou. V horní části je třítahový žárotrubný spalínový výměník, který tvoří 24 trubek o světlosti 50 mm.

Pohon – dopravu pelet do prostoru hořáku zajišťuje šnekový dopravník poháněný elektromotorem. O roštování se stará pákový mechanismus propojeným s excentrem. Pohyb roštnic je opatřen koncovým spínačem tak, aby se vždy zastavil ve spodní poloze a nedošlo tak jejímu opalování.

Havarijní hasicí zařízení – důležitá věc v případě, když by došlo k prohoření pelet až směrem do násypky. Nad trubku, ve které se nachází šnek, je připevněna nádoba s vodou a je s ní spojena nátrubkem. V nátrubku se nachází vosková zátka. Při překročení určité teploty se vosková zátka roztaví a celý podavač se zaplaví vodou.

Násypka – svařená plechová nádoba na zadní straně kotle. Musí být hermeticky uzavřená.

Vzduchování - obsahuje ventilátor se zpětnou klapkou, který přivádí vzduch. Ten se ještě před vstupem do prostoru hořáku musí předehrát pomocí spirálové zapalovací tyče. Vzduchování je též propojeno se spadem paliva, aby zde vznikl přetlak. Díky tomu nevniká kouř do prostoru násypky a podavače.

Ovládací panel – obsahuje mikroprocesorovou jednotku, která zajišťuje automatický chod kotle včetně jeho roztápění i odstavení. Lze do něj zapojit další přídatné zařízení jako jsou čerpadla, čidla teploty, lambda sonda a další.



Obr. 3.3 Rošt kotle

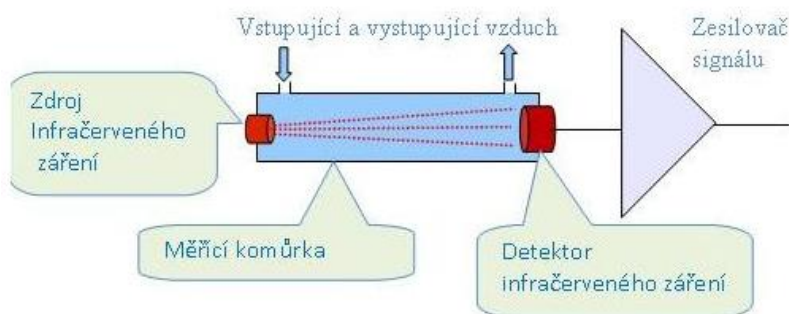


Obr. 3.4 Kotel VERNER A251

ULTRAMAT SIEMENS 21/O2 a 22

Jedná se o analyzátor spalin, který umožňuje měření vybraných sloučenin aktivních v infračerveném záření a určit chemické spektrum. Měření probíhá NDIR metodou – metoda nedisperzní infračervené spektrometrie. V tomto experimentu hledáme koncentrace CO, NO, SO₂ a procentuálního množství O₂ ve spalinách.

Metoda NDIR funguje na principu vyslání infračerveného záření a měření jeho útlumu. Na základě toho se vyhodnotí koncentrace látky ve vzduchu. [23]



Obr. 3.5 Schéma fungování metody NDIR [23]

Ještě před tím, než jsou spaliny analyzovány, musí být očištěny. První jsou odstraněny mechanické nečistoty pomocí dvou filtrů. Následně projdou přes vysoušecí jednotku, která odstraní vlhkost ve směsi.

Při spalování digestátu vzniká oxid siřičitý. Ten je velmi dobře rozpustný ve vodě. Odebírané spaliny z komína mají výrazně vyšší teplotu, než je teplota okolí, tudíž se na hadici, která vede z komína k vysoušecí jednotce se může objevit kondenzace. Díky tomu se oxid siřičitý rozpustí a nelze jej naměřit. Proto je potřeba vyměnit obyčejnou hadici za otápěnou a zaizolovanou hadici. Vyhřívá se na teplotu cca 200 °C.



Obr. 3.6 ULTRAMAT SIEMENS 21/O2 a 22



Obr. 3.7 Vysoušecí jednotka



Obr. 3.8 Komín kotle s čidly
na měření emisí



Obr. 3.9 Uživatelské prostředí programu pro monitorování kotle

VÁHA METLER TOLEDO ICS 669

Digitální váha sloužící k určení úbytku paliva při spalování. Díky ní lze vypočítat hmotnostní tok paliva.

3.2 Průběh měření

Nejprve bylo nutné připravit kotel na měření, to znamenalo vybrat všechny zbytky předchozího paliva a kompletně vysát prostor hoření a nádobu na popel. Poté se vynulovala digitální váha, aby bylo možné měřit hmotnostní tok a úbytek paliva.

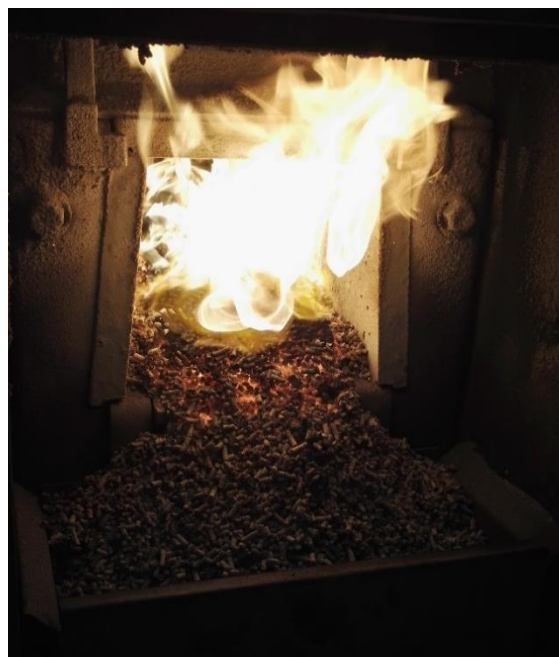
Následoval začátek hoření. Kotel se roztopil na dřevních peletách a poté do něj byly naloženy pelety z digestátu. Ze začátku bylo zvoleno základní nastavení kotle viz tab. 3.1. Dále bylo nutné, aby došlo k odhoření všech dřevních pelet a zbyl zde pouze digestát. Později byly provedeny poslední úpravy nastavení a mohlo začít první měření.

čas	Interval plnění [s]	Doba plnění [s]	Ventilátor	Interval roštování [min]	Poznámka
9:00					Zapálení pelet
9:30	16	3	4. stupeň	12	
10:17				5	Změna intervalu roštování kvůli jeho zasypávání.
10:38	17s				Změna intervalu plnění.
10:57					Začátek prvního měření.
11:57			3. stupeň	3	Změna intervalu roštování kvůli jeho zasypávání. Snížení výkonu ventilátoru. Konec prvního měření.
12:12					Začátek druhého měření.
13:12					Konec měření

Tab. 3.1 Časový harmonogram měření



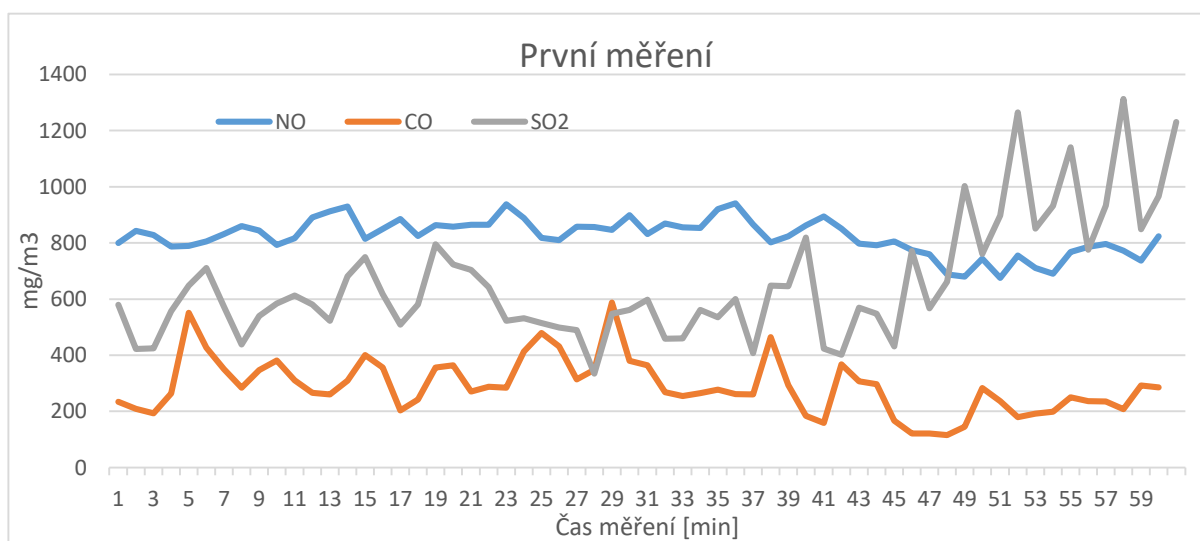
Obr. 3.11 Přehřívání rošt



Obr. 3.10 Přehřívání rošt po vyčištění

První měření

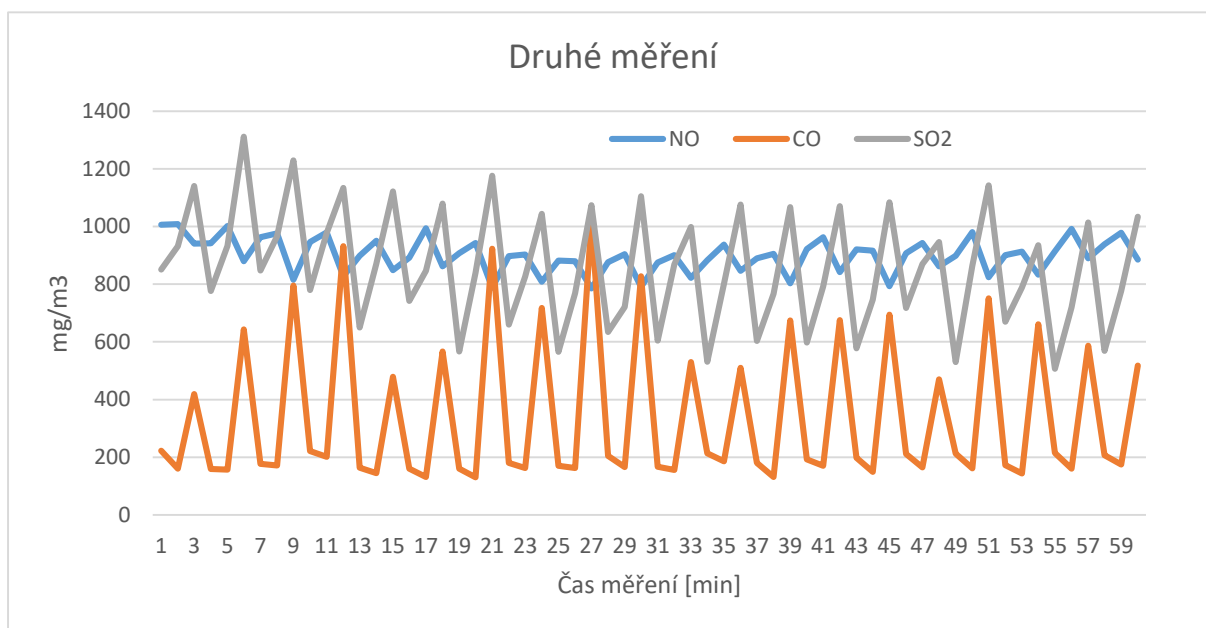
Začátek byl v čase 10:57. Trvalo 60 minut a za tu dobu bylo spáleno 7 kg pelet. Během měření byla hlavně sledována produkce emisí a škodlivin. Výsledky se pak po přepočítání porovnávaly s normou ČSN EN 303-5. Z obr. 3.1 prvního měření je možné vysledovat, že produkce látek nemá žádnou periodizaci a ani se nedrží na stálých hodnotách. Po otevření kotle po prvním měření bylo zjevné, že rošt byl přehříván. Byl tedy vybrán a zkrátil se interval roštování.



Obr. 3.12 Průběh škodlivin v prvním měření

Druhé měření

V druhém měření byl nastaven jiný režim kotle změnou výkonu ventilátoru. Z obr. 3.2 lze vyčíst, že má odlišný průběh od prvního měření. Je možné na něm pozorovat jasnou periodizaci, nárůst a pokles měřených hodnot. Interval nárůstu odpovídá nastavenému intervalu roštování. Nejvíce škodlivin se tudíž uvolňuje, když je pohybováno s hořícími peletami.



Obr. 3.13 Průběh škodlivin v druhém měření

3.3 Palivo

Jako palivo byl použit zpeletovaný digestát. Pelety měly tvar malého válečku o průměru 6 mm. Délka každého válečku byla jiná, zhruba od 5 do 15 mm. Různá délka byla zapříčiněná nesoudržností pelet, které se lámaly na menší kusy. Celkově jde o velmi levné palivo, jehož cena se pohybuje okolo 300 Kč za tunu. Jelikož potřebné hodnoty pro pelety nebyly známy, vypočítaly se z hodnot pro bezvodý vzorek při zavedení 10% obsahu vody v peletách. Prvkový rozbor paliva včetně jeho vlastností lze vidět v tab. 3.2.



Obr. 3.15 Pelety z digestátu



Obr. 3.14 Rozměry pelet

	Značka	Bezvodý vzorek	Pelety	Jednotka
Voda veškerá	W^d		10,00	%
Popel	A^d	45,39	40,85	%
Hořlavina	h^d	54,61	49,15	%
Prchavá hořlavina	V^d	41,95	37,76	%
Spalné teplo	Q_s^d	11,39	10,25	MJ/kg
Výhřevnost	Q_i^d	10,64	9,58	MJ/kg
Uhlík	C^d	30,44	27,40	%
Vodík	H^d	3,45	3,11	%
Dusík	N^d	2,35	2,12	%
Kyslík	O^d	18,08	16,27	%
Síra	S^d	0,35	0,32	%

Tab. 3.2 Hodnoty pelet z digestátu

3.4 Výpočet účinnosti kotle

Účinnost kotle byla vypočítána nepřímou metodou. Tato metoda vychází z úvahy, že teoretická účinnost ideálního kotle 100 % je u reálného kotle snížena o jednotlivé ztráty. Díky dílčím výpočtům je pak jasné, kde dochází k největším ztrátám a kde se může pracovat na snížení těchto ztrát nejefektivněji. [29]

$$\eta = 100 - \sum Z_i \quad (3.1)$$

$$\sum Z_i = Z_C + Z_{CO} + Z_f + Z_k + Z_{sv} \quad (3.2)$$

kde η celková účinnost [%]

Z_i celková ztráta [%]

Z_C ztráta způsobená únikem hořlaviny v tuhých zbytcích [%]

Z_{co}	ztráta způsobená únikem plynné hořlaviny ve spalínách	[%]
Z_f	ztráta způsobená únikem tepla v tuhých zbytcích	[%]
Z_k	ztráta způsobena únikem tepla ve spalínách	[%]
Z_{sv}	ztráta způsobena odevzdáním tepla do okolí (sáláním a vedením)	[%]

Pro potřeby výpočtu je nutné stanovit objem spalín. Ten se zjednodušenou metodou může určit z výhřevnosti paliva. Tato metoda není úplně přesná, ale vzniklá chyba je zanedbatelná oproti přesnému výpočtu pomocí hmotnostních zastoupení jednotlivých prvků.

$$V_{ss} = 0,2365 \times Q_i + 0,4467 \quad (3.3)$$

kde	V_{ss}	objem suchých teoretických spalín	[m ³ /kg]
	Q_i	výhřevnost paliva	[MJ/kg]

Přepočet suchých spalín na referenční obsah kyslíku ve spalínách

$$O_p = \frac{V_{ss} \times 20,95}{20,95 - O_{2ref}} \quad (3.4)$$

kde	O_p	objem vzniklých spalín spálením 1 kg paliva	[m ³ /kg]
	O_{2ref}	referenční obsah kyslíku ve spalínách	[%]

Výpočty dílčích ztrát

Největší podíl na ztrátách má ztráta únikem tepla ve spalínách (tzv. komínová ztráta).

$$Z_k = \frac{O_p \times c_p \times (t_k - t_{air})}{Q_i} \times 100 \quad (3.5)$$

kde	c_p	střední měrná tepelná kapacita vlhkých spalín	[J/(K×m ³)]
	t_k	teplota spalín na výstupu z kotle	[°C]
	t_{air}	teplota vzduchu na vstupu do kotle	[°C]

Ztráta Z_{co} je způsobená nedokonalým spalováním hořlaviny paliva. Hořlavé složky unikají ve spalínách a tím snižují celkovou účinnost.

$$Z_{co} = \frac{\sum Q_{Hi} \times \bar{\omega}_i \times O_p}{Q_i} \times 100 \quad (3.6)$$

kde	Q_{Hi}	výhřevnost hořlavých složek	[kJ/m ³]
	$\bar{\omega}_i$	objemový podíl hořlavé složky v suchých spalínách	
	O_p	množství suchých spalín vzniklých z 1 kg paliva	[kg]

Ztráta způsobená únikem hořlaviny v tuhých zbytcích.

$$Z_c = \frac{A_{kg}^r \times C \times Q_c}{Q_i \times (1 - C)} \times 100 \quad (3.7)$$

kde	A_{kg}^r	obsah popele ve spalovaném palivu	[kg]
	C	podíl hořlaviny	[kg]
	Q_c	výhřevnost hořlaviny (obvykle 32 600 000 J/kg)	[J/kg]
	Q_i	výhřevnost paliva	[J/kg]

Vzorový výpočet pro první měření

Při výpočtu jednotlivých ztrát byly brány v potaz pouze ztráta komínová, únikem plynné hořlaviny ve spalínách a únikem hořlaviny v tuhých zbytcích. Zbylé ztráty jsou oproti těmto vybraným tak malé, že jsou zanedbatelné. Referenční hodnota kyslíku ve spalínách byla 11,1 %. Teplota spalín a okolního vzduchu byla 253 °C respektive 20 °C. Průměrná hodnota emisí CO byla 289 mg/m³.

Objem suchých spalín

$$V_{ss} = 0,2365 \times 9,58 + 0,4467 = 2,71 \frac{m^3}{kg} \quad (3.8)$$

Přepočet suchých spalín na referenční obsah kyslíku ve spalínách

$$O_p = \frac{2,71 \times 20,95}{20,95 - 11,1} = 5,77 \frac{m^3}{kg} \quad (3.9)$$

Ztráta způsobená únikem hořlaviny v tuhých zbytcích

$$Z_c = \frac{0,4085 \times 0,1119 \times 32600000}{9580000 \times (1 - 0,1119)} \times 100 = 17,5 \% \quad (3.10)$$

Ztráta únikem tepla ve spalínách

$$Z_k = \frac{5,19 \times 1376 \times (253 - 20)}{9,58 \times 10^6} \times 100 = 17,18 \% \quad (3.11)$$

Ztráta způsobená únikem plynné hořlaviny ve spalínách

$$Z_{co} = \frac{12,62 \times 10^6 \times 0,0002 \times 5,7689}{9,58 \times 10^6} \times 100 = 0,18 \% \quad (3.12)$$

Výpočet celkové účinnosti

$$\eta = 100 - 17,5 - 17,18 - 0,17 = 63 \% \quad (3.13)$$

Pro druhé měření byl výpočet obdobný a díky lepším parametrům spalování byla účinnost 68,8 %.

3.5 Emise a škodliviny

Norma ČSN EN 303-5 určuje maximální koncentraci látek v mg/m³ při 10 % kyslíku a podle výsledku rozděluje palivo do jednotlivých tříd.

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný výkon	Mezní hodnoty emisí								
			CO			OGC			prach		
			mg/m ³ při 10% O ₂ ^a								
			kW	třída	třída	třída	třída	třída	třída	třída	třída
		3	4	5	3	4	5	3 ^b	4	5	
ruční	biopaliva	≤ 50	5 000	1 200	700	150	50	30	150	75	60
		> 50 ≤ 150	2 500			100			150		
		> 150 ≤ 500	1 200			100			150		
	fosilní paliva	≤ 50	5 000			150			125		
		> 50 ≤ 150	2 500			100			125		
		> 150 ≤ 500	1 200			100			125		
samočinná	biopaliva	≤ 50	3 000	1 000	500	100	30	20	150	60	40
		> 50 ≤ 150	2 500			80			150		
		> 150 ≤ 500	1 200			80			150		
	fosilní paliva	≤ 50	3 000			100			125		
		> 50 ≤ 150	2 500			80			125		
		> 150 ≤ 500	1 200			80			125		

Tab. 3.3 Mezní hodnoty emisí [24]

Přepočet hodnot na koncentraci při 10 % O₂

Měření 1

$$CO = CO_{průměr} \times \frac{(21 - O_{2stand})}{(21 - O_{2prům})} = 322 \text{ mg/m}^3 \quad (3.14)$$

Měření 2

$$CO = CO_{průměr} \times \frac{(21 - O_{2stand})}{(21 - O_{2prům})} = 295 \text{ mg/m}^3 \quad (3.15)$$

kde CO	koncentrace CO ve spalínách při 10 % O ₂	[mg/m ³]
CO _{průměr}	průměrná naměřená koncentrace CO ve spalínách	[mg/m ³]
O _{2stand}	standardizovaný obsah O ₂ = 10 %	[%]
O _{2prům}	množství O ₂ ve spalínách	[%]

Kotel Verner A251 o výkonu 25 kW má samočinnou dodávku paliva a digestát je v kategorii biopaliv. Průměrná hodnota CO v prvním měření byla 322 mg/m³, v druhém pak 295 mg/m³. Výsledek je, že spalování digestátu vyhovuje nejpřísnější třídě 5.

Do budoucna se ale s tlakem na minimalizaci emisí a produkci škodlivin a maximalizaci využití energie představují nové souhrnné emisní požadavky. Spalování tuhých paliv pro vytápění domů v malých kotlích velmi ovlivňuje kvalitu ovzduší, tím došlo ke zpřísnění limitů všech škodlivých látek. Tato norma vstoupí v platnost v roce 2020. To také znamená zvýšení ceny kotlů z důvodu větší technické náročnosti pro dosažení minimální potřebné třídy 5. Nová norma klade požadavky nejen na obsah oxidu uhelnatého, ale i na obsah NO_x částic. Pro porovnání je nutné přepočítat hodnoty NO na referenční obsah kyslíku. [26]

Kotle na tuhá paliva – parametry pro Ekodesign	Limitní hodnoty – platnost od 1.1.2020
sezónní energetická účinnost vytápění [%]	75 (kotle o výkonu ≤ 20 kW) 77 (kotle o výkonu > 20 kW)
pevné částice (PM)	40 (automaticky provozované kotle) 60 (manuálně provozované kotle)
organické plynné sloučeniny (OGC) [mg/m ³]	20 (automaticky provozované kotle) 30 (manuálně provozované kotle)
oxid uhelnatý (CO) [mg/m ³]	500 (automaticky provozované kotle) 700 (manuálně provozované kotle)
oxidy dusíku (NO _x) [mg/m ³]	200 (kotle na biomasu) 350 (kotle na fosilní paliva)

Tab. 3.4 Limitní hodnoty parametrů pro Ekodesign [26]

Měření 1

$$NO = NO_{průměr} \times \frac{(21 - O_{2stand})}{(21 - O_{2prům})} = 914 \text{ mg/m}^3 \quad (3.16)$$

Měření 2

$$NO = NO_{průměr} \times \frac{(21 - O_{2stand})}{(21 - O_{2prům})} = 782 \text{ mg/m}^3 \quad (3.17)$$

kde NO koncentrace NO ve spalínách při 10 % O₂ [mg/m³]

NO_{průměr} průměrná naměřená koncentrace NO ve spalínách [mg/m³]

Vypočtené hodnoty pro NO několikanásobně překračují dovolené hodnoty pro rok 2020. Taktéž účinnost je velmi nízká, tudíž tento typ pelet je vhodný ke spalování pouze do konce platnosti konkrétní normy.

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo zjištění, jestli je digestát možné využívat jako palivo. V první kapitole byla rozebrána podstata biomasy, její charakteristika a využití. Využití biomasy jako paliva se jeví jako dobrý způsob. Za nejvhodnější vstupní produkt se považují rostliny přímo pěstované pro energetické využití. Další nespornou výhodou je využití odpadů, jak rostlinného tak i živočišného původu. Nejvyšší účinnost má při využití produkce tepla. Ta se může pohybovat okolo 90 %. Dále je též vhodná k tzv. kogenerační výrobě, což kombinuje výrobu tepla a elektřiny. Čistá výroba elektřiny z biomasy není tak rozšířená, jelikož má velmi malou účinnost, dokonce menší než 50 %.

V druhé kapitole byl rozebrán samotný digestát. Ten vzniká jako odpad při anaerobní fermentaci na bioplynových stanicích. Má využití především jako hnojivo. Avšak je možné ho taky dále zpracovávat pro potřebu získávání elektrické nebo tepelné energie. Především se tedy pro zlepšení vlastností musí odstranit velké procento vody, které obsahuje. Pak následuje zpeletování. Digestát se dá spalovat v kotlích, které jsou určeny pro biomasu. Na rozdíl od fosilních paliv se však jedná o složitý termický proces, jelikož vznikající plyny mají každý jinou teplotu hoření. Může se tedy stát, že hoří pouze část materiálu. Taktéž další nevýhodou je velký obsah popele.

Ve třetí kapitole proběhl experiment, na jehož základě se mohlo rozhodnout o vhodnosti použití. Tento experiment proběhl v prostorách VUT v Brně. Spalování probíhalo v automatickém kotli VERNER A251 o výkonu 25 kW. Byla provedena dvě měření, každé z nich trvalo 60 minut. Rozdíl v těchto měřeních byl v jiném nastavení kotle. To bylo z důvodu hledání optimálního nastavení pro co nejlepší účinnost. Dalším důležitým faktorem bylo sledování emisí. Při pohledu do blízké budoucnosti lze pozorovat jasnou snahu o co nejnižší produkci emisí při výrobě tepla nebo elektřiny. Vzhledem k tomu, že biomasa obecně má téměř nulovou bilanci CO₂, zdá se být lepším materiálem než fosilní palivo. První i druhé měření ukázalo, že produkce CO se pohodlně vejde do limitních hodnot nejvyšší třídy 5 současné normy. Zanedlouho ale začne platit nová norma, kde se posuzuje nejen produkce CO, ale i NO_x částic a celková účinnost procesu. Účinnost u prvního měření byla 63 %, u druhého pak 68,8 %. To je velmi nízká účinnost, která je navíc pod limitní hodnotou 77% účinnosti dané pro rok 2020. Produkce NO částic dokonce několikanásobně překročila povolenou hodnotu pro Ekodesign. Z toho tedy vyplývá, že výroba tepelné energie z tohoto typu digestátu je i přes nízkou účinnost možná, ale pouze do roku 2020.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. PASTOREK, Zdeněk, Jaroslav KÁRA a Jevič PETR. Biomasa obnovitelný zdroj energie: obnovitelný zdroj energie. Praha. FCC PUBLIS s.r.o., 0004n. 1. ISBN 80-86534-06-5.
2. Biomasa – využití, zpracování, výhody a nevýhody, energetické využití v ČR [online]. 2017 [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/biomasa-vyuziti-zpracovani-vyhody-a-nevyhody/>
3. Biomasa vhodná pro výrobu bioplynu, fyzikálně-chemické vlastnosti [online]. [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: http://www.bioplyn.cz/at_suroviny.htm
4. Anaerobní technologie [online]. [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: http://www.bioplyn.cz/at_popis.htm
5. PANČÍKOVÁ, Jana. Digestáty a jejich využití v zemědělství [online]. 2016 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://uroda.cz/digestaty-a-jejich-vyuziti-vzemedelstvi/>
6. JANDAČKA, Jozef. Druhy biomasy [online]. 22. 5. 2007, 9 [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: http://www.biomasa-info.sk/docs/05jandacka_s.pdf
7. Biomasa - paliva [online]. [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: https://www.ib.cvut.cz/sites/default/files/Studijni_materialy/AZE/P8-biomasa_paliva.pdf
8. BIOMASS AT A GLANCE [online]. [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: http://www.need.org/Files/curriculum/Energy%20At%20A%20Glance/BiomassAtAGlance_11x17.pdf
9. Vhodné druhy dřeva [online]. [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <http://www.palivovee-drevo.cz/vhodne-druhy-dreva.html>
10. JEWETT, Tim. Biologicky rozložitelné komunální odpady [online]. [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=biologicky_rozlozitelne_komunalni_odpady&site=odpady
11. ALTMANN, Vlastimil. Nakládání s biologicky rozložitelnými odpady [online]. [cit. 2018-05-07]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/nakladani-s-biologicky-rozlozitelnymi-odpady>
12. Vlastnosti BP [online]. [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: http://www.bioplyn.cz/at_vlastnosti.htm
13. Pohon motorového vozidla na bioplyn (biometan) [online]. [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <https://lpg-cng.ochranamotoru.cz/doprava-slapni-na-plyn-auto-autobus-bioplyn.htm>
14. Bioplynové stanice [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <http://www.power-energo.cz/produkty/bioplynove-stanice.html>
15. Příručka pro nakládání s digestátem a fugátem [online]. , 30 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: http://eagri.cz/public/web/file/32326/ETAPA_IV_Metodika_digestt_FV.pdf
16. DOŠEK, Michal, Marek HOLBA a Michal ČERNÝ. Technologie vs. fermentační zbytek [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://www.odpadoveforum.cz/TVIP2015/prispevky/033.pdf>

17. KOUTNÝ, Roman. *Termické využití separátu po anaerobní fermentaci biologicky rozložitelných odpadů* [online]. [cit. 2018-05-17]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/termicke-vyuziti-separatu-po-anaerobni-fermentaci-biologicky-rozlozitelnych-odpadu>
18. *Způsoby nakládání s odpady* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://vdb.czso.cz/vdbvo2/faces/index.jsf?page=vystup-objekt&pvo=ZPR08&z=T&f=TABULKA&katalog=30842&str=v50>
19. KOUTNÝ, Roman a Jaroslav KÁRA. *Využití fermentačních zbytků anaerobní digesce jako paliva* [online]. 30. 12. 2009 [cit. 2018-05-17]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyuziti-fermentacnich-zbytku-anaerobni-digesce-jako-paliva>
20. SEDLÁČEK, Daniel. *ANALÝZA ENERGETICKÉHO VYUŽITÍ KÁVOVÝCH PELET* [online]. Brno, 2016 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=126822. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. Martin Lisý, Ph.D.
21. *PROJEKČNÍ PODKLADY pro automatické kotle VERNER A251 a A501* [online]. 10. 6. 2010, 26 s [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://www.kotle-verner.cz/data/sharedfiles/3123/Projek%C4%8Dn%C3%AD%20podklady%20na%20A251%20a%20A501.pdf>
22. *Automatické kotle VERNER A251* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://esveko.esel.cz/w/2326/automaticke-kotle-verner-a251>
23. *Princip čidel kvality vzduchu* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://www.codychame.cz/cz/domacnosti/index.php?novinka=moznosti-mereni-kvality-vzduchu-v-mistnosti>
24. ČSN EN 303-5:2012: Kotle pro ústřední vytápění – Část 5: Kotle pro ústřední vytápění na pevná paliva, s ruční a samočinnou dodávkou, o jmenovitém tepelném výkonu nejvýše 500 kW – Terminologie, požadavky, zkoušení a značení. CEN, 2013
25. LISÝ, Martin, Marek BALÁŠ, Pavel MILČÁK a Jiří ŠKORPÍK. *Zplyňování digestátu a čistírenského kalu*. Brno, 2017. Vysoké učení technické v Brně.
26. STUPAVSKÝ, Vladimír. *Směrnice o Ekodesignu pro kotle a kamna na tuhá paliva* [online]. 6. 11. 2014 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/kotlikove-dotace/11937-smernice-o-ekodesignu-pro-kotle-a-kamna-na-tuha-paliva>
27. TURLEY, David, Lucy HOPWOOD, Caitlin BURNS a Davide DI MAIO. *Assessment of digestate drying as an eligible heat use in the Renewable Heat Incentive* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: http://european-biogass.eu/wp-content/uploads/files/2013/10/EBA-opinion_Digestate-drying_220513.pdf
28. *Národní technologická platforma pro bioplyn* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <http://www.czba.cz/>
29. HORÁK, Jiří, František HOPAN a Kamil KRPEC. *Stanovení účinnosti kotlů* [online]. 21.4.2014 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/11107-stanoveni-ucinnosti-kotlu>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
A^d	Popel	%
A_{kg}^r	Obsah popele ve spalovaném palivu	kg
C	Podíl hořlaviny	kg
C^d	Uhlík	%
CO	Koncentrace CO ve spalínách při 10 % O ₂	mg/m ³
$CO_{průměr}$	Průměrná naměřená koncentrace CO ve spalínách	mg/m ³
c_p	Střední měrná tepelná kapacita vlhkých spalin	J/(K×m ³)
h^d	Hořlavina	%
H^d	Vodík	%
η	Účinnost	%
N^d	Dusík	%
NO	Koncentrace NO ve spalínách při 10 % O ₂	mg/m ³
$NO_{prům}$	Průměrná naměřená koncentrace NO ve spalínách	mg/m ³
$O_{2prům}$	Množství O ₂ ve spalínách	%
O_{2stand}	Standardizovaný obsah O ₂ = 10 %	%
O^d	Kyslík	%
O_p	Množství suchých spalin vzniklých z 1 kg paliva	%
Q_c	Výhřevnost hořlaviny	J/kg
Q_{Hi}	Výhřevnost hořlavých složek	kJ/m ³
Q_i^d	Výhřevnost digestátu	MJ/kg
Q_s^d	Spalné teplo	MJ/kg
S^d	Síra	%
t_{air}	teplota vzduchu na vstupu do kotle	°C
t_k	teplota spalin na výstupu z kotle	°C
V^d	Prchavá hořlavina	%
V_{ss}	Objem suchých teoretických spalin	m ³ /kg
W^d	Voda veškerá	%
Z_c	Ztráta způsobená únikem hořlaviny v tuhých zbytcích	%
Z_{co}	Ztráta způsobená únikem plynné hořlaviny ve spalínách	%
Z_f	Ztráta způsobená únikem tepla v tuhých zbytcích	%
Z_i	Celková ztráta	%

Z_k	Ztráta způsobena únikem tepla ve spalínách	%
Z_{sv}	Ztráta způsobena odevzdáním tepla do okolí (sáláním a vedením)	%
$\bar{\omega}_t$	Objemový podíl hořlavé složky v suchých spalínách	-