



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

VLASTNOSTI ALTERNATIVNÍCH PALIV Z BIOMASY

ALTERNATIVE BIOMASS FUELS PROPERTIES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Krejčířík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Lisý, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: Jiří Krejčířík
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: Ing. Martin Lisý, Ph.D.
Akademický rok: 2016/17

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:

Vlastnosti alternativních paliv z biomasy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce bude zaměřena na stanovení základní palivové charakteristiky alternativních biomasových paliv (energetické komposty, fermentát, apod.) a porovnání výsledků s publikovanými výsledky. Dále se věnovat podmínkám spalování těchto paliv s důrazem na tvorbu emisí TZL.

Cíle bakalářské práce:

- Provést rešerži vlastností TAP jako paliva.
- Provést rešerži spalování TAP se zaměřením na tvorbu TZL.
- Experimentálně stanovit vlastnosti vybraných paliv a ověřit tvorbu emisí TZL na pilotní jednotce.

Seznam doporučené literatury:

BALÁŠ, Marek. Kotle a výměníky tepla. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 9788021447707.

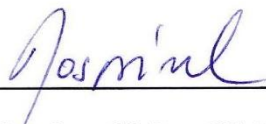
PASTOREK, Zdeněk, Jaroslav KÁRA a Petr JEVIČ. Biomasa: obnovitelný zdroj energie. Praha: FCC Public, 2004. ISBN 80-86534-06-5.

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

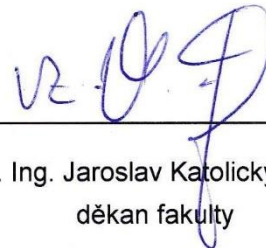
Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 27. 10. 2016





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



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

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá vlastnostmi alternativních paliv z biomasy a jejich spalováním v domovních spalovacích zařízeních se zaměřením na tvorbu emisí tuhých znečišťujících látek. V první kapitole práce je nejprve popsáno, co jsou to tuhá alternativní paliva, jak se vznikají a jaké jsou jejich vlastnosti jako paliva. Ve druhé části je popsáno spalování alternativních paliv z biomasy se zaměřením na tvorbu emisí. Třetí kapitole bakalářské práce je zaměřena na experimentální ověření palivových vlastností alternativních paliv z biomasy. Dále je zde praktické ověření tvorby emisí se zaměřením na tvorbu tuhých znečišťujících látek.

Klíčová slova

Alternativní paliva, biomasa, energetický kompost, fermentační zbytek, kaly, spalování, tuhá alternativní paliva, tuhé znečišťující látky

Abstract

This bachelor thesis follows up attributes of alternative fuels made from biomass and burning them in home combustion equipment with taking into account the process of creating emissions of solid pollutants. There can be found definition of solid alternative fuels with description of how are they made and also their attributes as fuels in the first chapter of this thesis. In the second part can be found description of burning alternative fuels made from biomass with taking into account the process of creating emissions. The third chapter of this bachelor thesis is focused on experimental testing of fuel attributes of alternative fuels made from biomass. There is also practical test of creating emissions with focus on creating solid pollutants in this part.

Keywords

Alternative fuels, biomass, energy compost, fermentation residue, sludge, combustion test, solid alternative fuels, solid pollutants

Bibliografická citace

KREJČÍŘÍK, J. *Vlastnosti alternativních paliv z biomasy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 57 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Lisý, Ph.D..

Prohlášení o původnosti práce

Tímto prohlašuji, že jsem bakalářskou práci, která nese název *Vlastnosti alternativních paliv z biomasy* vypracoval samostatně, s využitím pouze citovaných zdrojů, odborné literatury a konzultací s vedoucím práce Ing. Martinem Lisým, Ph.D. Veškeré použité prameny jsou uvedeny v seznamu zdrojů.

V Brně dne 26. května 2017

.....
Podpis
Jiří Krejčířík

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu Ing. Martinu Lisému, Ph.D. za čas a odborné rady, které mi pomohly při tvorbě práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Otakaru Štelcovi za pomoc při palivových a spalovacích zkouškách. V neposlední řadě bych rád poděkoval za podporu celé své rodině.

OBSAH

Úvod	15
1 TUHÁ ALTERNATIVNÍ PALIVA	17
1.1 Klasifikace TAP.....	17
1.2 Obecné vlastnosti paliv.....	17
1.2.1 Voda v palivu.....	17
1.2.2 Popelovina v palivu.....	17
1.2.3 Hořlavina v palivu.....	18
1.2.4 Spalné teplo.....	18
1.2.5 Výhřevnost.....	18
1.3 Fermentační zbytky.....	18
1.3.1 Mokrý fermentace.....	18
1.3.2 Suchá fermentace.....	19
1.4 Energetické komposty.....	21
1.4.1 Výroba energetických kompostů ve fermentoru EWA.....	21
1.4.2 Vlastnosti energetického kompostu pro spalování.....	22
1.5 Kaly.....	23
2 SPALOVÁNÍ TAP	25
2.1 Roštové kotle.....	25
2.2 Emisní faktory při spalování.....	26
2.2.1 Emise CO.....	26
2.2.2 Emise NO _x	27
2.2.3 Emisní faktory SO ₂	27
2.2.4 Emisní faktory chlóru.....	28
2.2.5 Emisní faktory tuhých znečišťujících látek (TZL).....	28
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	29
3.1 Prvkový rozbor.....	30
3.2 Stanovení výhřevnosti.....	31
3.3 Stanovení vlhkosti.....	35
3.4 Stanovení popeloviny.....	36
3.5 Spalovací zkouška.....	38
3.5.1 Popis spalovacího zařízení.....	38
3.5.2 Měření emisí CO, NO _x	42
3.5.3 Měření TZL.....	48
Závěr	51

Seznam použitých zdrojů	52
Seznam obrázků	54
Seznam tabulek	54
Seznam použitých symbolů a zkratek	56

Úvod

Lidstvo je v současné době velmi závislé na fosilních palivech (např. uhlí, ropa, zemní plyn, aj). U těchto paliv jsou významnými problémy jejich vliv na životní prostředí, neobnovitelnost a nejisté dodávky, vzhledem k nestabilní politické situaci v některých zemích produkujících tyto paliva. Díky těmto důvodům se v posledních letech zvyšuje význam obnovitelných zdrojů energie.

Mezi obnovitelné zdroje energie patří ty zdroje, u kterých nedojde v rámci jedné lidské generace k výraznému poklesu, tzn. tyto zdroje jsou obnoveny lidskou nebo přírodní činností. Příklady těchto zdrojů jsou sluneční, větrná a vodní energie a také biomasa.

Část obnovitelných zdrojů tvoří tuhá alternativní paliva tzv. TAPY. Tímto druhem obnovitelných zdrojů se má práce zabývat. Tato paliva jsou z velké části tvořena odpady pocházejícími z lidské činnosti. Můžou to být například vytríděné komunální odpady, odpady ze zemědělské činnosti aj.

V této práci jsou popsány vlastnosti využívaných paliv jako jsou fermentační zbytky, energetické komposty a kaly z ČOV. Dále jsem provedl rešerši na spalování TAP se zaměřením na tvorbu tuhých znečišťujících látek. Poslední část práce přináší informace o provedených palivových a prvkových rozborech, a také o spalovací zkoušce energetického kompostu.

1 TUHÁ ALTERNATIVNÍ PALIVA

Tuhá alternativní paliva, dále jen TAP, jsou specifikovány podle normy ČSN EN 15357/59, jako paliva vyrobená z odpadů neklasifikovaných jako nebezpečné. Vstupním odpadem může být specifický odpad z výroby, tuhý komunální odpad, průmyslový odpad, obchodním odpad, odpad ze staveb a demolic, čistírenské kaly aj. [1]

1.1 Klasifikace TAP

Klasifikace podle ČSN EN 15359 je zařazení paliv do tříd. Je založena na určení limitních hodnot pro tři důležité charakteristiky. Těmi jsou průměrná výhřevnost (a_r), průměrná hodnota obsahu chloru (d) a medián a 80. percentil hodnot obsahu rtuti (a_r). Každá z výše uvedených charakteristik je rozdělena do 5 tříd. [1]

Tab. 1-1 Systém klasifikace TAP [1]

Klasifikační charakteristika	Statistická míra	Jednotka	Třídy				
			1	2	3	4	5
Výhřevnost (NCV)	Průměrná hodnota	MJ/kg (a_r)	≥ 25	≥ 20	≥ 15	≥ 10	≥ 3
Klasifikační charakteristika	Statistická míra	Jednotka	Třídy				
			1	2	3	4	5
Chlor (Cl)	Průměrná hodnota	% (d)	$\leq 0,2$	$\leq 0,6$	$\leq 1,0$	$\leq 1,5$	≤ 3
Klasifikační charakteristika	Statistická míra	Jednotka	Třídy				
			1	2	3	4	5
Rtuť (Hg)	Medián	mg/MJ (a_r)	$\leq 0,02$	$\leq 0,03$	$\leq 0,08$	$\leq 0,15$	$\leq 0,50$
	80. percentil	mg/MJ (a_r)	$\leq 0,04$	$\leq 0,06$	$\leq 0,16$	$\leq 0,30$	$\leq 1,00$

Příklad označení pro třídu o průměrné výhřevnosti 21 MJ/kg (a_r), průměrný obsah chloru 0,4 % (d) a průměrný obsah rtuti 0,012 mg/MJ (a_r) s hodnotou 80. percentilu 0,04 mg/MJ (a_r) je NCV 2; Cl 2; Hg 1. [1]

1.2 Obecné vlastnosti paliv

Složení paliv se určuje hrubým rozbořem a elementárním obsahem hořlaviny. U hrubého rozboru se stanoví poměrný obsah vody (W^r) a popelovin (A^r), dále se určí výhřevnost paliva a prchavá a neprchavá hořlavina. V elementárním obsahu hořlaviny se určují poměrné obsahy prvků hořlaviny. [2]

1.2.1 Voda v palivu

Je nežádoucí, jelikož snižuje výhřevnost a způsobuje řadu problémů při dopravě a spalování. Voda v palivu zvětšuje objem spalín. Dále pohlcuje část uvolněného tepla a snižuje spalovací teplotu. [2]

1.2.2 Popelovina v palivu

Jedná se o minerální látky obsažené v tuhém palivu před jeho spálením. Spálením vzniká tuhý zbytek, kterému říkáme popel. Dalším zdrojem popele mohou být nečistoty přimíšené během těžby, transportu a skladování. Popel odchází ze spalovací komory ve formě strusky, škváry

a popílku. Pro stavbu a provoz kotlů na tuhá paliva jsou velmi důležité charakteristické teploty popele, které určují chování popele při různých teplotách. Jsou to teplota sintrace, měknutí (t_a), tavení (t_b) a tečení (t_c). Teplota t_a nám určuje minimální teplotu, při které dojde k nalepování popele na výhřevné plochy. Tím dojde ke zhoršení prostupu tepla ze spalin do média. Teplota t_c nám určuje, kdy dojde k roztavení popele. Tyto teploty jsou ovlivněny složením popele. [2]

1.2.3 Hořlavina v palivu

Je část paliva, která je nositelem tepla uvolněného spalováním. U tuhých a kapalných paliv se skládá z pěti prvků: uhlíku, vodíku, síry, dusíku a kyslíku. Uhlík, vodík a síra jsou aktivní prvky hořlaviny, neboť jejich oxidací se uvolňuje teplo. Hořlavina se dělí na prchavou a neprchavou část. Prchavá hořlavina se uvolňuje při začátku spalování při teplotách nad 250 °C a podstatně napomáhá vzněcování paliva v ohništi a stabilizuje spalovací proces. Neprchavá hořlavina je zbyváající část v podobě tuhého uhlíku. [2]

1.2.4 Spalné teplo

Teplo, které je uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na 20 °C, přičemž voda ve spalinách zkondenzuje, tj. je v kapalně fázi. Určuje se v kalorimetrech tak, že se 1 kg paliva spálí v kyslíkové atmosféře o tlaku asi 2,5 MPa v kalorimetrické bombě ponořené ve vodní lázni. Z oteplení vodní lázně kalorimetru teplem uvolněným spálením vzorku se vypočte spalné teplo podle rovnice (1).

$$Q_s = \frac{V \cdot \Delta T}{G} \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (1),$$

kde V -vodní hodnota kalorimetru $[\text{kJ} \cdot \text{K}^{-1}]$
 G -hmotnost paliva $[\text{kg}]$ [2]

1.2.5 Výhřevnost

Je teplo uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na 20 °C, přičemž voda ve spalinách zůstává v plynné fázi. Výhřevnost se určuje ze změřeného spalného tepla výpočtem podle rovnice (2)

$$Q_i^r = Q_s - r * (W^r + 8,94 * H_2) \quad [\text{kJ/kg}] \quad (2),$$

kde W^r -obsah vody v palivu [-]
 r -výparné/kondenzační teplo vody $[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$, $r=2454 \text{ kJ/kg}$
 H_2 -obsah vodíku v surovém palivu [-][2]

1.3 Fermentační zbytky

Fermentační zbytky neboli digestáty, vznikají jako odpad při fermentaci. Fermentací rozumíme proces zpracování zbytkové biomasy, biologicky rozložitelných komunálních odpadů, kejdy aj. Při tomto procesu dochází ke kvašení vsázky ve fermentoru za vzniku bioplynu. Uvolněný bioplyn je zachytáván a využívá se k výrobě elektrické a tepelné energie v kogeneračních jednotkách. Fermentaci dělíme na suchou a mokrou. [3]

1.3.1 Mokrý fermentace

Mokrý anaerobní fermentace probíhá v uzavřených velkoobjemových nádobách – fermentorech. Tyto nádoby jsou zahřívány na vybranou provozní teplotu (většinou termofilní) a jejich obsah míchán. Celý proces probíhá ve čtyřech základních technologických celcích:

příjmový systém biomasy, fermentační systém, využívání bioplynu a uskladnění/další využití fermentátu. Biomasa je do fermentoru čerpána v tekutém stavu. [3]

V příjmové části systému se substrát připravuje na další proces. Může zde probíhat například úprava velikosti částic, míchání, homogenizace, předehřev materiálu, ředění vodou, separace hrubých příměsí apod. [3]

Poté následuje samotný fermentor, též reaktor. Základní dva druhy reaktorů jsou reaktory s pístovým tokem a reaktory směšovací. [3]

Po reaktoru následuje v systému takzvaná bioplynová koncovka, která obsahuje potrubí na dopravu bioplynu, bezpečnostní zařízení proti zpětnému zahoření plynu, dmychadlo, zásobník, zařízení na úpravu bioplynu a další. [3]

Nakonec je zde zařízení na konečné využití vytvořeného bioplynu. Uskladňovací systém slouží k uchování fermentačního zbytku do doby jeho dalšího použití. Liší se v závislosti na obsahu sušiny ve fermentátu. [3]

Fermentační zbytek takto vytvořený je tekutý a obsahuje pouze 6–10 % sušiny. Obsah sušiny se dá zvýšit odstředováním. Takto vzniká kapalina (fugát) s obsahem sušiny kolem 1 % a tuhý separát s obsahem sušiny 30 %. Při takto malém obsahu sušiny v separátu je tento separát nepoužitelný k termickému zpracování. Musí se proto spalovat s přidáním dalších látek s vyšším kalorickým obsahem, jako je např. uhlí, komunální odpad aj. Další možností je předsušení, odvodňování a jiné zpracování. [3]

Tab. 1-2 Palivové vlastnosti vysušeného vyhnilého kalu [3]

Popel [%]	Hořlavina [%]	Síra [%]	Spalné teplo [MJ/kg]	Výhřevnost [MJ/kg]	Prchavá hořlavina [%]	Neprchavý zbytek [%]
49,92	50,08	1,38	11,46	10,66	43,74	6,35

Tab. 1-3 Elementární rozbor hořlaviny [3]

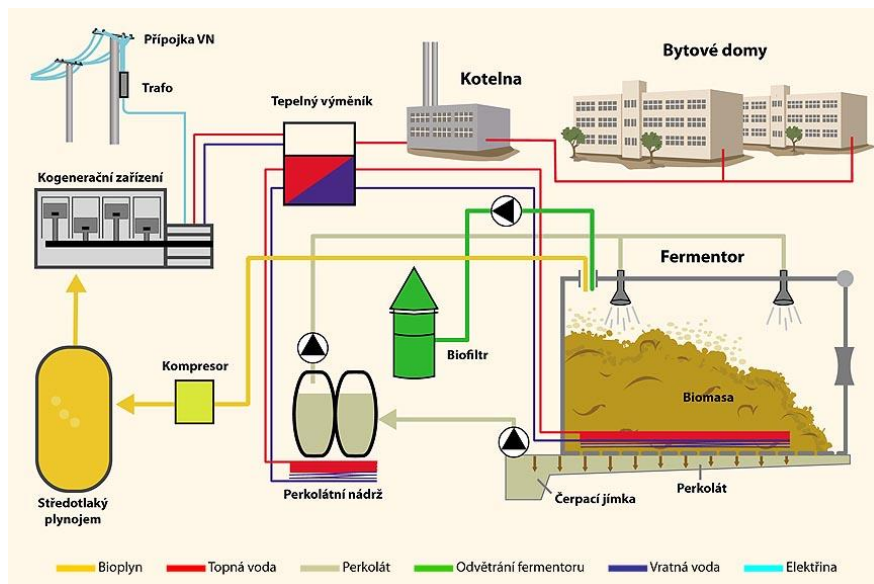
H[%]	C[%]	S[%]	N[%]	O[%]
7,37	53,7	2,32	6,79	29,82

1.3.2 Suchá fermentace

Vhodnými vstupními surovinami pro tento typ fermentace jsou zemědělské suroviny jako kukuřičná siláž, travní senáž, hnůj z živočišné výroby. Dále jsou to komunální, zemědělské a potravinářské odpady a kaly z ČOV. Vstupní obsah sušiny se pohybuje mezi 25–40 %, z tohoto důvodu je tento fermentační zbytek vhodnější pro termické spalování než fermentační zbytek po mokré fermentaci. [3][4]

Biomasa se naveze do fermentoru v sypkém stavu kolovým nakladačem. Poté dojde k uzavření plynotěsných vrat. Při suché fermentaci se využívá perkulátního kropení, které zajišťuje vlhkost biomasy a obnovení mikrobiální kultury na povrchu biomasy. Perkulát je tekutina, která během fermentace odtéká z biomasy a je odváděna kanálky do nádrže, následně je stříkána zpět

na biomasu. Ihned po uzavření vrat začíná proces fermentace. Bioplyn je jímán do plynových vaků umístěných nad fermentorem. Plyn je ihned dodáván do kogeneračních jednotek, které jej přemění na elektrickou energii za vzniku tepla. Celý tento proces je diskontinuální a obvykle trvá 28 dní. Po dokončení cyklu je prostor fermentoru vyklizen. Část biomasy je znovu použita smícháním s novou biomasou. Zbytek je využit jako hnojivo nebo palivo. [4]



Obr. 1-1 Základní princip bioplynové stanice pro suchou fermentaci [4]

Tab. 1-4 Palivové vlastnosti – původní vzorek [3]

Popis vzorku	W_t^r [%]	A^r [%]	h^r [%]	V^r [%]	Q_s^r [MJ/kg]	Q_i^r [MJ/kg]
	Voda veškerá	Popel	Hořlavina	Prchavá hořlavina	Spalné teplo	Výhřevnost
	(pův. vzorek)	(pův. vzorek)	(pův. vzorek)	(pův. vzorek)	(pův. vzorek)	(pův. vzorek)
zbytek po fermentaci	70,46	13,41	16,13	12,39	3,37	1,42

Tab. 1-5 Prvkový rozbor – původní vzorek [3]

H^r [%]	C^r [%]	S^r [%]	N^r [%]	O^r [%]
(pův. vzorek)	(pův. vzorek)	(pův. vzorek)	(pův. vzorek)	(pův. vzorek)
8,99	1,02	0,69	5,32	0,10

Tab. 1-6 Palivové vlastnosti – odvodněný vzorek [3]

Popis vzorku	A ^d [%]	h ^d [%]	V ^d [%]	Q _s ^d [MJ/kg]	Q _i ^d [MJ/kg]
	Popel	Hořlavina	Prchavá hořlavina	Spalné teplo	Výhřevnost
	(bezvodý vzorek)	(bezvodý vzorek)	(bezvodý vzorek)	(bezvodý vzorek)	(bezvodý vzorek)
zbytek po fermentaci	45,39	54,61	41,95	11,39	10,64

Tab. 1-7 Prvkový rozbor – odvodněný vzorek [3]

H ^d [%]	C ^d [%]	S ^d [%]	N ^d [%]	O ^d [%]
(bezvodý vzorek)	(bezvodý vzorek)	(bezvodý vzorek)	(bezvodý vzorek)	(bezvodý vzorek)
3,45	30,44	0,35	2,35	18,02

1.4 Energetické komposty

Jedním ze způsobů, jak naložit s druhotnými surovinami na bázi fytomasy je kompostování. Vhodnými surovinami pro tento druh zpracování jsou sklizené travní porosty, zbytky produkčních rostlin jako jsou obilní a řepková sláma a dále je zde možné využít i dendromasu, která vzniká z údržby a produkce v lesních a parkových porostech. [5]

Komposty jsou primárně využívány ke zvyšování úrodnosti půd, ovšem v současné době již existuje zařízení, které je určeno k výrobě kompostů určených pro energetické využití. [5]

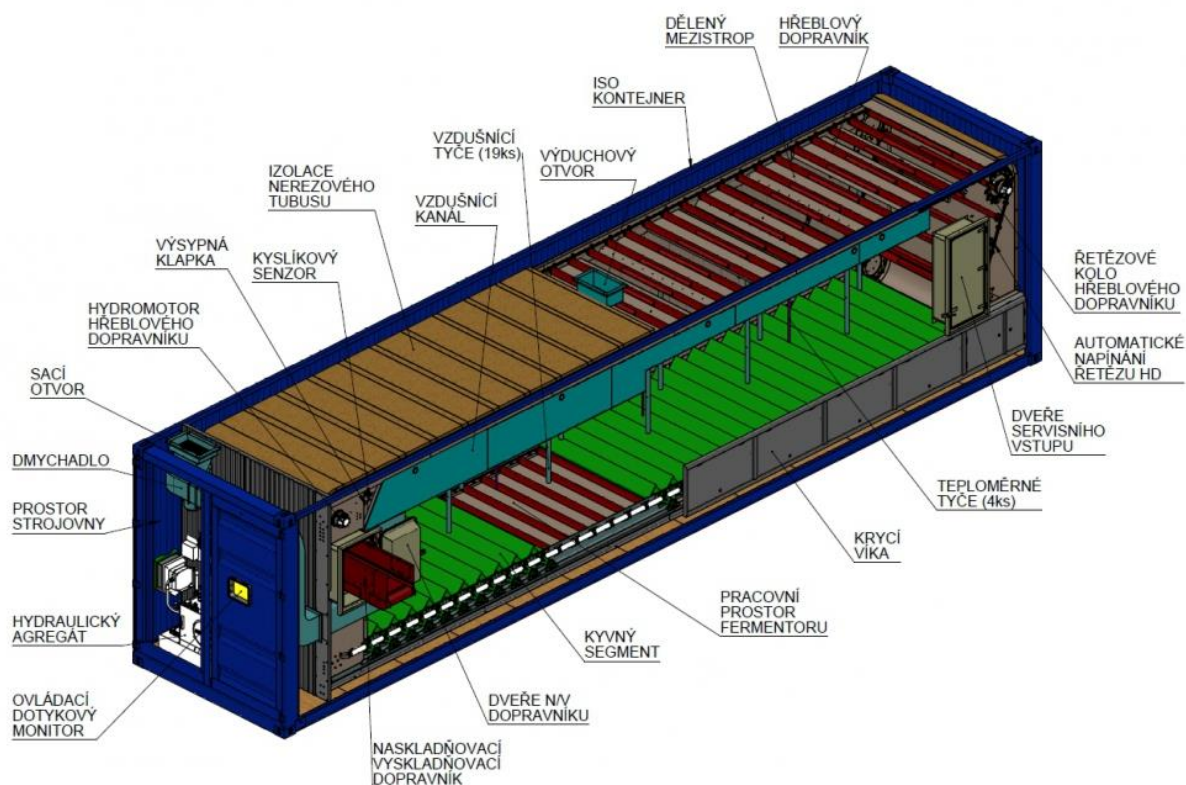
1.4.1 Výroba energetických kompostů ve fermentoru EWA

Výroba probíhá v aerobním fermentoru EWA firmy AGRO-EKO. Ten je umístěn v ISO čtyřiceti stopém kontejneru a skládá se z pracovního prostoru, systému injektorů k intenzivní aeraci zakládky, systému překopávání zakládky. Tento fermentor zpracovává biologicky rozložitelné odpady a nasákavou biomasu. [6]

Směs biologicky rozložitelných odpadů a strukturální (nasákavé) biomasy se naskladní do pracovní části fermentoru. Optimální vlhkost zakládky (50–60 %) a dostupnost vzdušného kyslíku aktivuje metabolický aparát aerobních bakterií. Aerací a překopáváním uvnitř fermentoru dochází k provzdušňování zakládky. Vysoká úroveň metabolické aktivity a současné množení bakterií se navenek projevuje zvyšováním teploty zakládky. Za stejných podmínek probíhá v celém profilu zakládky intenzivní termofilní aerobní fermentace, čímž se urychlují kompostovací procesy. Složité organické látky se rozkládají a přeměňují se v jiné. Díky optimálním podmínkám probíhá ve fermentoru bouřlivá biologická oxidace. Teplota v zakládce se zvyšuje nad 70 °C a dochází k postupné denaturaci bílkovin. Vysoké teploty v zakládce po definovanou dobu způsobují inaktivaci přítomných mikroorganismů a patogenních organismů (viry, bakterie, kvasinky, plísňe, prvoci, červi). Tento proces se nazývá aerobní termofilní stabilizace a hygienizace zakládky. Působením vysoké teploty se snižuje množství mikroorganismů a semena plevelů ztrácejí svou klíčivost. Po dokončení této fáze, která trvá

minimálně 48 hodin, je kompost vhodný k agrotechnickému využití. Vlhkost kompostu je 40–45 %. [5][6]

Pro výrobu kompostu k energetickému využití je výhodné snížit vlhkost na cca 35 %. Toho se dosáhne spuštěním režimu biologického dosušování. Ten spočívá v tom, že se intenzivní, ale řízenou aerací zakládky z fermentoru vytěsňuje vodní pára. Je důležité, aby se teplota zakládky udržovala nad 50 °C. Tato fáze trvá cca 48 hodin v závislosti na atmosférických podmínkách a složení zakládky. [5][6]



Obr. 1-2 Schéma aerobního fermentoru EWA [6]

1.4.2 Vlastnosti energetického kompostu pro spalování

Tab. 1-8 Palivové vlastnosti energetického kompostu – původní vzorek [5]

Popis vzorku	W_t^r [%]	A^r [%]	h^r [%]	V^r [%]	Q_i^r [MJ/kg]
Voda veškerá		Popel	Hořlavina	Prchavá hořlavina	Výhřevnost
(pův. vzorek)	(pův. vzorek)	(pův. vzorek)	(pův. vzorek)	(pův. vzorek)	(pův. vzorek)
zbytek po fermentaci	29,0	11,39	12,76	46,86	10,95

Tab. 1-9 Palivové vlastnosti energetického kompostu – odvodněný vzorek [5]

Popis vzorku	W_t^r [%]	A^r [%]	h^r [%]	V^r [%]	Q_i^r [MJ/kg]
	Voda veškerá	Popel	Hořlavina	Prchavá hořlavina	Výhřevnost
	(pův. vzorek)	(pův. vzorek)	(pův. vzorek)	(pův. vzorek)	(pův. vzorek)
zbytek po fermentaci	0	16,05	17,97	65,98	16,42

Hodnoty emisí CO při referenční hodnotě kyslíku 11 % byly naměřeny 630 mg/m^3 , hodnoty NO_x 320 mg/m^3 . Tyto naměřené hodnoty jsou nižší než povolené limity. [5]

1.5 Kaly

Kaly vznikají jako produkt činnosti čistíren odpadních vod (ČOV). Produkce kalů v ČR se pohybuje kolem 160 000 tun sušiny za rok. Většinou se kaly využívají v zemědělství jako hnojiva či kypřidla. Energetické využití se postupně zvyšuje, ovšem stále se jedná o jednotky procent (v roce 2013 2,07 %). [7]

Pro využití kalu jako paliva je nutné kal nejdříve odvodnit mechanicky. Takto odvodněný kal má 70 hm. % vody. Je tedy nezbytné tuto vodu za mírných podmínek sušení odstranit. Vysušený kal je vhodný pro spalování, jelikož neobsahuje těžké kovy a perzistentní organické látky (POP), které poškozují imunitní systém a některé z nich způsobují rakovinu. Takto připravený kal má výhřevnost mezi 9–12 MJ/kg, což odpovídá výhřevnosti méně kvalitního energetického uhlí. Pro čistírenské kaly je charakteristické, že obsahují vysoký podíl vody, prchavé hořlaviny a popela. Dále obsahují vysoké množství reaktivního dusíku (2–5 hm. % v sušině). Při spalování popel z kalu nevykazuje žádné známky měknutí a lepivosti ještě při teplotě $950 \text{ }^\circ\text{C}$. [7]

Tab. 1-10 Palivo-energetické vlastnosti stabilizovaného čistírenského kalu [7]

Vlastnost	Veličina	Jednotka	Praha	Plzeň	Brno
hořlavina	h	hm. %	50,6	49,0	55,4
popel	A	hm. %	49,4	51,0	44,6
prchavá hořlavina	V	hm. %	45,9	41,9	48,3
fixní uhlík	FC	hm. %	4,68	7,10	7,04
spalné teplo	HHV	MJ/kg	11,5	10,7	12,8
výhřevnost	LHV	MJ/kg	10,6	9,9	11,8
C		hm. %	26,3	24,6	28,9
H		hm. %	4,03	3,94	4,39
N		hm. %	3,06	3,09	4,1
O		hm. %	16,2	16,2	17,1
S _{celk}		hm. %	1,02	1,16	0,9
S _{spal}		hm. %	0,961	1,04	0,797
Cl		mg/kg	352	336	433
F		mg/kg	218	217	255

2 SPALOVÁNÍ TAP

Spalování je oksylování paliva až na konečné produkty reakce. Je to fyzikálně chemický děj s uvolňováním tepla. Z chemického hlediska se jedná o exotermický děj. [2]

Pracovními látkami spalovacího pochodu jsou palivo, oksylovadlo a produkty spalovacího pochodu. Palivem rozumíme jakoukoliv hořlavou látku s dostatečnou výhřevností a aktivitou oksylovacích pochodů. Oksylovadlo je látka obsahující kyslík. Nejčastěji se využívá vzduch. Mezi produkty spalovacího pochodu patří plynné spaliny a tuhý nebo kapalný zbytek po spalování. Tyto produkty vznikají reakcí mezi palivem a oksylovadlem. [2]

K zahájení procesu hoření může dojít samovznícením nebo působením tepelného impulsu. Hoření se uskutečňuje pouze mezi elementárními složkami hořlaviny v atomárním stavu. Probíhá do vyčerpání hořlavé směsi nebo do okamžiku, kdy dojde k intenzivnímu odvodu tepla a přerušení řetězové reakce. [2]

Rozlišujeme statiku a dynamiku spalování. Statika zkoumá spalování jako souhrn chemických reakcí paliva a oksylovadla bez ohledu na časový průběh a prostorové ohraničení. U dynamiky spalování je podstatný průběh spalovacího procesu v čase. [2]

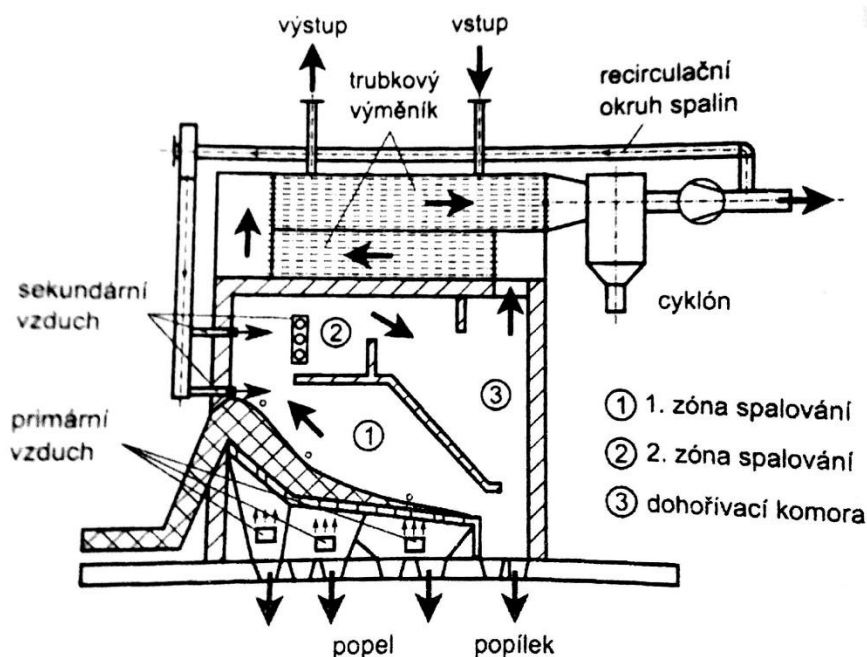
2.1 Roštové kotle

Roštové kotle jsou určeny ke spalování kusových paliv v pevné vrstvě. Využívají se jak v průmyslu, tak pro vytápění domácností. V současné době se roštové kotle využívají především pro spalování biomasy a pro spalování komunálních a průmyslových odpadů. [2]

Při konstrukci kotle na biomasu je nutné zohlednit odlišnost oproti uhlí. Zejména je nutno zohlednit následující vlastnosti biomasy:

- vysoký podíl prchavé hořlaviny
- nízká teplota měknutí popele
- přítomnost síry, chloru a alkálií v palivu [2]

Dalšími aspekty, na které potřeba brát zřetel, jsou možnost velkého kolísání vlhkosti paliva a vlastnosti popelovin. Kotle je také nutno přizpůsobit pro daný typ biomasy. Nelze spalovat dřevní štěpku a slámu ve stejném kotli bez úprav. [2]



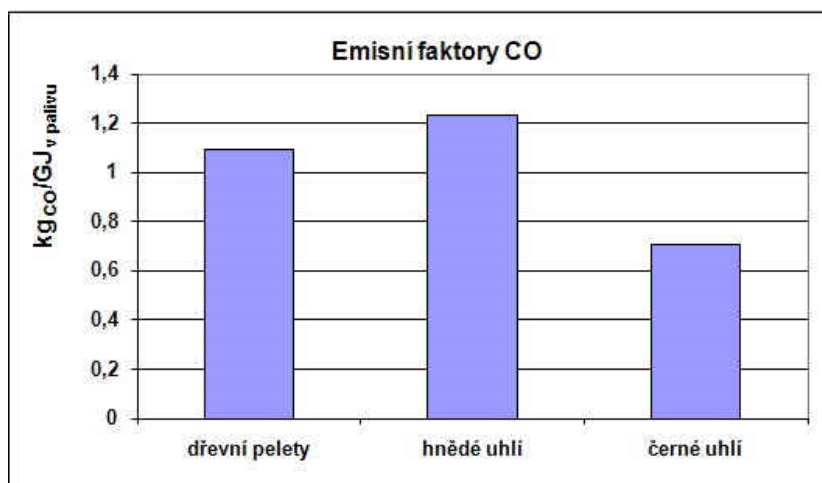
Obr. 2-1 Příklad kotle na biomasu se šikmým roštem [2]

2.2 Emisní faktory při spalování

Při spalování se do ovzduší dostávají nežádoucí látky, které mají škodlivý vliv na zdraví člověka a na životní prostředí. Tyto jsou buď ve formě plynné (CO, NO_x, SO₂) nebo pevné (TZL). Hodnoty emisí nesmí překročit limity stanovené Ministerstvem životního prostředí ČR. [8]

2.2.1 Emise CO

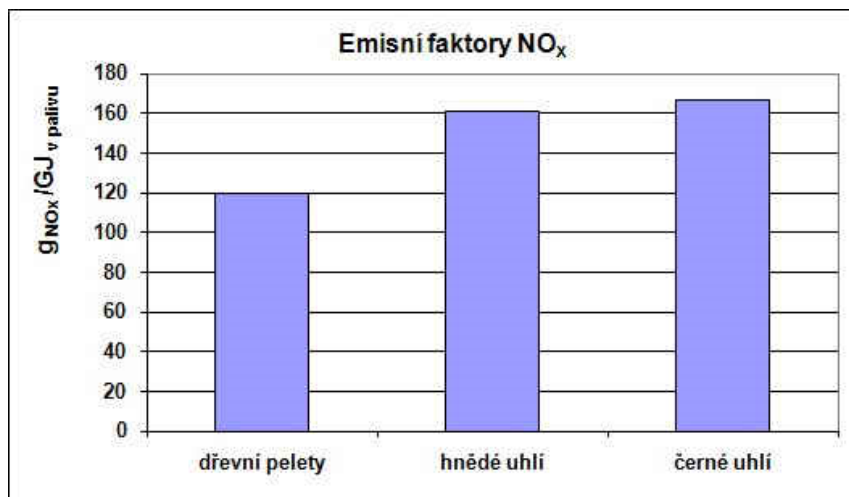
Množství emisí CO za kotlem je velmi dobrým indikátorem kvality spalovacího procesu. Nedohořelý oxid uhelnatý ukazuje na špatně nastavené spalovací parametry (množství vzduchu apod.) nebo na špatnou konstrukci spalovacího zařízení. Konstrukce spalovacího zařízení se mění podle typu paliva. Byl proveden experiment a podle dat z něho získaných, vychází z hlediska množství CO nejlépe černé uhlí. Biomasa (dřevní pelety) se řadí před hnědé uhlí. Tyto hodnoty se mohou měnit podle použitých technologií a druhu paliva. [8]



Obr. 2-2 Emisní faktory CO přepočtené na výhřevnost paliva [8]

2.2.2 Emise NO_x

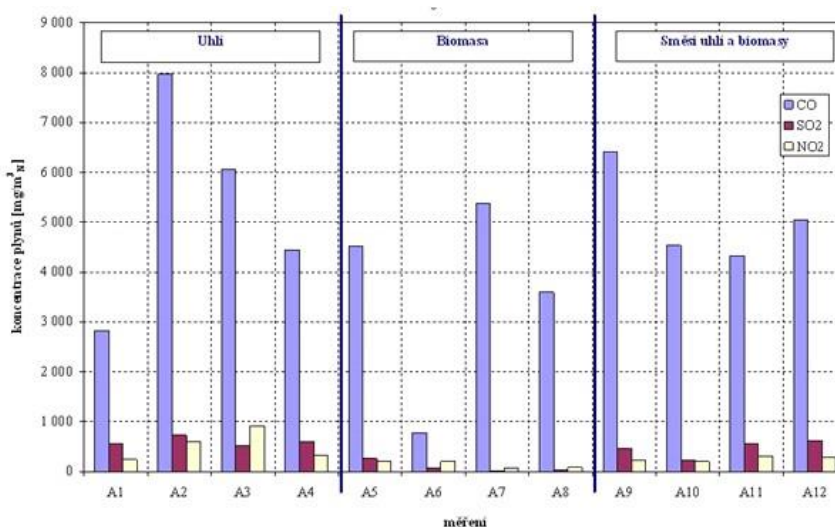
Tvorbu emisí NO_x nejvíce ovlivňuje obsah dusíku v palivu a teplota ve spalovací komoře. Tvoří se dva typy emisí NO_x. První typ se tvoří vždy a závisí pouze na obsahu dusíku v palivu. Druhý typ tzv. termické NO_x se tvoří při teplotě nad 1000 °C. Na základě dat získaných z experimentu prováděného na malých kotlích lze říci, že nejmenších hodnoty byly naměřeny u dřevních pelet. Toto je způsobeno nízkým obsahem dusíku v peletách a také tím, že při spalování uhlí se dosahuje teplot nad 1000 °C a vznikají tedy tzv. termické NO_x. [8]



Obr. 2-3 Emisní faktory NO_x přepočtené na výhřevnost paliva [8]

2.2.3 Emisní faktory SO₂

V biomase se vyskytuje síra pouze v omezeném množství. Ve většině případů se vyskytuje pouze stopové množství, což je jedna z výhod proti fosilním palivům. U fosilních paliv může síra reagovat s kyslíkem za vzniku oxidu siřičitého (SO₂), který se lehce rozpouští ve vodě. Příkladem může být rozpouštění síry v kapičkách vody, které se nachází v ovzduší. Díky tomuto jevu mohou vznikat tzv. kyselá deště. Ovšem díky tomu, že se ve spalinách nachází také vodní pára, která je vzniká z vlhkosti biomasy, reaguje síra spíše s vodíkem za vzniku sirovodíku (H₂S). [9]



Obr. 2-4 Koncentrace emisí CO, SO₂ a NO₂ při spalování paliv kotlích malých výkonů [8]

2.2.4 Emisní faktory chlóru

Spalováním biomasy rovněž vznikají organické sloučeniny. Toto může být způsobeno obsažením těchto sloučenin v samotném palivu nebo také jako důsledek spalování. Objem těchto organických emisí ve spalinách závisí na spalovacích parametrech (teplota spalování, množství přiváděného vzduchu). Mezi nejčastěji vznikající látky patří PAH (polychlorované aromatické uhlovodíky), PCDD (polychlorované dibenzodioxiny) a PCDF (polychlorované dibenzofurany). [10][11]

2.2.5 Emisní faktory tuhých znečišťujících látek (TZL)

Tuhé znečišťující látky TZL jsou látky, které jsou většinou tvořeny jemnými částicemi menšími než 0,1 μm . Například při spalování dřeva tvoří tyto částice až 90 % spalin. Původ emisí TZL je ze dvou hlavních zdrojů. [14]

Prvním zdrojem je popelovina, což jsou anorganické nespalitelné části. Po spálení zůstane větší část v popelníku, na roštu nebo ve výměníku. Tuhý zbytek po spálení se nazývá popel. [14]

Druhým zdrojem jsou produkty nedokonalého spalování. Mezi tyto zdroje patří saze a zkondenzované organické látky jako jsou uhlovodíky a dehty. Tyto produkty vznikají především na starších typech spalovacích zařízení. [14]

Mezi další významné zdroje emisí TZL u tuhých alternativních paliv patří podíl jemné prašné frakce v palivu a prvkové složení paliva.

Emise TZL závisí na prvkovém složení tak, že je u paliv různý podíl prvků tvořící aerosol v palivu. Mezi tyto prvky patří draslík, chlór, sodík, síra aj. [15]

Vzhledem k nedostupnosti informací o měření emisí TZL pro TAP, je zde uvedeno v následující tabulce měření, které proběhlo na kotli Heizomat RHK-AK 50 o výkonu 30 kW. Agropelety mají podobné složení a palivové vlastnosti jako výše uvedená tuhá alternativní paliva, a proto je jejich porovnání se dřevem možné. Koncentrace TZL jsou přepočteny na referenční hodnotu $\text{O}_2=11\%$. Jak vyplývá z uvedené tabulky je hodnota TZL u agropelet mnohonásobně větší než u dřeva. [15]

Tab. 2-1 Koncentrace TZL na kotli Heizomat RHK-AK 50 [15]

Typ paliva	Dřevo	Ječmen	Pšeničná sláma	Žito
Koncentrace TZL [mg/m^3]	17	101	129	267

Primárním opatřením pro snížení tvorby TZL je dostatečně dlouhé setrvání ve spalovací komoře při dostatečně velké teplotě. Dalším řešením je využití odlučovačů. [10][13]

Vliv TZL na člověka je vysoce negativní. I při krátkém vystavení TZL může dojít různým zdravotním komplikacím. TZL se vyskytují v různých velikostech. Nejnebezpečnější jsou pro lidský organismus částice o velikosti do 0,1 μm . Díky velkému povrchu částic jsou tyto schopny absorbovat různorodé směsi, z nichž některé mohou být toxické, mutagenní a karcinogenní. [10][13]

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V této kapitole byl proveden rozbor následujících paliv: **energetického kompostu, pelet z čistého digestátu a pelet z digestátu a smrkových pilin**. Rozbor byl prováděn v palivové laboratoři a kotelně Energetického ústavu. Dále byla provedena spalovací zkouška energetického kompostu se zaměřením na tvorbu TZL, což byl jeden z cílů bakalářské práce. Část rozborů byla zpracována na Ústavu procesního inženýrství.



Obr. 3-1 Energetický kompost



Obr. 3-2 Pelety z čistého digestátu



Obr. 3-3 Pelety z digestátu a smrkových pilin

3.1 Prvkový rozbor

Tento rozbor byl proveden na Ústavu procesního inženýrství. Zde jsou přehledně seřazeny výsledky jednotlivých paliv.

Tab. 3-1 Prvkový rozbor energetického kompostu

Energetický kompost							
Parametr			Vzorek v dodaném stavu			Vzorek bezvodý	Hořlavina vzorku
	značka	jednotka	hodnota	směrodatná odchylka	interval spolehlivosti	hodnota	hodnota
Uhlík	C	% hm.	41,72	0,16	0,19	46,68	49,02
Vodík	H	% hm.	6,10	0,04	0,04	5,50	5,77
Dusík	N	% hm.	0,69	0,04	0,04	0,78	0,82
Síra prchlavá	S	% hm.	0,2	0,11	0,12	0,22	0,23
Kyslík	O	% hm.	47,02	0,10	0,11	42,05	44,16

Tab. 3-2 Prvkový rozbor pelet z digestátu

Digestát							
Parametr			Vzorek v dodaném stavu			Vzorek bezvodý	Hořlavina vzorku
	značka	jednotka	hodnota	směrodatná odchylka	interval spolehlivosti	hodnota	hodnota
Uhlík	C	% hm.	41,68	0,15	0,17	45,52	51,94
Vodík	H	% hm.	5,45	0,12	0,13	4,92	5,61
Dusík	N	% hm.	1,91	0,04	0,04	2,09	2,38
Síra prchlavá	S	% hm.	0,04	0,00	0,00	0,05	0,05
Kyslík	O	% hm.	39,60	0,07	0,08	35,07	40,02

Tab. 3-3 Prvkový rozbor pelet z digestátu a smrkových pilin

Digestát se smrkovými pilinami							
Parametr			Vzorek v dodaném stavu			Vzorek bezvodý	Hořlavina vzorku
	značka	jednotka	hodnota	směrodatná odchylka	interval spolehlivosti	hodnota	hodnota
Uhlík	C	% hm.	46,23	0,04	0,05	49,41	50,88
Vodík	H	% hm.	6,12	0,06	0,07	5,77	5,94
Dusík	N	% hm.	0,61	0,02	0,02	0,65	0,67
Síra prchlavá	S	% hm.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kyslík	O	% hm.	44,34	0,06	0,07	41,28	42,51

3.2 Stanovení výhřevnosti

Toto měření bylo prováděno na kalorimetru IKA C200 v laboratořích Energetického ústavu. Postup byl následující. Nejdříve bylo nutné nachystat peletky o váze cca 1 g na peletovacím lisu BSL-2. Toto se týkalo pouze energetického kompostu. Zbylá paliva byla již ve formě pelet. Poté byla zvážena přesná váha peletek na laboratorních vahách s přesností na desetitisíciny. Do nerezového kelímku byla vložena peletka a tento byl umístěn do držáku, na žhavicí drát bylo navázáno vlákno z bavlny, které se dotýkalo peletky. Poté bylo do rozkladné nádoby nalito 20 ml vody o teplotě 20 °C a byl dovnitř vložen držák s peletkou. Nádoba byla uzavřena a natlakována kyslíkem o hodnotě 3 MPa. Na víko nádoby byl nasazen zapalovací aparát a celá nádoba byla umístěna do kalorimetru. Zásobník kalorimetru byl naplněn vodou o teplotě 20 °C. Po uzavření kalorimetru byla zadána naměřená váhu peletky a bylo zahájeno měření.

Výsledkem z kalorimetru bylo spalné teplo. Toto je nutné podle rovnice 2 přepočítat na výhřevnost.

$$Q_i^r = Q_s - r \cdot (W^r + 8,94 \cdot H_2) [kJ \cdot kg^{-1}] \quad (2)$$

Q_i^r – výhřevnost [kJ/kg]

Q_s – spalné teplo [kJ/kg]

W^r – obsah vody v palivu [-]

r – výparné teplo [kJ/kg]

H_2 – obsah vodíku v surovém palivu [2]

Tab. 3-4 Výhřevnost energetického kompostu

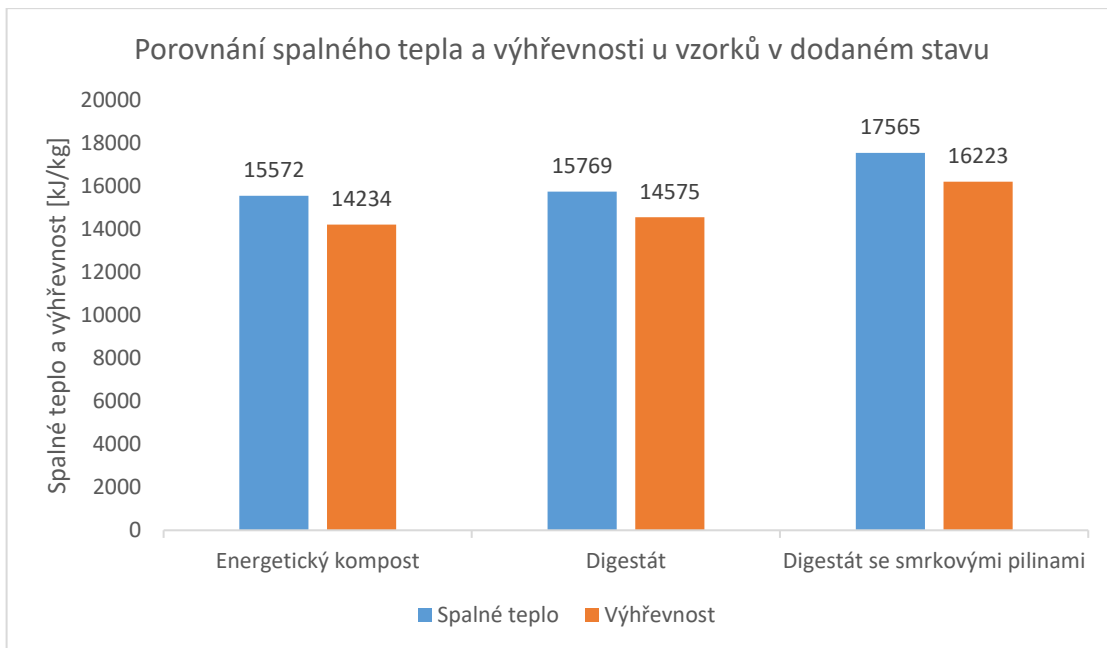
Energetický kompost					
Parametr	značka	jednotka	Vzorek v dodaném stavu	Bezvodý vzorek	Hořlavina vzorku
Spalné teplo	HHV _h	kJ.kg ⁻¹	15572	17422	18296
Výhřevnost	LHV ₂₀	kJ.kg ⁻¹	14234	16217	17030

Tab. 3-5 Výhřevnost digestátu

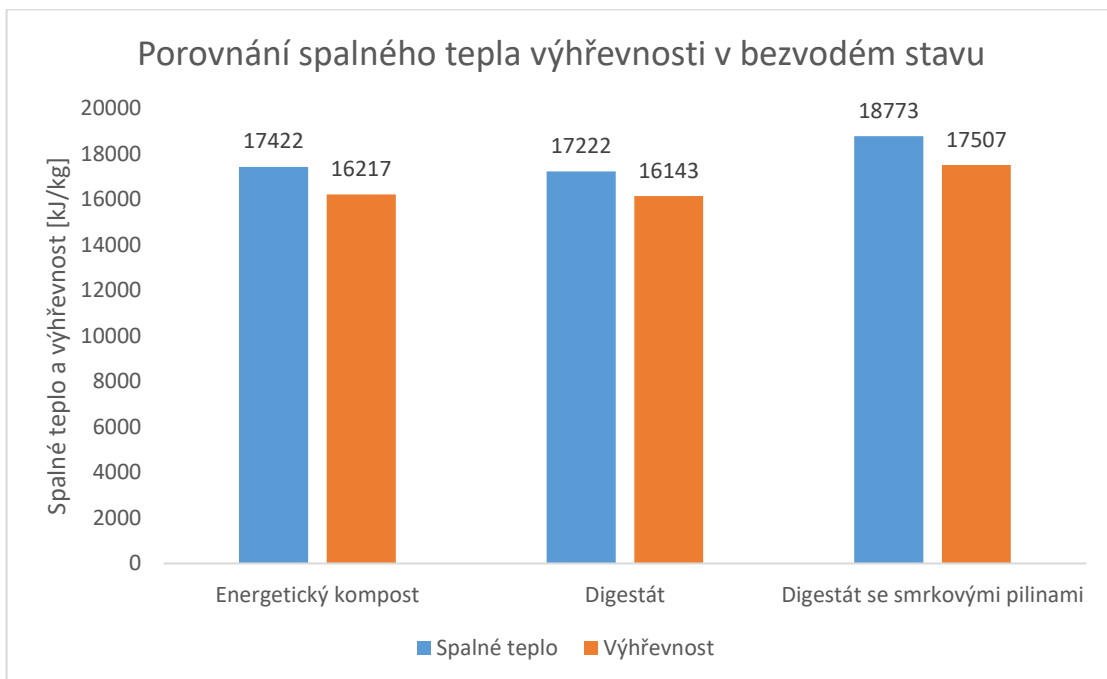
Digestát					
Parametr	značka	jednotka	Vzorek v dodaném stavu	Bezvodý vzorek	Hořlavina vzorku
Spalné teplo	HHV _h	kJ.kg ⁻¹	15769	17222	19649
Výhřevnost	LHV ₂₀	kJ.kg ⁻¹	14575	16143	18418

Tab. 3-6 Výhřevnost digestátu se smrkovými pilinami

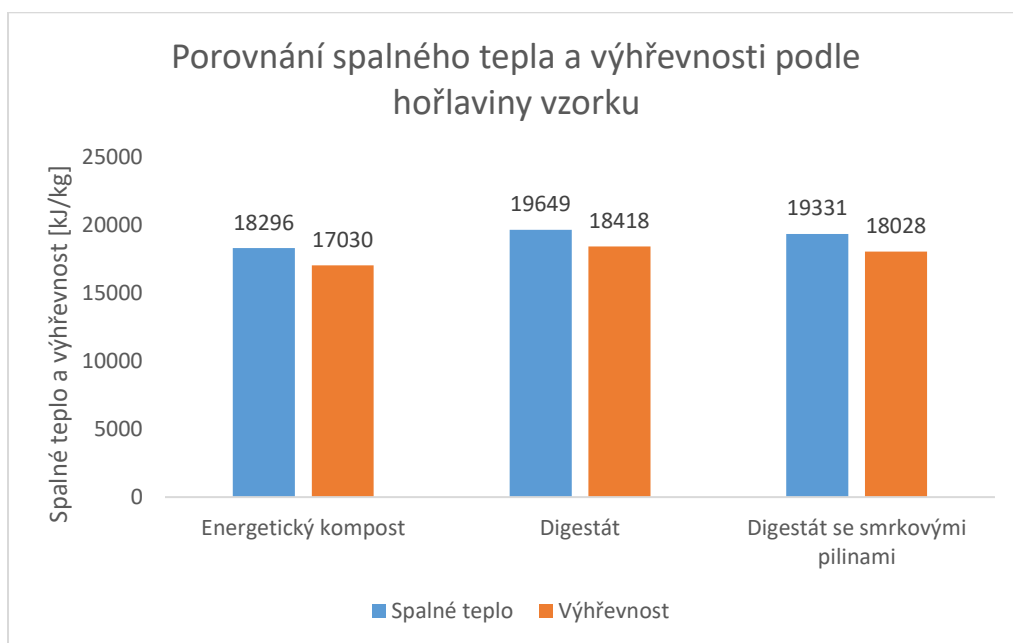
Digestát se smrkovými pilinami					
Parametr	značka	jednotka	Vzorek v dodaném stavu	Bezvodý vzorek	Hořlavina vzorku
Spalné teplo	HHV _h	kJ.kg ⁻¹	17565	18773	19331
Výhřevnost	LHV ₂₀	kJ.kg ⁻¹	16223	17507	18028



Graf 3-1 Porovnání spalného tepla a výhřevnosti u vzorků v dodaném stavu



Graf 3-2 Porovnání spalného tepla a výhřevnosti v bezvodém stavu



Graf 3-3 Porovnání spalného tepla a výhřevnosti podle hořlaviny vzorku



Obr. 3-4 Peletovací lis BSL-2



Obr. 3-5 Kalorimetr IKA C200

3.3 Stanovení vlhkosti

Stanovení vlhkosti bylo prováděno na dvou přístrojích. První byla sušárna Venticell. Při tomto měření byla nejdříve stanovena hmotnost vzorků a poté byly vzorky umístěny do sušárny, která byla nastavena na teplotu 110 °C. Vzorky byly vysoušeny šest hodin. Po ukončení vysoušení byly vzorky znovu zváženy. Výsledné množství vlhkosti se určí z rovnice 3.

$$W = \frac{m_1}{m} \cdot 100 [\%] \quad (3)$$

W – množství vlhkosti ve vzorku

m_1 – úbytek hmotnosti při sušení

m – původní hmotnost

Druhým přístrojem byl infrasušárna KERN MLS. U této bylo měření prováděno následovně. Do sušárny bylo nasypáno palivo cca 10 g. Sušárna si palivo zváží s přesností na tisícinu a zahájí proces vysoušení. Tento je ukončen ve chvíli, kdy není zaznamenána změna hmotnosti po určitý časový úsek. Poté se na displeji zobrazí vlhkost paliva v procentech.

Výsledné vlhkosti z obou sušáren byly uspořádány do následující tabulky.

Tab. 3-7 Výsledné vlhkosti paliva

Palivo	Sušárna Venticell	UV sušárna	
		Vzorek č. 1	Vzorek č. 2
Energetický kompost	18,07 hm. %	18,36 hm. %	20,14 hm. %
Pelety z digestátu	-	8,97 hm. %	8,92 hm. %
Pelety z digestátu a smrkových pilin	-	7,44 hm. %	7,52 hm. %



Obr. 3-6 Laboratorní sušárny – vlevo Venticell, vpravo KERN MLS

3.4 Stanovení popeloviny

Měření popeloviny bylo prováděno v muflovací peci VEB ELEKTRO podle normy ISO 1171. Postup měření byl takový, že se nejdříve na laboratorních váhách zvažil prázdný kelímek a poté se zvažil kelímek s palivem. Poté byly vzorky umístěny do muflovací pece. V muflovací peci byla nastavena teplota na 550 °C. Měření mělo probíhat po dobu dvou hodin, ovšem po této době nedošlo k vyžhání celého objemu paliva, proto bylo měření prováděno po dobu pěti hodin. Po této době již došlo k vyžhání celého objemu paliva. Po vyjmutí kelímku z pece a jeho vychladnutí byl kelímek s vyžháným palivem znovu zvážen na laboratorních váhách a z rovnice 4 byla spočítána výsledná popelnatost paliva. Výsledky jsou uvedené v následující tabulce.

$$A = \left(\frac{m_1}{m} \cdot 100 \right) [\%] \quad (4)$$

A – obsah popele v palivu [%]

m_1 – hmotnost po žíhání

m – původní hmotnost

Tab. 3-8 Popelnatost paliv

Palivo	Hmotnost před žíháním	Hmotnost po žíhání	Popelnatost
	[g]	[g]	[%]
Energetický kompost 1	9,6165	1,2808	13,32
Energetický kompost 2	11,666	2,2066	18,91
Digestát 1	9,9832	1,1324	11,45
Digestát 2	9,5596	1,0679	10,61
Digestát se smrkovými pilinami 1	10,0568	0,3577	3,56
Digestát se smrkovými pilinami 2	9,7847	0,34	3,47

Lze si všimnout, že u paliv s obsahem digestátu je popelnatost podobná, ovšem u energetického kompostu je relativně vysoký rozdíl mezi oběma vzorky. Toto je způsobeno především nehomogenitou paliva.



Obr. 3-7 Muflovací pec VEB ELEKTRO



Obr. 3-8 Vzorky paliv po vyžihání – nejbliže pelety z digestátu a smrkových pilin, uprostřed pelety z čistého digestátu, vzadu energetický kompost

3.5 Spalovací zkouška

Spalovací zkouška proběhla na zařízení skládajícího se ze dvou částí, a to z teplovodního kotle KWH a zplyňovací komory ZKG firmy GEMOS Čelákovice. Spalovací zkoušku byla provedena pro energetický kompost jako zástupce TAP. Pro porovnání byla ještě provedena spalovací zkoušky pelet ze šřovíku a pelet ze slámy.

3.5.1 Popis spalovacího zařízení

V následujících tabulkách je uvedena technická specifikace teplovodního kotle a zplyňovací komory. Celý proces probíhá tak, že do horní části zplyňovací komory nad šikmý rošt je přivedeno palivo. Palivo se pohybuje po šikmém roštu vlivem gravitace, je ohříváno, vysušováno a poté spalováno. Ze šikmého roštu se palivo dostává na rošt vodorovný, kde palivo začíná hořet a do trysky komory vstupuje plamen. Pro zajištění kvalitního spalování jsou do komory přiváděny tři proudy vzduchu (primární, sekundární a terciální). Primární proud vzduchu je přiváděn pod rošt, sekundární otvorem v boku komory na vodorovný rošt a terciální je přiveden na začátek trubky. Schéma spalovací komory je vidět na obrázku 3.10. Ovládání chodu kotle a zplyňovací komory, bylo prováděno pomocí programu vytvořeného v prostředí Labview. Tímto je možné regulovat dávkování paliva, množství přiváděného vzduchu aj. Dále tento software ukazuje aktuální hodnoty tlaků, teplot a výkon. [12]

Tab. 3-9 Technické údaje teplovodního kotle KWH [12]

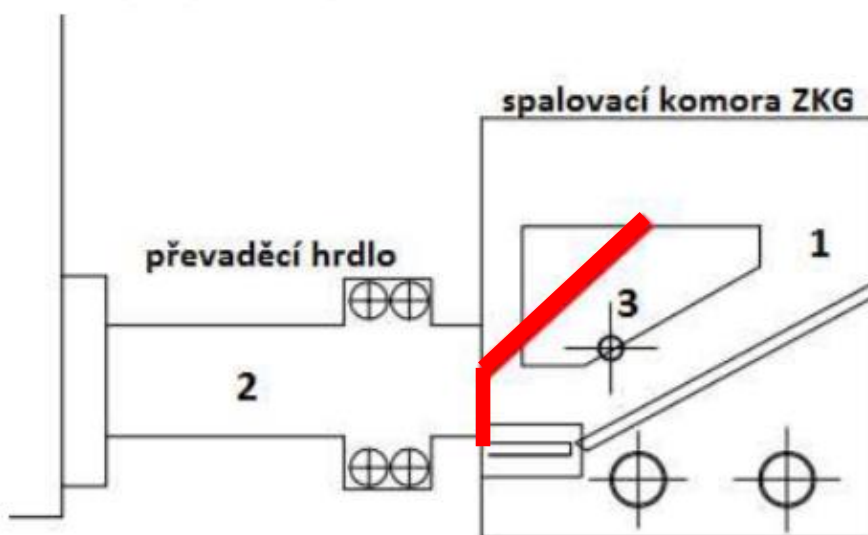
Teplovodní kotel KWH	
Typ	KWH 120
Jmenovitý výkon	120 kW
Pracovní médium	Teplá voda
Pracovní přetlak	2,5 bar
Maximální teplota na výstupu z kotle	95 °C
Minimální teplota na výstupu z kotle	60 °C
Palivo	Dřevní kusy a odřezky (max. 300 mm a 35 % W ^r)
Hmotnost	1150 kg
Rozměry (šířka x hloubka x výška)	910 x 1880 x 1550 mm

Tab. 3-10 Technické údaje zplyňovací komory ZKG [12]

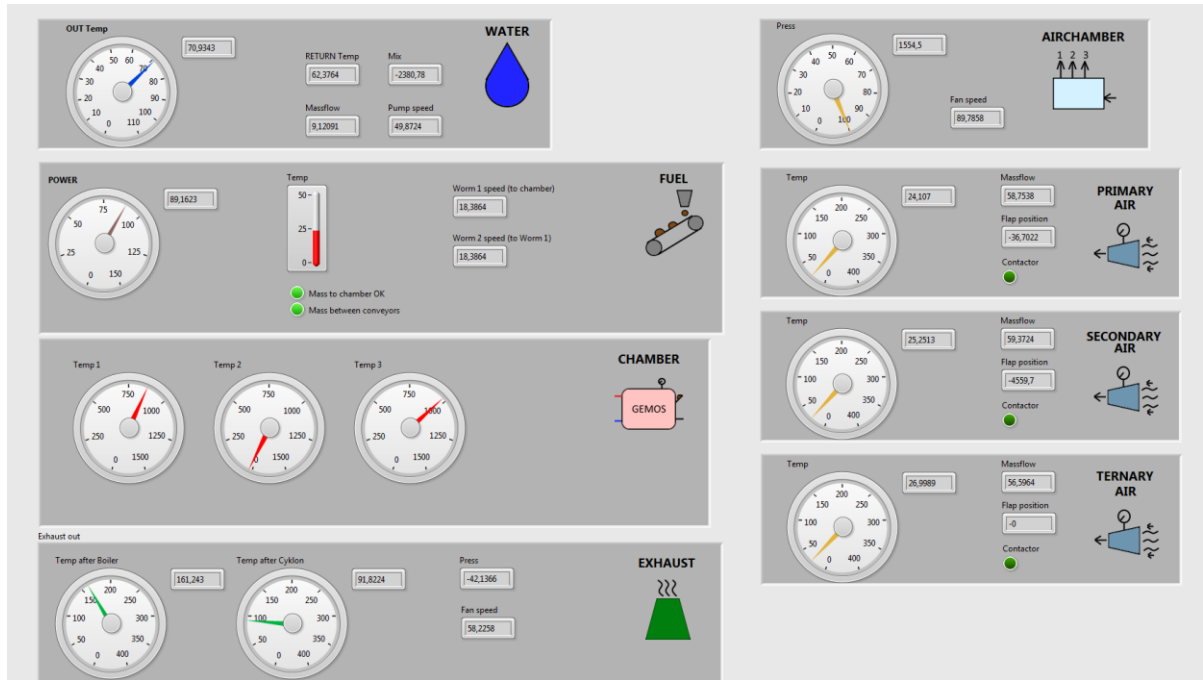
Zplyňovací komora ZKG	
Typ	ZKG-110
Jmenovitý tepelný výkon	110 kW
Specifikace paliva	Q _i ^r =11500 kJ/kg, W ^r =32 %, t=5 °C
Spotřeba paliva	43 kg/hod; 4,2 m ³ /den
Palivo	Dřevní piliny a štěpky, pelety
-maximální vlhkost	35 %
-maximální velikost zrna	30 mm
Hmotnost	600 kg
Rozměry (šířka x hloubka x výška)	900 x 1520 x 1050 mm



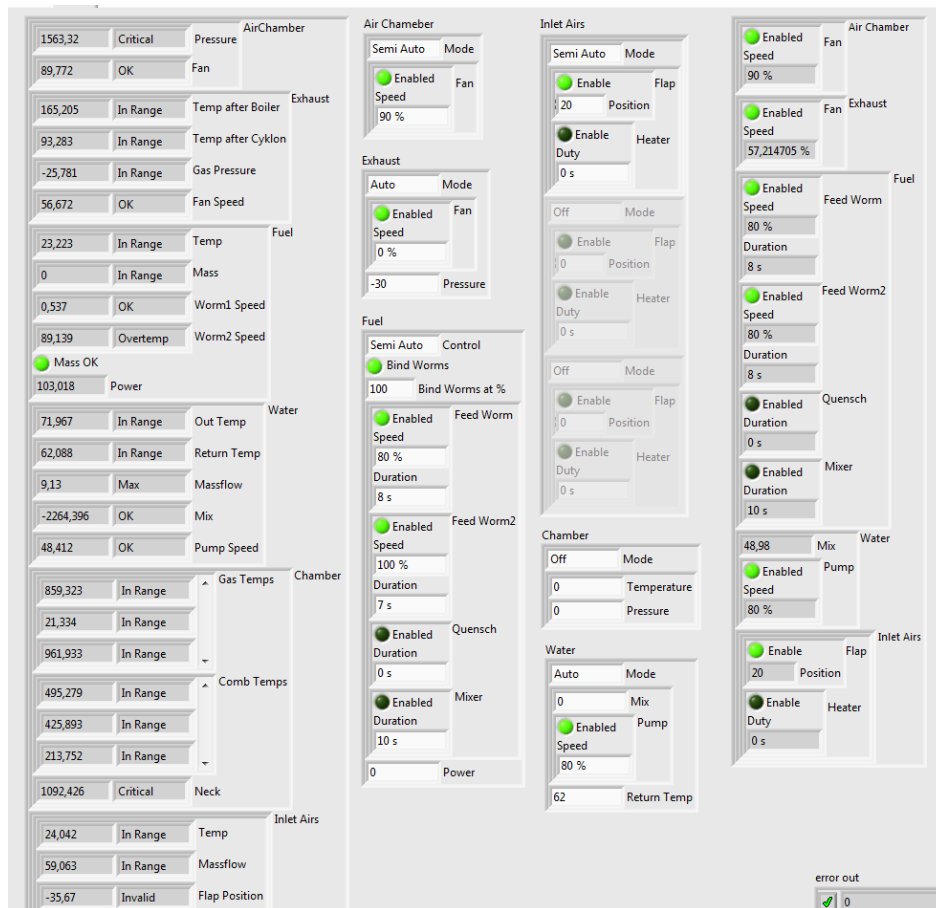
Obr. 3-9 GEMOS KWH a ZKG



Obr. 3-10 Schéma zplyňovací komory ZKG s rošty [12]



Obr. 3-11 Ovládací prostředí softwaru Labview

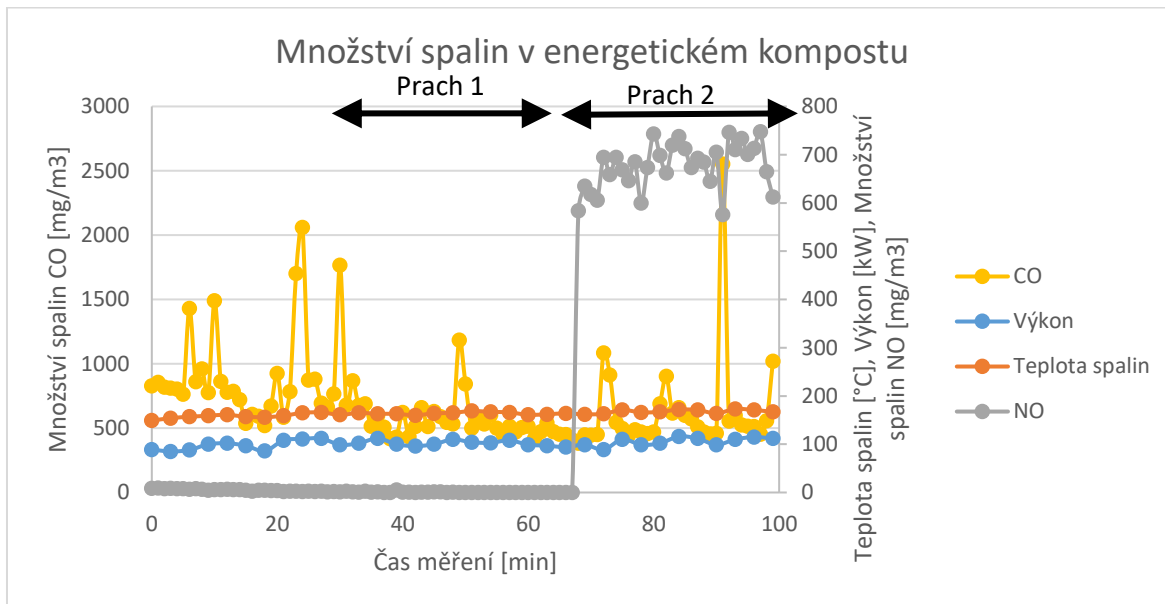


Obr. 3-12 Ovládací prostředí softwaru Labview

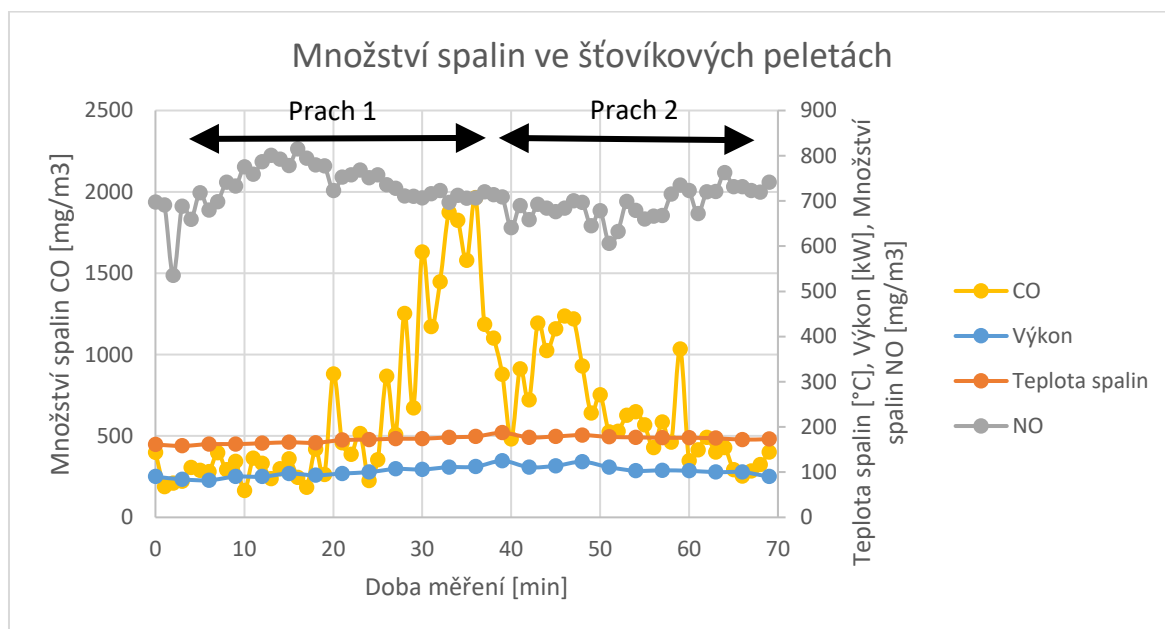
3.5.2 Měření emisí CO, NO_x

K měření emisí CO a NO_x bylo využíváno zařízení Ultramat Siemens 21/O₂ a 22. Toto zařízení umožňuje určit koncentraci až tří sloučenin aktivních v infračerveném záření metodou NDIR (nedisperzní infračervené spektrometrie).

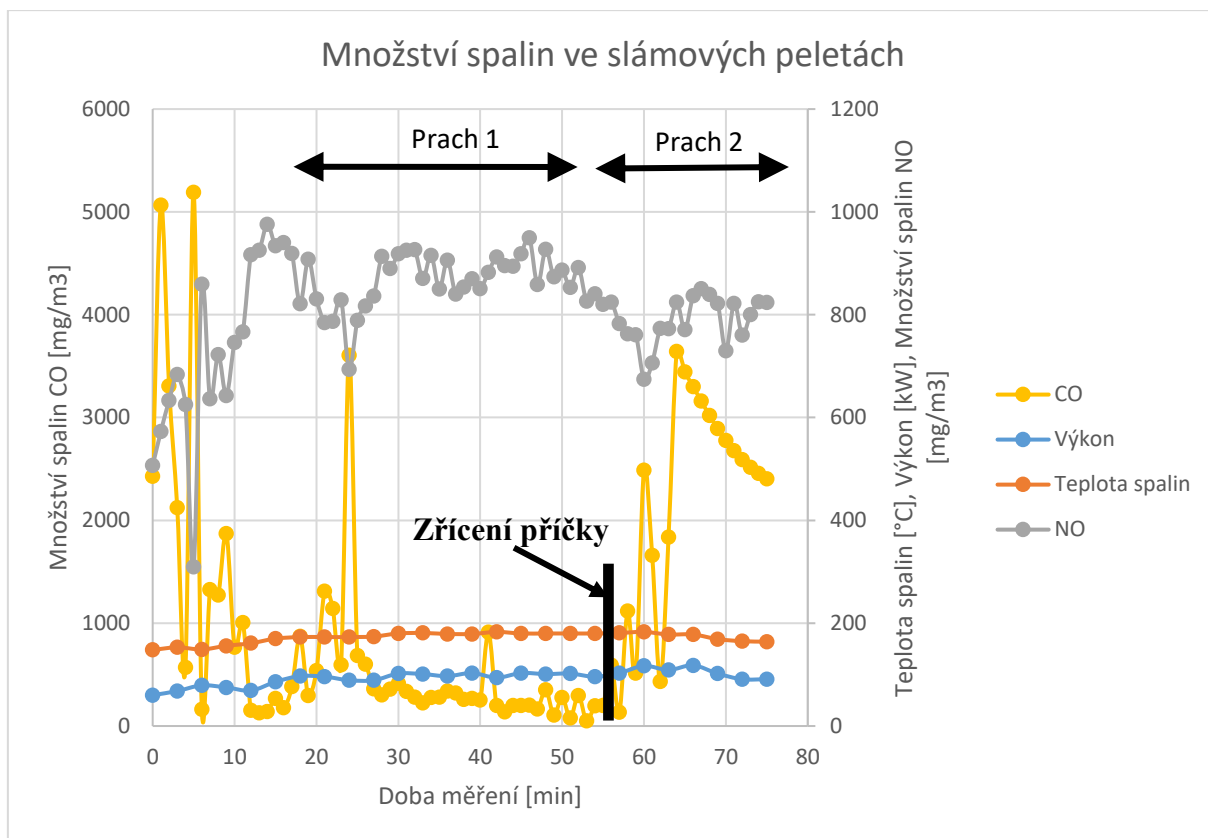
Samotné měření probíhalo tímto způsobem. Nejdříve se optimalizoval spalovací proces a to tak, aby se výkon kotle pohyboval kole 100 kW. Naměřené hodnoty jsou vyhodnoceny v následujících grafech.



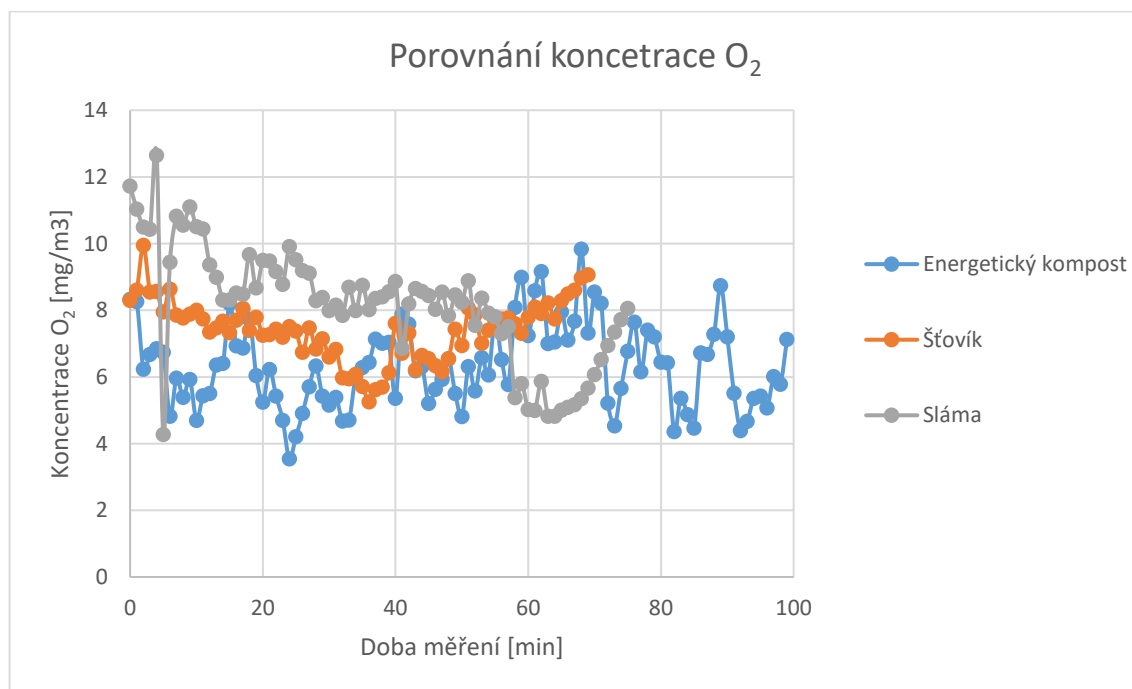
Graf 3-4 Množství spalin v energetickém kompostu



Graf 3-5 Množství spalin ve šťovíkových peletách



Graf 3-6 Množství spalin ve slámových peletách



Graf 3-7 Porovnání skutečné koncentrace O₂ u jednotlivých paliv

Průměrné hodnoty skutečných emisí CO a NO byly spolu s průměrnými hodnotami O₂ vloženy do následující tabulky.

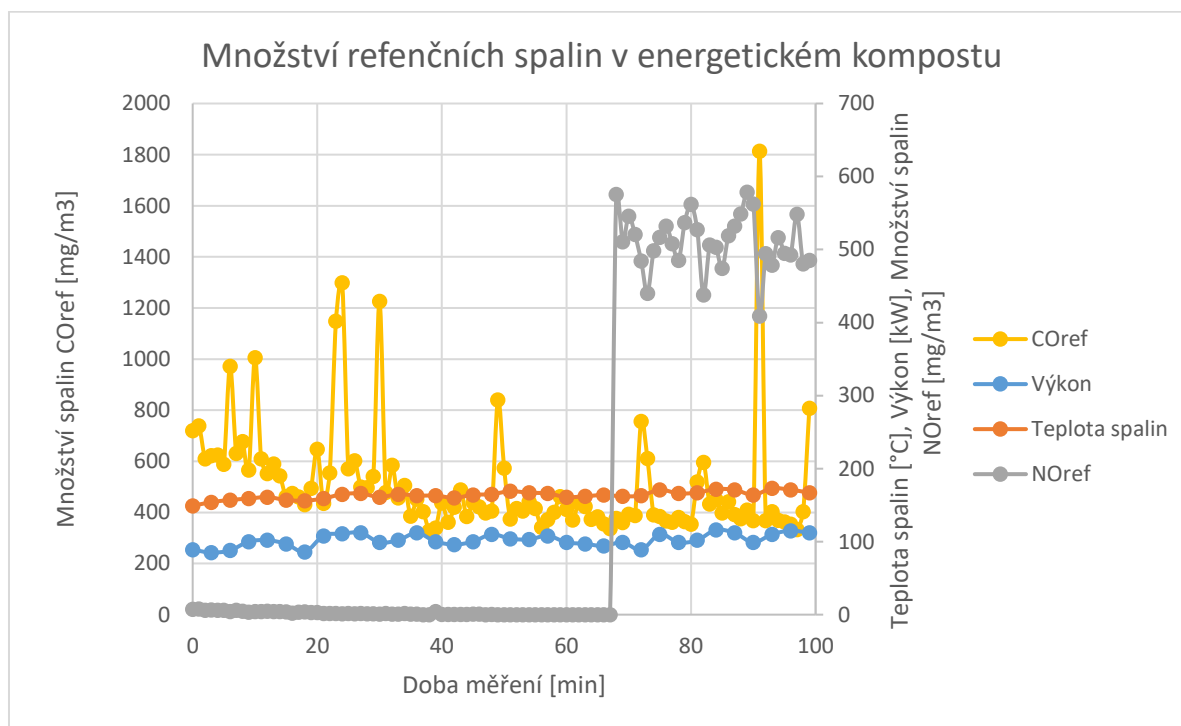
Tab. 3-11 Průměrné hodnoty skutečných emisí CO a NO a množství vzduchu O₂

Palivo	NO [mg/m ³]	CO [mg/m ³]	O ₂ [%]
Energetický kompost	218,1691	693,3753	6,3388
Šťovík	713,7091	655,3054	7,4133
Sláma	814,9730	1151,1038	8,1538

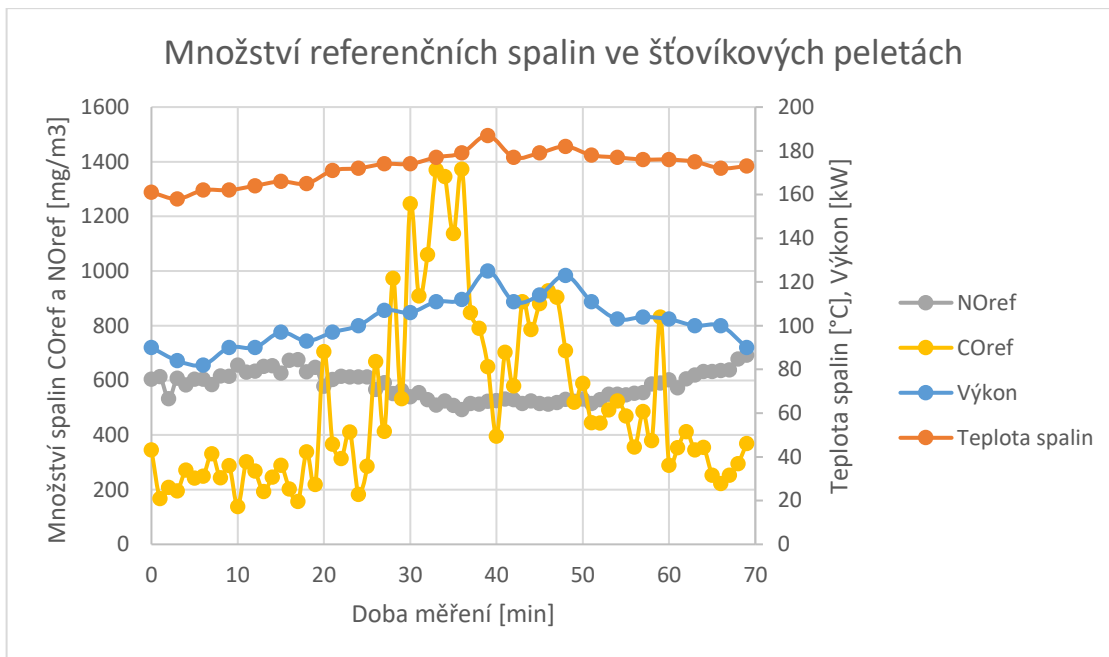
Hodnoty skutečných emisí CO a NO bylo nutné přepočítat na hodnoty referenční. Jako referenční hodnota O₂ bylo zvoleno 10 %. Tento přepočet se provádí pro možnost porovnání s emisními třídami podle normy ČSN EN 303/5. Přepočet se provádí pomocí rovnice 5. Přepočítané hodnoty jsou uvedeny v následujících grafech.

$$X_{ref} = X_{nam} \cdot \frac{21 - O_{2ref}}{21 - O_{2skut}} \quad (5),$$

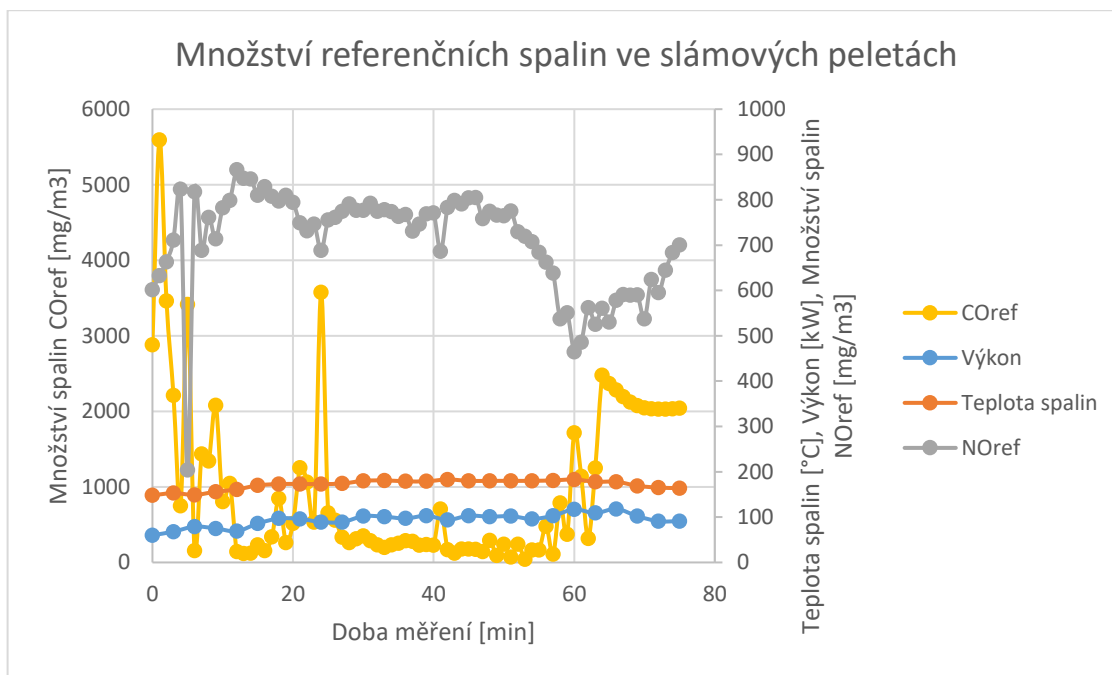
kde X_{ref} [mg/m³] je referenční hodnota koncentrace emisí,
 X_{nam} [mg/m³] je naměřená hodnota koncentrace emisí,
 O_{2ref} [%] je referenční hodnota kyslíku,
 O_{2skut} [%] je skutečná hodnota kyslíku při spalování.



Graf 3-8 Množství referenčních spalin v energetickém kompostu



Graf 3-9 Množství referenčních spalin ve šťovíkových peletách



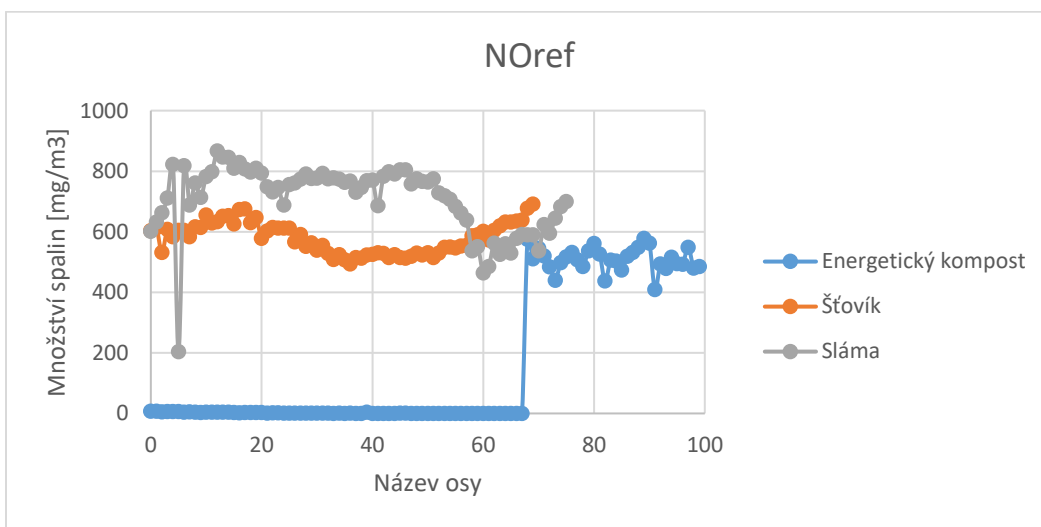
Graf 3-10 Množství referenčních spalin ve slámových peletách

Průměrné hodnoty referenčních emisí NO a CO jsou uvedeny v následující tabulce.

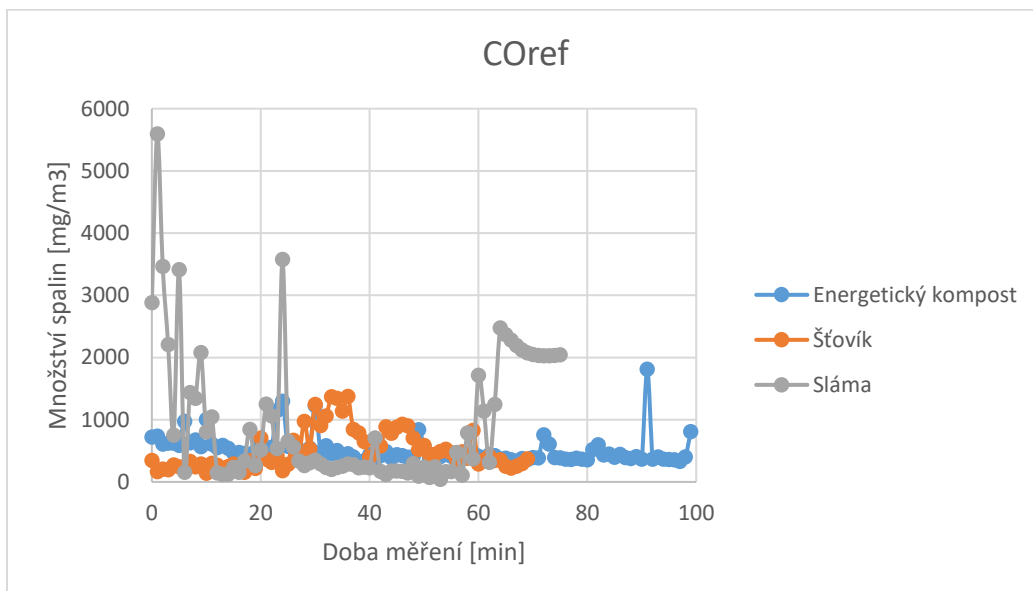
Tab. 3-12 Průměrné referenční hodnoty spalin

Palivo	NO [mg/m ³]	CO [mg/m ³]
Energetický kompost	164,3728	513,2368
Šťovík	580,0262	513,3386
Sláma	708,2387	975,8035

Pro názorné porovnání referenčních hodnot CO a NO jednotlivých paliv byly vytvořeny grafy pro NOref a COref se všemi palivy.



Graf 3-11 Porovnání referenčních hodnot NO



Graf 3-12 Porovnání referenčních hodnot CO

Výsledné, průměrné, referenční hodnoty emisí byly porovnány s normou ČSN EN 303-5, která popisuje mezní hodnoty produkce emisí pro spalovací zařízení dle jejich jmenovitého

výkonu. U energetického kompostu je hodnota CO na hranici třídy 4 a 5. Obdobná je situace u šťovíku, jehož hodnota CO je téměř totožná s hodnotou energetického kompostu. Slámové pelety dopadly nejhůře. Jejich hodnoty CO jsou na hranici tříd 3 a 4.

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný výkon kW	Mezní hodnoty emisí								
			CO			OGC			prach		
			mg/m ³ při 10% O ₂ ^a								
			třída	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		

Obr. 3-13 Výňatek z normy ČSN EN 303-5 o mezních hodnotách emisí [12]

Při porovnání paliv podle hodnot NO lze vidět, že energetický kompost má hodnotu výrazně nižší než zbylá dvě paliva. Vysoké hodnoty u šťovíku a slámy jsou ovlivněny tím, že konstrukce kotle není vhodná pro spalování tohoto typu paliva. Norma ČSN EN 303-5 nepojednává o určení emisní třídy podle NO.

Během spalování slámy došlo ke zřízení šamotové přičky ve zplyňovací komoře. Tato událost ovlivnila výsledné hodnoty CO.

Tab. 3-13 Hodnoty CO před a po zřízení přičky.

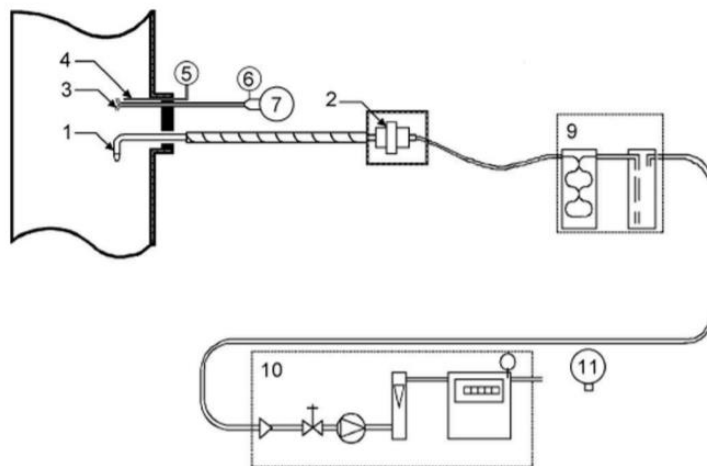
	Před zříčením	Po zhroucení
CO [mg/m ³]	815,2213	1795,6422



Obr. 3.14 Pohled do zplyňovací komory během spalovací zkoušky slámy

3.5.3 Měření TZL

Toto měření probíhalo tak, že se nejdříve změřila rychlost proudění pomocí analyzátoru spalin TESTO 350 XL. Na jejím základě se vypočítala velikost odběrové hubice. Poté se do otvoru v potrubí umístilo vzorkovací zařízení se zvolenou hubicí. Do vzorkovacího zařízení byl umístěn připravený filtr. Poté bylo vzorkovací zařízení připojeno na sací jednotku. Po zapnutí bylo nutné udržovat stálé proudění pro zajištění izokinetických vlastností. Měření probíhalo po dobu 30 minut. Během celého měření probíhalo měření vlhkosti v potrubí. Schéma celého měřicího zařízení je na následujícím obrázku.



Obr. 3.15 Schéma měření TZL (1- hubice sondy, 2- sestava filtru, 3- Prandtova trubice, 4- teplotní čidlo, 5- měřidlo teploty, 6- měření statického tlaku, 7- měření diferenciálního tlaku, 9- chladicí a sušící zařízení, 10- sací jednotka, 11- tlakoměr) [13]

Naměřené hodnoty byly přepočteny Ing. Otakarem Štelclem. Referenční hodnoty emisí TZL orientovány k referenční hodnotě kyslíku 10 % dle normy ČSN EN 303/5.

Tab. 3-14 Porovnání koncentrací emisí TZL

Typ paliva	Koncentrace referenční podmínky [mg/m³]
Energetický kompost 1	435
Energetický kompost 2	419
Šťovík 1	500
Šťovík 2	756
Sláma 1	642
Sláma 2	678

Všechny tři paliva nespĺňují emisní limity. U energetického kompostu jsou sice hodnoty nejnižší, přesto však více než 2,5krát překračují emisní limity. Toto překročení je způsobeno tím, že měření probíhalo před odlučovačem. Proto jsou hodnoty tak vysoké. Pokud bude použit vhodný odlučovač nebo bude použito více odlučovačů za sebou je možné u paliv respektive kotle dosáhnout i emisní třídy 5.

Závěr

Jedním z cílů bakalářské práce bylo provést rešerši dostupných tuhých alternativních paliv z biomasy a jejich vlastností. U těchto paliv se ve většině jedná o druhotný produkt lidské činnosti jako je zemědělství či odpadové hospodářství. Z hlediska výhřevnosti tyto paliva dosahují, někdy i převyšují výhřevnost hnědého uhlí. Problémem u těchto paliv může být to, že většinou obsahují vysoký podíl vody, to zvyšuje náklady na jejich přípravu jako paliva. Jejich hlavní přínos ovšem spočívá v tom, že se jedná o zpracování odpadů.

Druhá část bakalářské práce je zaměřena na spalování těchto paliv. Především na tvorbu emisí tuhých znečišťujících látek. V tom spočívá nejspíš největší problém těchto paliv. Ve většině paliva obsahují vysoký podíl popele a ten zvyšuje produkci emisí TZL. Další nevýhodou především energetického kompostu je vysoký podíl prašné frakce, což je další důvod zvyšování emisí TZL.

Experimentální část bakalářské práce měla za cíl ověřit palivové vlastnosti vybraných TAP a především ověřit tvorbu TZL u těchto paliv. Palivové vlastnosti byly ověřeny v palivové laboratoři Energetického ústavu a výsledné hodnoty jsou uvedeny výše. Spalovací zkouška probíhala na zařízení od firmy GEMOS. Toto zařízení mělo jmenovitý výkon 120 kW. Při spalovací zkoušce jsem ověřoval tvorbu emisí u energetického kompostu a pro porovnání jsem provedl zkoušku dvou referenčních paliv a sice šťovíku a slámy. Emise CO a NO_x vyšly u energetického kompostu na hranice emisních tříd 4 a 5. Hodnoty TZL, ovšem významně překračují povolené hodnoty i pro 3. třídu. Energetický kompost obsahuje vysoký podíl prašné frakce a popeloviny, ovšem hlavní důvod, proč jsou hodnoty TZL tak vysoké, je místo měření. Měření probíhalo před odlučovačem, ve kterém dochází k „čištění“ spalin. V místě měření jsou ovšem spaliny, které odcházejí z kotle bez jakéhokoliv zásahu.

Seznam použitých zdrojů

- [1] ČSN EN 15359 *Tuhá alternativní paliva - Specifikace a třídy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [2] BALÁŠ, Marek. *Kotle a výměníky tepla*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4770-7.
- [3] BORKOVEC, O. *Energetické využití odpadu ze suché a mokré fermentace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 54 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Lisý, Ph.D.
- [4] *Bioplynové stanice „suchá“ anaerobní fermentace* [online]. [cit. 2017-02-14]. Dostupné z: <http://www.fortexbioplyn.cz/cz/sucha-fermentace/>
- [5] JEVIČ, Petr, HUTLA, Petr a Zdeňka ŠEDIVÁ. *Možnosti energetického využití kompostů a separátů z anaerobního zpracování biomasy*. [Possibilities of Energy Utilization of Composts and Separates from Anaerobic Processing of Biomass]. Souhrnná výzkumná zpráva č. 538-2013-17253-A613. VÚZT, v.v.i. 2013. str. 44 (MZe)
- [6] *Aerobní fermentor EWA* [online]. [cit. 2017-03-14]. Dostupné z: <http://www.agro-eko.cz/aerobni-fermentor-ewa/>
- [7] *Palivo-energetické vlastnosti stabilizovaných čistírenských kalů* [online]. In: . 2015, s. 1-8 [cit. 2017-04-14]. Dostupné z: <http://www.odpadoveforum.cz/TVIP2015/prispevky/015.pdf>
- [8] KOLONIČNÝ, Jan. *Emise při spalování biomasy*. *Biom.cz* [online]. 2010-06-07 [cit. 2017-02-13]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/emise-pri-spalovani-biomasy-2>
- [9] ELBL, P. *Degradace biomasy při skládkování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 45 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Lisý, Ph.D..
- [10] SEDLÁČEK, D. *Analýza energetického využití kávových pelet*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 67 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Lisý, Ph.D..
- [11] BALÁŠ, Marek a Hugo ŠEN. *Negativní vlivy energetického využití biomasy – emise* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2006 [cit. 2017-03-23]. Dostupné z: www.eu.fme.vutbr.cz/file/199_1_1/
- [12] ZBOŘIL, M. *Návrh úprav biomasového kotle pro velmi vlhká paliva*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 94 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Lisý, Ph.D..
- [13] BAŠTA, T. *Metody měření emisí tuhých látek ve spalinách*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 58 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Lisý, Ph.D..
- [14] KUBESA, Petr a Jiří HORÁK. *Emise prachu z malých spalovacích zařízení na tuhá paliva a metody jejich stanovení*. In: *TZB-info* [online]. 2013 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/9536-emise-prachu-z-malych-spalovacich-zarizeni-na-tuha-paliva-a-metody-jejich-stanoveni>

- [15] Stroh-und Getreideverbrennung in Kleinf Feuerungen. *LANDTECHNIK* [online]. 2008, **63**(1), 32-33 [cit. 2017-05-01]. DOI: <http://dx.doi.org/10.15150/lt.2008.767>. ISSN 0023-8082. Dostupné z: <https://www.landtechnik-online.eu/ojs-2.4.5/index.php/landtechnik/article/view/2008-1-032-033/1213>

Seznam obrázků

Obr. 1-1 Základní princip bioplynové stanice pro suchou fermentaci.....	20
Obr. 1-2 Schéma aerobního fermentoru EWA.....	22
Obr. 2-1 Příklad kotle na biomasu se šikmým roštem	26
Obr. 2-2 Emisní faktory CO přepočtené na výhřevnost paliva.....	26
Obr. 2-3 Emisní faktory NO _x přepočtené na výhřevnost paliva	27
Obr. 2-4 Koncentrace emisí CO, SO ₂ a NO ₂ při spalování paliv kotlích malých výkonů.....	27
Obr. 3-1 Energetický kompost.....	29
Obr. 3-2 Pelety z čistého digestátu.....	29
Obr. 3-3 Pelety z digestátu a smrkových pilin	30
Obr. 3-4 Peletovací lis BSL-2.....	34
Obr. 3-5 Kalorimetr IKA C200.....	35
Obr. 3-6 Laboratorní sušárny – vlevo Venticell, vpravo KERN MLS	36
Obr. 3-7 Muflovací pec VEB ELEKTRO.....	37
Obr. 3-8 Vzorčky paliv po vyžíhání	38
Obr. 3-9 GEMOS KWH a ZKG.....	40
Obr. 3-10 Schéma zplyňovací komory ZKG s rošty.....	40
Obr. 3-11 Ovládací prostředí softwaru Labview	41
Obr. 3-12 Ovládací prostředí softwaru Labview	41
Obr. 3-13 Výňatek z normy ČSN EN 303-5 o mezních hodnotách emisí	47
Obr. 3.14 Pohled do zplyňovací komory během spalovací zkoušky slámy.....	48
Obr. 3.15 Schéma měření TZL	48

Seznam tabulek

Tab. 1-1 Systém klasifikace TAP	17
Tab. 1-2 Palivové vlastnosti vysušeného vyhnílého kalu	19
Tab. 1-3 Elementární rozbor hořlaviny.....	19
Tab. 1-4 Palivové vlastnosti – původní vzorek.....	20
Tab. 1-5 Prvkový rozbor – původní vzorek	20
Tab. 1-6 Palivové vlastnosti – odvodněný vzorek	21
Tab. 1-7 Prvkový rozbor – odvodněný vzorek	21
Tab. 1-8 Palivové vlastnosti energetického kompostu – původní vzorek.....	22
Tab. 1-9 Palivové vlastnosti energetického kompostu – odvodněný vzorek.....	23
Tab. 1-10 Palivo-energetické vlastnosti stabilizovaného čistírenského kalu.....	24

Tab. 2-1 Koncentrace TZL na kotli Heizomat RHK-AK 50.....	28
Tab. 3-1 Prvkový rozbor energetického kompostu	30
Tab. 3-2 Prvkový rozbor pelet z digestátu.....	31
Tab. 3-3 Prvkový rozbor pelet z digestátu a smrkových pilin.....	31
Tab. 3-4 Výhřevnost energetického kompostu.....	32
Tab. 3-5 Výhřevnost digestátu.....	32
Tab. 3-6 Výhřevnost digestátu se smrkovými pilinami.....	32
Tab. 3-7 Výsledné vlhkosti paliva.....	36
Tab. 3-8 Popelnatost paliv	37
Tab. 3-9 Technické údaje teplovodního kotle KWH.....	39
Tab. 3-10 Technické údaje zplyňovací komory ZKG	39
Tab. 3-11 Průměrné hodnoty skutečných emisí CO a NO a množství vzduchu O ₂	44
Tab. 3-12 Průměrné referenční hodnoty spalin	46
Tab. 3-13 Hodnoty CO před a po zřícení přičky.	47
Tab. 3-14 Porovnání koncentrací emisí TZL.....	49

Seznam použitých symbolů a zkratk

<i>ČOV</i>	Čistírna odpadních vod	
<i>ČSN</i>	Česká technická norma	
<i>EN</i>	Evropská norma	
<i>NDIR</i>	Nedisperzní infračervená spektrometrie	
<i>TAP</i>	Tuhé alternativní palivo	
<i>CO_{ref}</i>	Referenční hodnota emisí CO	
<i>FSI</i>	Fakulta strojního inženýrství	
<i>NO_{ref}</i>	Referenční hodnota emisí NO	
<i>PAH</i>	Polychlorované aromatické uhlovodíky	
<i>PAU</i>	Polychlorované aromatické uhlovodíky	
<i>PCDD</i>	Polychlorované dibenzodioxiny	
<i>PCDF</i>	Polychlorované dibenzofurany	
<i>POP</i>	Persistentní organické látky	
<i>TZL</i>	Tuhé znečišťující látky	
<i>VUT</i>	Vysoké učení technické	
<i>A</i>	$[kg \cdot kg^{-1}]$	Obsah popeloviny v palivu
<i>G</i>	$[kg]$	Hmotnost paliva
<i>h^r</i>	$[kg \cdot kg^{-1}]$	Obsah hořlaviny v palivu
<i>FC</i>	$[hm. \%]$	Fixní uhlík
<i>HHV_h</i>	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	Spalné teplo
<i>LLH₂₀</i>	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	Výhřevnost při 20 °C
<i>O_{2skut}</i>	$[\%]$	Naměřená hodnota kyslíku při spalování
<i>O_{2ref}</i>	$[\%]$	Referenční hodnota kyslíku
<i>Q_i^r</i>	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	Výhřevnost
<i>Q_s</i>	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	Spalné teplo
<i>r</i>	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	Výparné/Kondenzační teplo vody
<i>t_a</i>	$[^{\circ}C]$	Teplota měknutí
<i>t_b</i>	$[^{\circ}C]$	Teplota tavení

t_c	[°C]	Teplota tečení
V	[kJ · K ⁻¹]	Vodní hodnota kalorimetru
V^r	[%]	Hořlavina
W^r	[kg · kg ⁻¹]	Obsah vody v palivu
X_{nam}	[kg/m ³]	Naměřená hodnota koncentrace emisí
X_{ref}	[kg/m ³]	Referenční hodnota koncentrace emisí
ΔH	[J]	Změna entalpie
ΔT	[K]	Změna teploty