

Česká zemědělská univerzita v Praze
Institut tropů a subtropů

Katedra udržitelných technologií



Energetický potenciál exkrementů vybraných druhů zvířat tropů a subtropů

Disertační práce

Student Ph.D.: Ing. Adam Vaňkát
Vedoucí práce: Doc. Ing. Vladimír Krepl, CSc.
Konzultant : Ing. Jaroslav Kára, Ing. Irena Hanzlíková

Praha, 2012

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma „Energetický potenciál exkrementů vybraných druhů zvířat tropů a subtropů“ vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v příloženém soupisu literatury. Souhlasím, aby práce byla uložena v knihovně ČZU v Praze a zpřístupněna ke studijním účelům.

V Praze dne

Podpis doktoranda

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu disertační práce Doc. Ing. Vladimíru Kreploví, CSc. za vedení této disertační práce, dále externím konzultantům Ing. Jaroslavovi Károvi a Ing. Ireně Hanzlíkové za konzultace a Ing. Mgr. Silvii Vavroušové za asistenci při práci v terénu.

Anotace

Disertační práce se zabývá energetickým potenciálem trusu domestikovaných velkých herbivorů s využitím technologie přímého spalování a technologie anaerobní digesce. Tento potenciál je využíván především v rozvojových oblastech, často plně závislých na biomase jakožto jediném primárním zdroji energie, ale i v oblastech technologicky vyspělého světa. Práce zkoumá závislost různých palivových vlastností a potenciálu trusu pro produkci bioplynu na příslušnosti zvířete k taxonomické skupině býložravců (koňovití, turovití, velbloudovití). Laboratorní experimenty jsou doplněny výsledky případové studie uskutečněné v aridní vysokohorské oblasti, plně energeticky závislé na sušeném jačím trusu, tažné energii domácích zvířat a na kinetické energii vodní masy (mlýnská kola). Průměrné hodnoty spalného tepla trusu jsou nejvyšší u skupiny equidae (19,5717 MJ/kg), druhá je skupina bovidae (17,9985 MJ/kg) a třetí skupina tylopoda (19,0560 MJ/kg). Hodnoty průměrné kumulované produkce methanu na kilogram sušiny jsou 152,05 l/kg u skupiny bovidae, 196,50 l/kg u skupiny tylopoda a nejvyšší - 219,63 l/kg u skupiny equidae.

Klíčová slova

Biopalivo, biomasa, bioplyn, spalování biomasy, energetická konverze, Kargyak, vysokohorská aridní oblast, palivový trus, jačí trus .

OBSAH

1	ÚVOD.....	9
2	RESUMÉ LITERÁRNÍCH ZDROJŮ	11
2.1	Primární zdroje energie.....	11
2.2	Biomasa jako tradiční zdroj energie v rozvojových oblastech	11
2.3	Rozdělení tuhých biopaliv dle zdroje a původu.....	12
2.4	Fyzikálně – chemické vlastnosti tuhých biopaliv	13
2.4.1	Výhřevnost.....	13
2.4.2	Spalné teplo.....	13
2.4.3	Prchavá hořlavina	13
2.4.4	Prvkové složení: Uhlík (C), Kyslík (O),Vodík (H).....	14
2.4.5	Dusík (N)	14
2.4.6	Chlor (Cl)	14
2.4.7	Síra (S)	14
2.4.8	Draslík (K).....	15
2.4.9	Vápník (Ca), hořčík (Mg), fosfor (P).....	15
2.4.10	Těžké kovy	15
2.4.11	Obsah popele	15
2.4.12	Teplota deformace, měknutí, tání a tečení popele.....	15
2.4.13	Palivové vlastnosti exkrementů býložravců	16
2.5	Technologie přímého spalování tuhých biopaliv	16
2.5.1	Odlišnosti parametrů biomasy od paliv fosilního původu	16
2.5.2	Průběh spalování biomasy	16
2.5.3	Přebytek spalovacího vzduchu	17
2.5.4	Hoření spalných plynů	17
2.5.5	Spalovací zařízení rozvojového světa, jejich parametry	17
2.6	Socio-ekologické problémy rozvojových oblastí spojené se spalováním biomasy	19
2.7	Technologie využívající anaerobní digesce	20
2.7.1	Anaerobní fermentace	20
2.7.2	Charakteristika vstupních materiálů.....	21
2.7.3	Zařízení využívaná pro menší aplikace	21
2.7.4	Vlastnosti bioplynu.....	24
2.8	Energie obsažená ve výkalech, její vztah ke krmivu, fyziologii a anatomii trávení zvířat.....	25
2.8.1	Stupně přeměny energie	25
2.8.2	Analýza živin v potravě - Weendská analýza krmiv	26
3	CÍLE	29
3.1	Cíl disertační práce	29
3.2	Specifické cíle disertační práce	30
3.2.1	Stanovení palivových vlastností exkrementů specifických pro taxonomicky blízké skupiny býložravců	30
3.2.2	Stanovení palivových vlastností sušených exkrementů pro energetickou konverzi přímým spalováním :	31
3.2.3	Stanovení energetického potenciálu exkrementů s použitím technologie anaerobní digesce	31
3.2.4	Případová studie - popis praktického využití palivového trusu v aridní rozvojové oblasti	32

4	MATERIÁL A METODY	33
4.1	Výběr hospodářských zvířat pro testování trusu	33
4.2	Stanovení palivových vlastností	34
4.2.1	I. Skupina – palivové vlastnosti základní :	34
4.2.2	II. Skupina palivových vlastností:	37
4.3	Stanovení potenciálu pro produkci bioplynu	38
4.4	Zpracování výsledků	39
4.5	Dotazníkové šetření a pozorování v modelové oblasti.....	39
5	VÝSLEDKY A DISKUSE	42
5.1	Palivové vlastnosti trusu	42
5.1.1	Palivové vlastnosti základní	42
5.1.2	Spalné teplo.....	42
5.1.3	Obsah popele	44
5.1.4	Palivové vlastnosti vedlejší	46
5.2	Potenciál pro produkci bioplynu	50
	Následuje skupina vlastností, které jsou rozhodující pro potenciál produkce bioplynu.....	50
5.2.1	Hodnota pH	50
5.2.2	Obsah organické sušiny	51
5.2.3	Produkce bioplynu	52
5.2.4	Produkce methanu.....	54
5.2.5	Průběh fermentačního pokusu.....	55
5.3	Případová studie - využití palivového trusu v praxi	58
6	ZÁVĚR.....	63
7	LITERÁRNÍ ZDROJE.....	66

Seznam tabulek uvedených v textu

Tab. 1.	Faktory ovlivňující stravitelnost živin v potravě	28
Tab. 2.	Spalné teplo - výsledky testu ANOVA.....	42
Tab. 3.	Spalné teplo - výsledky testu LSD	43
Tab. 4.	Průměrný obsah sušiny.....	45
Tab. 5.	Palivové vlastnosti – Bovidae.....	46
Tab. 6.	Palivové vlastnosti - Tylopoda.....	47
Tab. 7.	Palivové vlastnosti - Equidae	48
Tab. 9.	Průměrné hodnoty pH.....	50
Tab. 10.	Průměrný obsah organické sušiny	51
Tab. 11.	Obsah bioplynu - ANOVA	52
Tab. 12.	Obsah bioplynu - LSD.....	52
Tab. 13.	Průměrné kumulované produkce methanu	54
Tab. 14.	Průměrná spotřeba paliva [kg] (na základě dotazníků a výpočtu).....	59
Tab. 15.	Průměrná denní spotřeba paliva v letním období [kg] (na základě měření)	59
Tab. 16.	Průměrné hodnoty palivových vlastností vedlejších.....	49
Tab. 17.	Rhode – palivové vlastnosti vedlejší	49

Seznam obrázků uvedených v textu

Obr. 1. Tradiční a vylepšená spalovací zařízení	18
Obr. 2. Tradiční železná kamna studených regionů	19
Obr. 3. Čínský typ fermentoru „Fixní dóm“	22
Obr. 4. Indický model KVIC s plovoucím plynojemem	23
Obr. 5. Stupně přeměny energie potravy	25
Obr. 6. Aparatura pro testování bioplynové produkce	39
Obr. 7. Vesnice Kargyak (4200 m.n.m)	58
Obr. 8. Ženy a jejich nůše s kapacitou na přenesení cca. 10kg jačího trusu.....	60
Obr. 9. Uložení paliva na putovních pastvinách	60
Obr. 10. Uložení paliva na střeše domů v letním období.....	61

Seznam grafů uvedených v textu

Graf 1. Výhřevnost bioplynu v závislosti na koncentraci metanu	24
Graf 2. Rozdělení živin v potravě dle Weendenské analýzy	27
Graf 3. Krabicový graf – obsah popele.....	44
Graf 4. Krabicový graf – obsah organické sušiny	51
Graf 5. Krabicový graf – kumulovaná produkce methanu	54
Graf 6. Kumulativní produkce bioplynu	55
Graf 8. Kumulativní produkce methanu.....	57

Seznam použitých zkratk

BE - brutto energie

BNLV – bezdusíkaté látky výtažkové

LSD – Metoda nejmenších významných rozdílů

ME – metabolizovatelná energie

NE – netto energie

ODM – organická sušina (organic dry matter)

SE – stravitelná energie

TERI - Tata Energy Research Institute

VÚZT – Výzkumný ústav zemědělské techniky v Praze Ruzyni

1 ÚVOD

Na Zemi se vyskytuje mnoho míst, vyznačujících se nehostinnými přírodními podmínkami, které značně znesnadňují život člověka. Příkladem takových oblastí jsou pouště a aridní oblasti, které můžeme nalézt na jedné pětině zemského povrchu, a to od nížin až po vysokohorské polohy. [1] Jediným zdrojem tepelné energie v těchto oblastech je často biomasa exkrementů hospodářských zvířat. Lidské přežití je zde umožněno pouze díky chovu velkých herbivorů, kteří prostřednictvím spásání a okusu koncentrují ve svých zažívacích traktech ligniny a jiné nestravitelné zbytky, které jsou poté vyloučeny ve formě pevných exkrementů (“koláčů”). [2] Tyto po vysušení představují základní manipulační jednotku paliva, jsou sbírány, uchovávány mnoha různými způsoby a je s nimi také obchodováno [28,29]. Z energetického pohledu tak nabývá často opomíjený produkt domestikovaných býložravců na svojí hodnotě a může být dokonce předřazen ostatním produktům hospodářských zvířat. [3]

Nejsou to však pouze aridní oblasti, ve kterých lidé od pradávna až po současnost využívají biomasu různého druhu jako paliva – ve skutečnosti se jedná o velkou část rozvojových zemí, které trpí nedostatkem moderních zdrojů energie. Nízký stupeň ekonomického a technického rozvoje zde neumožňuje velké investice do klasických velkokapacitních energetických centrál a jejich rozvodových sítí, a tak je třeba co nejefektivněji využít lokálně dostupných zdrojů, tj. vzhledem k převažující zemědělské povaze místní produkce, především odpadů ze zemědělské výroby. [4] Využití dalšího významného druhu rostlinné biomasy (dřeva) bývá často spojeno s problémem odlesnění a následné degradace půdy.

Nízký stupeň technického rozvoje může mít ve výsledku paradoxně velké pozitivní přínosy pro životní prostředí plynoucí z faktu, že veškerá energie v použitelné formě je využita v místě své “výroby”. Tento způsob energetického zásobování má několik předností: 1. jsou eliminovány vysoké energetické ztráty vznikající v přenosových soustavách, 2. znečištění plynoucí z energetické produkce je rozptýleno v malých koncentracích na velkém území, 3. biomasa patří mezi

obnovitelné zdroje energie a při využití efektivního způsobu energetické konverze je přinejmenším neutrální z pohledu produkce skleníkových plynů. [5]

V současné době jsou v rozvojových oblastech nejčastěji k dispozici dvě technologie energetické přeměny biomasy. Jedná se o: 1. přímé spalování v tradičních nebo vylepšených domácích kamnech, 2. technologii anaerobní digesce s následným spalováním vzniklého bioplynu.

Tato práce se zabývá energetickým potenciálem exkrementů vybraných druhů domestikovaných býložravců (za předpokladu využití obou výše jmenovaných technologií). Zkoumané exkrementy byly rozděleny do několika skupin dle druhové příbuznosti jejich producentů. Následně byly stanoveny palivové vlastnosti a potenciál pro produkci bioplynu jednotlivých skupin/živočišných druhů.

Výsledky laboratorních experimentů jsou v práci doplněny také výsledky terénního šetření situovaného do vysokohorské himalájské vesnice Kargyak (4200 m.n.m.). Ve vesnici jsou využívány pouze obnovitelné zdroje energie, a to v 90 % bez mezistupně konverze do jiné formy energie – tzn. bez zbytečných ztrát. Jedná se o energeticky i hospodářsky soběstačný systém. Vodní energie pohání mlýnská kola, která drtí pražený ječmen na tsampu, sluneční paprsky vysouší jílové cihly určené ke stavbě budov a dodávají energii k fotosyntéze místní sporé vegetace. Tato je poté přeměněna zažívacími trakty domácích býložravců (kteří poskytují též přepravní a tažnou práci) na jediné dostupné palivo – trus, který je sluncem opět vysoušen na požadovanou vlhkost (kolem 20 % vody) pro spalování.

Místní obyvatelé byli dotazováni na problematiku energetického využití trusu (jediného dostupného paliva). Na základě dotazníků a měření byla odhadnuta denní a roční spotřeba palivového trusu per capita a na domácnost. Dále jsou popsány metody sběru, úpravy a skladování trusu, celková doba vaření a sběru trusu. Zmíněna je též peněžní hodnota paliva.

Získané poznatky je možné využít například pro plánování rozvojových projektů v oblasti energetického zásobení domácností.

2 RESUMÉ LITERÁRNÍCH ZDROJŮ

2.1 Primární zdroje energie

Pojem energetické služby (jejichž konzumenty jsou všichni lidé) označuje skupinu požitků v domácnostech zahrnujících vaření, osvětlení, udržování pokojové teploty, chlazení a přepravu. Stejně tak jsou energetické služby spotřebovávány ve všech odvětvích průmyslu, zemědělství a v jiných oblastech lidských činností.

První článek energetického řetězce, který představuje přeměnu energie a její transport ke koncovému uživateli v užitkové formě, nazýváme primární zdroj energie. Spotřeba primárních zdrojů energie v USA v roce 1995 byla 330 GJ na osobu, což je přibližně osmkrát více než v subsaharské Africe (40 GJ po započítání komerčních i tradičních zdrojů energie). Mnoho lidí v rozvojových zemích však spotřebovává ještě mnohem méně. [6]

Největším zdrojem primární energie jsou fosilní paliva, která představují okolo 80 % veškeré lidské spotřeby. Atomová energie je zastoupena 6 %, vodní a jiné moderní obnovitelné zdroje jsou zastoupeny pouhými 2 %. Tradiční zdroje energie (nekomerční) jsou špatně měřitelné, jejich spotřeba je pouze odhadována na základě různých ukazatelů - celosvětově tato část spotřeby představuje kolem 10 %. Rozložení těchto zdrojů je velice nerovnoměrné; zatímco v rozvinutých zemích představují nekomerční zdroje kolem 2 % celkové spotřeby, v rozvojových zemích se toto číslo pohybuje mezi 30 – 90 % energetické spotřeby dané země. [6]

Celková spotřeba primární energie vykazuje kolem 2 % průměrného meziročního růstu; v rozvojových zemích je tento růst přibližně 3,5krát vyšší než v zemích rozvinutých (OECD). [6]

2.2 Biomasa jako tradiční zdroj energie v rozvojových oblastech

Vědecké studie [7] uvádějí, že přibližně 3,2 miliardy lidí (52 % lidské populace, rok 2003) jsou téměř bezezbytku závislé na tradičních zdrojích energie – tuhých palivech, a nemají tedy přístup k moderním formám energie, které umožňují ekonomický a technologický rozvoj a jsou klíčem k pohodlí života v průmyslově

vyspělé části světa. V rozvojových zemích biomasa představuje nejdůležitější zdroj energie (v průměru kolem 35 % celkové energetické spotřeby), v Číně je to 19 % a v Indii 42 % primárních energetických zdrojů, v nejchudších zemích toto číslo dosahuje až 90 %. Přibližně 75 % těchto lidí spaluje tuhou biomasu. [6] V Indii byla spotřeba biomasy v roce 1990 odhadována na 450 mil. tun ročně, tyto rozděleny v poměru 59:18:23 % mezi palivové dřevo, exkrementy a odpad z rostlinné výroby. [14]

Biomasa je všeobecně velmi snadno dostupný zdroj energie, který je však z velké části využíván tradičními metodami energetické konverze, které jsou značně neefektivní. Při použití vhodných technologií se naopak může jednat o velice ekologický a praktický zdroj energie pro domácnosti, a to při zachování minimálních nákladů. [6]

2.3 Rozdělení tuhých biopaliv dle zdroje a původu

Země Evropské unie přijaly normativní rozdělení tuhých biopaliv dle zdroje a původu. Toto rozdělení lze do určité míry aplikovat i na biopaliva využívaná v rozvojových oblastech. Jedná se o tyto skupiny biopaliv :

- **Dřevní biomasa** je biomasa ze stromů, keřů a křovin.
- **Bylinná biomasa** je z rostlin, které nemají dřevitý stonek a které odumírají na konci vegetační doby.
- **Ovocná biomasa** je biomasa z částí rostlin, které nesou semena.
- Pro „**směsi a příměsi**“ platí, že směsi jsou záměrně smíchaná biopaliva, zatímco příměsi jsou nezáměrně smíchaná biopaliva. [8]

Tuhá biopaliva – vysušené exkrementy hospodářských zvířat, jejichž výzkum je předmětem této práce jsou samostatnou skupinou, která nezapadá do evropského normativního rozdělení uvedeného výše. Jejich palivové vlastnosti značně kolísají a jsou častým předmětem debat. Jedná se v podstatě o bylinnou biomasu, které prošla trávicím traktem zvířat a je tudíž na jednu stranu „ochuzena“ o živiny, které

z ní odebralo zvíře, na stranu druhou jsou k ní přidány produkty zvířecího trávicího ústrojí.

2.4 Fyzikálně – chemické vlastnosti tuhých biopaliv

2.4.1 Výhřevnost

Výhřevnost je fyzikálním parametrem paliva, který udává kolik energie se uvolní úplným spálením jedné jednotky paliva. Oproti spalnému teplu není v hodnotě zahrnuto měrné skupenské teplo páry, obsažené ve spalinách. Předpokládá se, že její teplo je nevyužitelné a pára uniká v plynném stavu se spalinami.

Výhřevnost je v praxi podstatně více ovlivňována obsahem vody než druhem biomasy. U absolutně suché stébelné hmoty je např. výhřevnost pouze asi o 6 % nižší než u sušiny dřevin. Pro výhřevnost sušiny je rozhodující látkové složení. [9]

Biomasa s vysokým obsahem ligninu má zpravidla vyšší výhřevnost než materiál obsahující převážně celulózu. Výhřevnost samotného ligninu je při 28,8 MJ/kg o cca dvě třetiny vyšší než u celulózy (cca 17,3 MJ/kg). [9]

2.4.2 Spalné teplo

Spalné teplo je množství tepla, které je k dispozici, když se také zpětně získává kondenzační teplo z vodní páry, která se tvoří při spalování. K tomu musí být spaliny ochlazeny tak, aby mohla kondenzovat vodní pára z vazeb paliva obsahujících vodu ve formě vázané nebo volné.

Protože teplo přitom uvolněné přispívá k výtěžku energie, leží spalné teplo stále výše než výhřevnost. [9]

2.4.3 Prchavá hořlavina

Prchavá hořlavina je složka biomasy, která se uvolňuje během zahřívání na teplotu 400 – 500°C. Tento proces je také nazývá n zplyňování nebo-li pyrolýza. Jedná se o směs především těchto plynných látek: HC, CO, H₂, CH₄, NH₂, HCN, NO_x. [10]

Biomasa typicky obsahuje vysoký podíl prchavé hořlaviny, který může být až 80%, toto je hlavní rozdíl oproti tuhým palivům fosilního původu. Těto vlastnosti biomasy je třeba přizpůsobit spalovací zařízení. [10]

Vedle výhřevnosti ovlivňuje obsah vody také vhodnost ke skladování. Obsah vody nad 16 % vede zpravidla k biologickým procesům odbourávání nebo transformace, které jsou spojeny se ztrátami. [9]

2.4.4 Prvkové složení: Uhlík (C), Kyslík (O), Vodík (H)

Tyto prvky jsou hlavními složkami tuhých biopaliv. Biomasa obecně obsahuje kolem 50 % C, 43 % O a 6 % H v hořlavině. [11] C a H jsou oxidovány během spalování za vzniku vodní páry a CO_2 . Touto reakcí zvyšují spalné teplo. Přítomnost kyslíku ovlivňuje spalné teplo negativně. Obsah uhlíku v dřevnatých biopalivech je vyšší než u paliv bylinného původu. Neúplné spalování vede k emisím škodlivin: CO, polycyklické aromatické uhlovodíky, vznikají saze a dehet. [9]

2.4.5 Dusík (N)

Obsah N v palivu působí přímo na produkci oxidů N, tento prvek přechází při spalování téměř úplně do plynné fáze. Obsah dusíku je vyšší u bylinných biopaliv než u paliv dřevního původu. [10]

2.4.6 Chlor (Cl)

Obsah chloru v tuhých biopalivech je důležitý technický parametr s ohledem na tvorbu korozivní HCl a jejích solí. Cl se při spalování též podílí na tvorbě polychlorovaných dibenzo-dioxinů/furanů (PCDD/F). Zvýšený obsah Cl může také vést ke snížené teplotě měknutí popela. [10]

2.4.7 Síra (S)

Síra přechází během spalování za tvorby SO_2 , SO_3 a stupňů alkalisulfátů z největší části do plynné fáze. Oxidy jsou vlivem zchlazení spalin ve výměňkové části spalovacího zařízení z velké části kondenzovány. 40 – 90 % Síry obsažené v palivu přechází do popele – záleží na obsahu alkalických kovů v palivu. Vyšší koncentrace SO_2 vedou ke korozivním procesům ve spalovacím zařízení. [9,10]

2.4.8 Draslík (K)

Obsah K v palivu nepřímo působí při korozivních procesech na výměníku tepla a dalších částech zařízení přicházejících do styku se spalinami. Přítomnost draslíku ovlivňuje teplotu měknutí popela. Oproti Ca, který zvyšuje bod tání, K teplotu tání snižuje. [10]

2.4.9 Vápník (Ca), hořčík (Mg), fosfor (P)

Ca a P působí zvýšení bodu tání popela. Také Mg jsou připisovány takové účinky. U paliv s nepříznivými poměry měknutí popela může být prostřednictvím přísad obsahujících Ca dosaženo zlepšení poměrů tání popela. Mezi další pozitivní účinky přítomnosti těchto prvků patří schopnost vázání problémových látek. Vysoký obsah alkalických kovů (především Ca) vede např. k tomu, že velká část síry zůstane v popelu, a tím se neprojeví ve spalinách jako problémová látka. Tři uvedené prvky zvyšují hnojivou hodnotu popela. [9,10]

2.4.10 Těžké kovy

Těžké kovy zůstávají z velké části v popeli a ovlivňují tím jeho opětnou použitelnost jako hnojiva. Těžkými kovy jsou především Cd, Zn a Pb. Nacházejí se následkem rekondenzace také na částicích polétavého popílku. [10]

2.4.11 Obsah popele

Obsah popele je důležitý parametr s ohledem na volbu vhodného spalovacího zařízení. Musí být uvažována jeho manipulace/ukládání, další využití. Vhodná jsou paliva s nízkým obsahem popele. Dřevo má relativně nízký obsah popele, opak platí o kůře a bylinných biopalivech. [10]

2.4.12 Teplota deformace, měknutí, tání a tečení popele

Při termických procesech přeměny energie dochází na žárovém lůžku k fyzikálním změnám popele. Podle úrovně teploty dochází k deformaci až k úplnému roztavení částic popela. Tyto změkčovací poměry jsou charakterizovány teplotami deformace, měknutí, tání a tečení. U paliv s nízkými teplotami měknutí popela, mezi které patří např. stébelniny a celé rostliny obilovin, existuje vysoké riziko, že překročení kritické teploty povede k připečeninám v topeništi, na roštu a na stěnách výměníku. Tyto připečeniny mohou vést k poruchám, přerušování provozu

a ke změnám v přívodu spalovacího vzduchu a musí být mechanicky odstraňovány. [9, 10]

2.4.13 Palivové vlastnosti exkrementů býložravců

Na rozdíl od většiny tuhých biopaliv, jejichž fyzikální a chemické vlastnosti jsou pro danou třídu paliva víceméně podobné a tudíž předvídatelné, biomasa z exkrementů není zahrnuta v žádné normativní klasifikaci, její palivové vlastnosti kolísají a kolem jejich stanovení panují značné debaty. Obsah popele kolísá v rozmezí 20 – 50 %, spalné teplo biomasy exkrementů dosahuje 50 – 75 % tohoto parametru u dřeva [12]. Významná je zde také veličina „energetické hustoty“. Kalorické hodnoty vztažené na kilogram paliva mohou být pro různé živočišné druhy velmi podobné, zatímco výhřevnost vztažená na objem je druhově velmi specifická veličina. [13]

2.5 Technologie přímého spalování tuhých biopaliv

2.5.1 Odlišnosti parametrů biomasy od paliv fosilního původu

Biopaliva jsou v přirozeném, původním stavu lehčí, objemnější. Biopaliva mají vysoký obsah prchavé hořlaviny (až 80 %) (hoří tzv. dlouhým plamenem), čemuž je třeba přizpůsobit i spalovací zařízení, která musí umožňovat jednak dosoušení paliva před jeho zapálením, jednak dokonalé promíchání nechlazených spalných plynů se vzduchem umožňující jejich následné prohoření. Biopaliva mají nižší hodnoty teploty deformace, tání a tečení popele. [10]

2.5.2 Průběh spalování biomasy

V ideálním případě spalování představuje kompletní oxidaci organické složky biomasy na plynné produkty – CO₂ a H₂O. Tato konverze probíhá ve třech fázích:

1. Vysoušení paliva (odpařování vody)
2. Pyrolýza (termální rozklad)
3. Finální oxidace zuhelnatělé pevné složky [10]

2.5.3 Přebytek spalovacího vzduchu

Lambda - λ (přebytek spalovacího vzduchu) je hlavním parametrem průběhu spalování, označuje poměr množství vzduchu skutečně dodaného a stechiometrického množství vzduchu potřebného k úplnému spálení hořlavé složky paliva.

Při spalování biomasy v běžných topeništích má být přebytek spalného vzduchu $\lambda = 1,6$ až 2, aby byly zajištěny minimální emise CO. Při hodnotě $\lambda=1$ by postačovalo ke spálení 1 kg suchého dřeva asi 4,5 m³ vzduchu. Tento přebytek vzduchu znamená, že se sice palivo dokonale spálí, ale zároveň s tímto přebytkem ohřátého vzduchu uniká komínem značné množství tepla. Běžná teplota spalin v komíně bývá kolem 180 °C. [9,10]

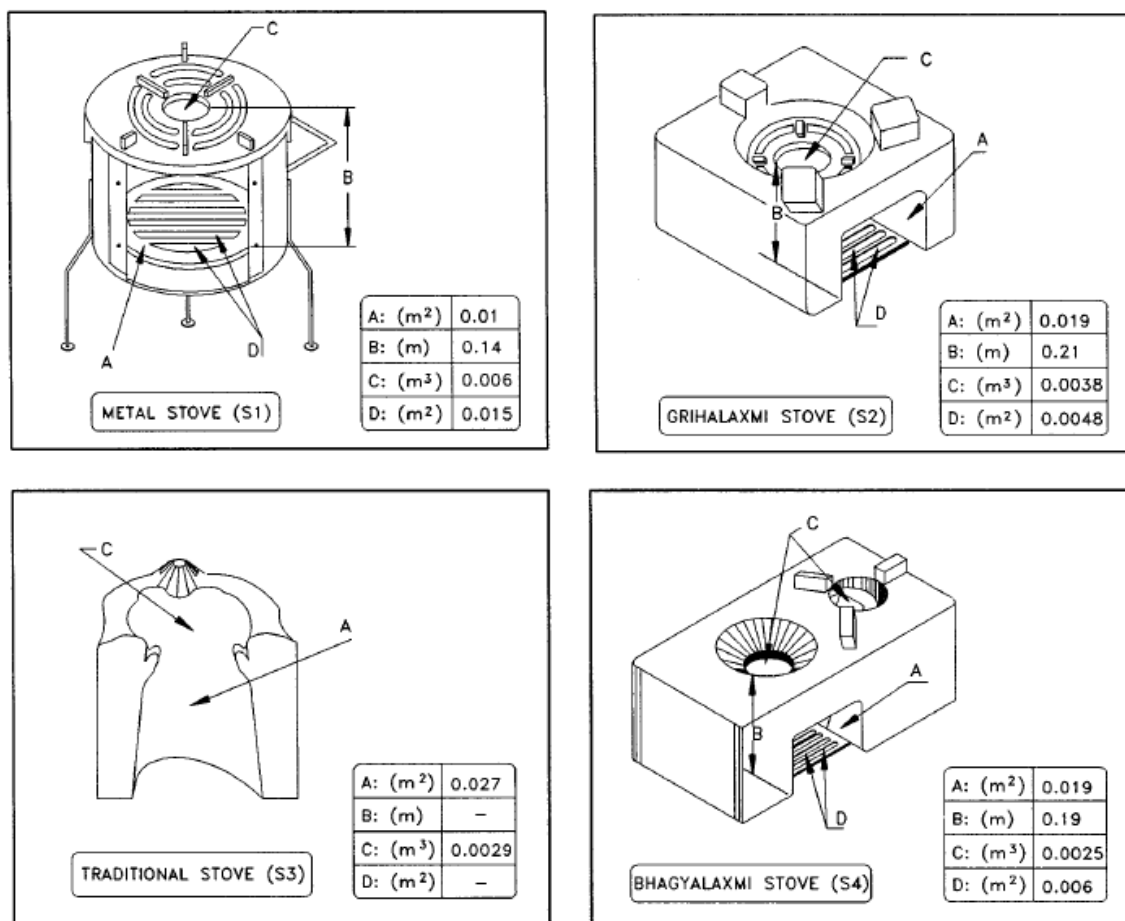
2.5.4 Hoření spalných plynů

Spalné plyny z pevných biopaliv musí prohořet v neochlazené dohořivací komoře při teplotách kolem 1100°C dříve, než přijdou do styku s teplosměnnými plochami. Předčasné ochlazení plamene způsobuje vyloučení kyslíku z CO₂ (samovolný vznik CO) a vznik sazí. Předčasnému zchlazení spalných plynů zabrání oddělené přívody primárního a sekundárního vzduchu. Ty se používají u všech moderních topenišť – i u nejmenších kamen a kotlů pro vytápění rodinných domků. Sekundární vzduch by měl být vždy předehřátý, aby nedocházelo ke zbytečnému ochlazení plamene. [10]

2.5.5 Spalovací zařízení rozvojového světa, jejich parametry

Nejen samotné spalovací zařízení, ale i způsob jeho použití má vliv na výsledný užitek z paliva – předanou tepelnou energii a emise. Každá geografická oblast, jejíž obyvatelé využívají tuhá biopaliva, je charakteristická svými tradičními spalovacími zařízeními, která jsou více či méně přizpůsobena spalování tuhých exkrementů. Dále jsou tyto spalovací zařízení uzpůsobena místním klimatickým poměrům, musí vyhovovat různým účelům – v teplých krajích je to pouze vaření, ve chladnějších oblastech se jedná i o vytápění obytných místností během zimních období. Nejjednodušší způsob spalování je na otevřeném ohništi, tepelná účinnost je zde však nejnížší (3-5 %), nemluvě o nekontrolovatelném šíření spalin. [10]

Dalším vývojovým stupněm spalovacích zařízení jsou tradiční kamna typu S3 a jim podobná zařízení (obr. 1.). Kamna jsou bez kouřovodu, jejich užití je pouze na vaření, nikoliv vytápění místností. Tepelná účinnost těchto zařízení se pohybuje kolem 15 %. Vylepšené verze základního jílového typu (S2, S4) již disponují účinností 31 – 33 %. [14]



Obr. 1. Tradiční a vylepšená spalovací zařízení (převzato z [14])

Způsob obsluhy ovlivňuje účinnost zařízení – při zvýšeném zaplnění spalovací komory palivem nebo popelem a sníženém přísunu vzduchu klesá teplota spalování a zvyšuje se tepelná účinnost, zároveň však také rostou emise škodlivin. [14]

Studené regiony vyžadují zařízení, která umožňují kromě vaření i vytápění obytných místností. K takovým patří například tradiční železná kamna (obr. 2) používaná v severoindických himalájských regionech. Vnitřek kamen neobsahuje

žádné další prvky jako je rošt nebo vodiče spalin, jejich tepelná účinnost se pohybuje mezi 8-15 %. [15]



Obr. 2. Tradiční železná kamna studených regionů (převzato z [15])

Vylepšené verze těchto kamen dosahují dle jejich autorů výsledné tepelné účinnosti až 60 % (vaření 20 % + vytápění místnosti 40 %). [15]

2.6 Socio-ekologické problémy rozvojových oblastí spojené se spalováním biomasy

Neplánovité využívání místních dřevin k energetickým účelům neodvratně vede ke zničení lokálního ekosystému a následné degradaci půdy [6]. Nedokonalé spalování v otevřených ohništích nebo v primitivních spalovacích zařízeních má za následek nadbytečnou produkci skleníkových plynů a dalších škodlivých látek.

Vaření a vytápění probíhá často ve špatně větraných místnostech a vede tedy nezbytně k vysokému znečištění domácího ovzduší. Mezi obvyklé polutanty patří oxid uhelnatý, pevné částice, oxidy dusíku atd. Znečištěnému domácímu ovzduší jsou nejvíce vystaveny ženy a děti u nichž má toto za následek vysokou prevalenci některých chorob dýchacích cest a kardiovaskulárního systému. U dětí je zvýšená pravděpodobnost úmrtí v raném věku. [7]

2.7 Technologie využívající anaerobní digesce

2.7.1 Anaerobní fermentace

Anaerobní fermentace je soubor složitých, na sebe navazujících fyzikálních, fyzikálně chemických a biologických procesů, na jejichž konci stojí anaerobní konverze biomasy na bioplyn - metanogeneze. Pro zjednodušení popisu je tento děj rozkládán na 4 fáze:

- I. Fáze – Hydrolýza – prostředí ještě obsahuje vzdušný kyslík. Podmínkou nastartování je obsah vlhkosti nad 50 % hm. Enzymatický rozklad mění polymery na jednodušší organické látky, monomery.
- II. Fáze – Acidogeneze – v této fázi dochází k vytvoření anaerobního prostředí. Vznikají vyšší organické kyseliny, alkoholy.
- III. Fáze – Acetogeneze – Acidogenní specializované kmeny rozkládají vyšší org. kyseliny na kyselinu octovou (CH_3COOH), vodík (H_2) a oxid uhličitý (CO_2).
- IV. Fáze – Metanogeneze – metanogenní acetotrofní bakterie rozkládají kys. octovou na methan a oxid uhličitý, hydrogenotrofní bakterie produkují methan z vodíku a oxidu uhličitého. [16]

Jednotlivé fáze se vyznačují různou kinetikou procesů, metanogeneze probíhá 5x pomaleji než ostatní tři fáze. Tomu je třeba přizpůsobit konstrukci zařízení a dávkování vstupním materiálem tak, aby nedošlo k zahlcení fermentoru. [16]

Podle složení substrátu se vytvářejí vhodné podmínky pro množení určitých kmenů bakterií způsobujících rozklad organické látky. Množství mikroorganismů odpovídá jejich růstové křivce, na níž lze sledovat 6 fází:

1. Lagová fáze – mikroorganismy se postupně adaptují na dané podmínky.
2. Fáze zrychleného růstu – částečně přizpůsobené mikroorganismy se začínají množit.
3. Fáze exponenciálního růstu – zcela přizpůsobené mikroorganismy se silně množí, protože mají dostatečné množství živin.
4. Fáze zpomaleného růstu – rychlost růstu mikroorganismů se zpomaluje.

5. Stacionární fáze - vlivem počínajícího nedostatku živin je počet vznikajících a umírajících mikroorganismů v rovnováze.

6. Fáze poklesu – absolutní nedostatek živin způsobuje postupné odumírání a rozklad mikroorganismů.

Pro urychlení náběhu fermentačního procesu se využívá očkovací látky (inokula) z fermentoru v ustáleném provozním stavu nebo se používají sušené stimulanty obsahující metanogeny v inaktivovaném stavu. [16]

2.7.2 Charakteristika vstupních materiálů

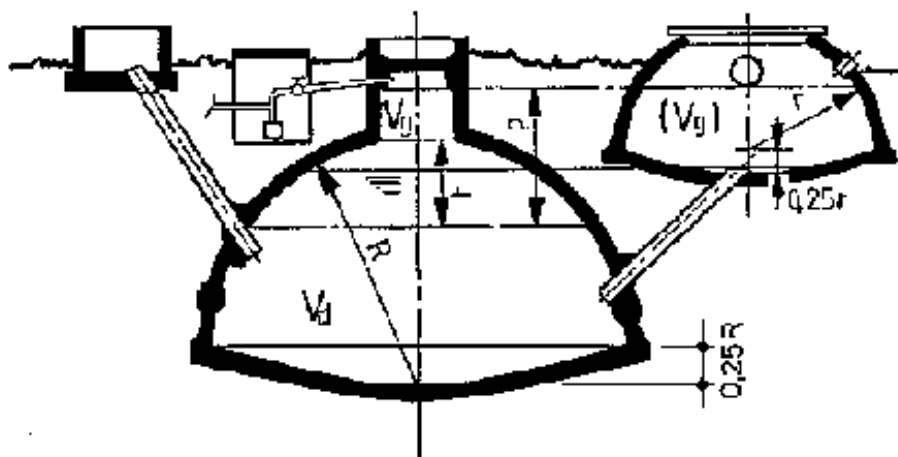
Vhodný vstupní materiál pro anaerobní fermentaci by měl splňovat následující parametry:

- Nízký obsah anorganických látek, vysoký podíl organicky rozložitelných látek.
- Obsah sušiny v rozmezí 3 – 22 %.
- Číslo pH na vstupu do procesu blízké neutrální hodnotě (7 – 7,8 %). Tento parametr během acidogenní fáze klesá, poté opět stoupá vlivem činnosti metanogenních organismů.
- Poměr dusíkatých a uhlíkatých látek by se měl optimálně pohybovat v pásmu 30:1.
- Materiál by neměl obsahovat inhibitory (antibiotika) ani látky v hnilobném rozkladu.

Nevhodné předchozí skladování může mít též negativní efekty na vhodnost materiálu. [16]

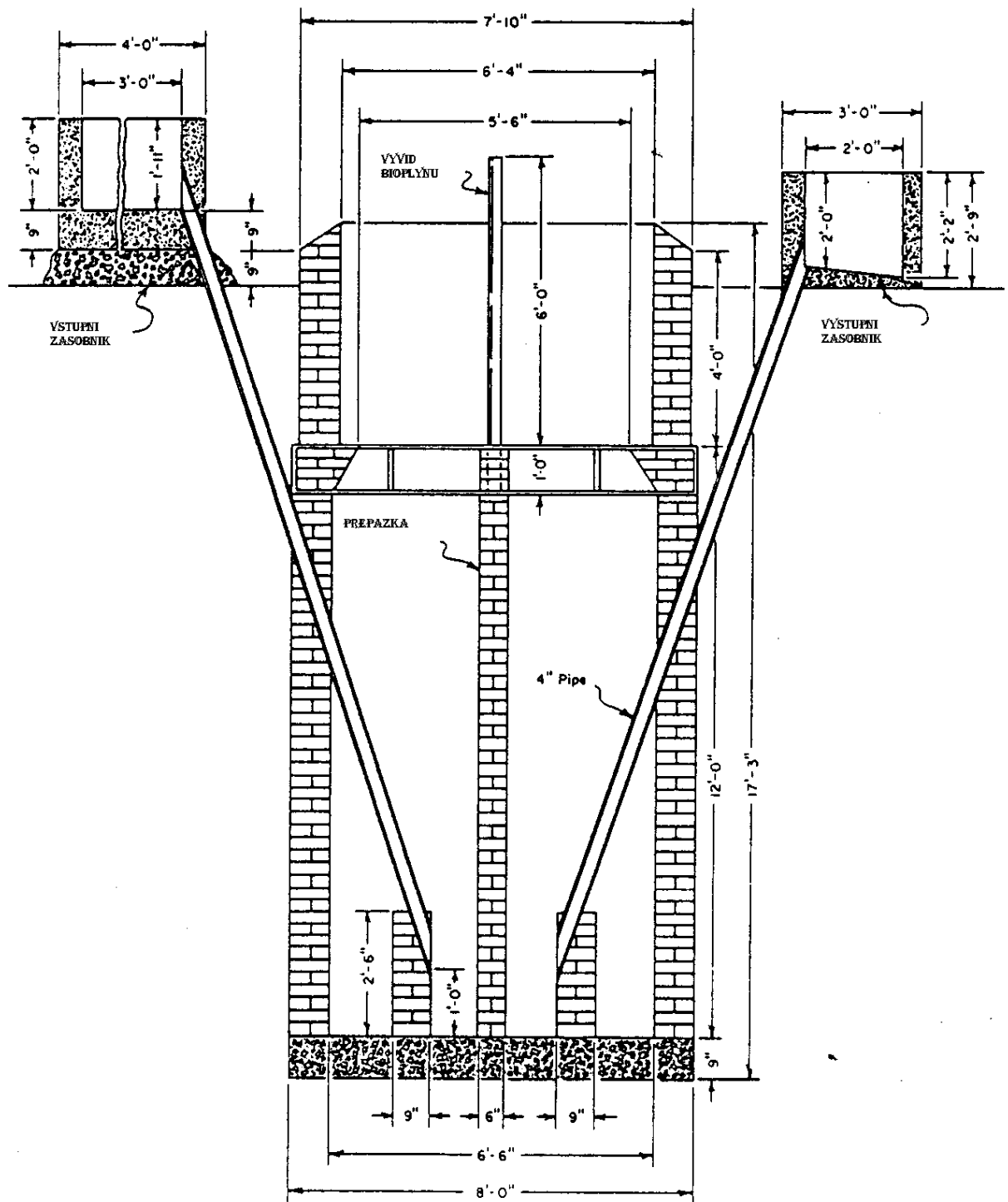
2.7.3 Zařízení využívaná pro menší aplikace

Existuje mnoho řešení anaerobních digestorů pro domácí a komunitní aplikace – od nejjednodušších dávkových fermentorů, přes oblíbený čínský model „pevného domu“, až po indický „KVIC“. Čínský model je starší typ reaktoru vyvinutý kolem roku 1936. Skládá se z horní a dolní polokulovité části, tyto jsou spojeny zdí ve tvaru válce. Materiálem jsou cihly nebo beton. Vstupní materiál by měl obsahovat max 10 % sušiny. Předpokládaná produkce bioplynu tohoto typu je 0,2 – 0,6 objemu reaktoru denně. [17]



Obr. 3. Čínský typ fermentoru „Fixní dóm“ (převzato z [31])

Indický model „KVIC“ vznikl v roce 1962, nejčastěji je navrhován na objem 6-8m³. Zdi a dno reaktoru jsou z cihel nebo z betonu, zatímco plovoucí plynojem je ocelový. Jedná se o poklop, který se pohybuje po vodiči, vertikálně nahoru a dolů - dle aktuální produkce/spotřeby bioplynu a udržuje tak i jeho ustálený tlak. [17]



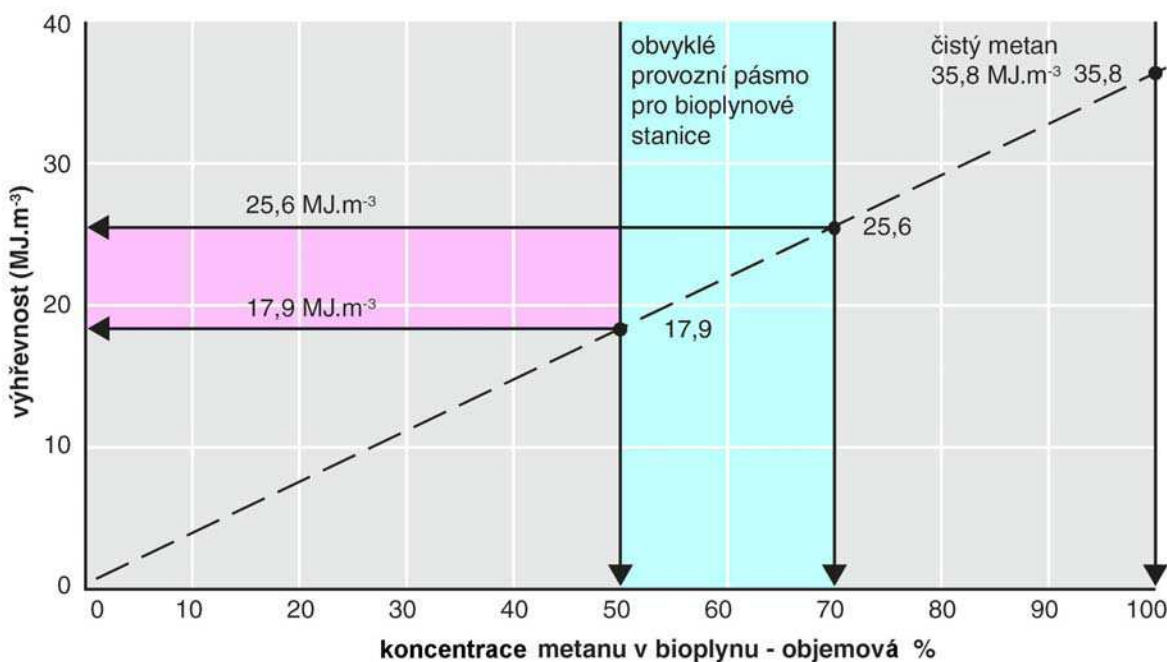
Obr. 4. Indický model KVIC s plovoucím plynojemem (převzato ze [32])

V celém světě je dále používáno velké množství reaktorů s různými plastovými částmi v podobě nádrží nebo vaků.

2.7.4 Vlastnosti bioplynu

Bioplyn vzniklý biologickými procesy fermentace by měl v ideálním případě obsahovat dva majoritní plyny: metan a oxid uhličitý. Koncentrace metanu se pohybuje mezi 50 - 75 %, CO₂ jej doplňuje 25 – 50 %. Zbýlý podíl tvoří minoritní plyny, mezi nejvýznamnější patří H₂S, který pochází většinou z biochemického rozkladu bílkovin. Přítomnost vodíku svědčí o porušení rovnováhy mezi acidogenní a metanogenní fází, způsobené pravděpodobně přetížením reaktoru vstupním materiálem. [16]

Výhřevnost je určena obsahem metanu (viz graf 1), ostatní minoritní plyny mají zanedbatelný význam. Hranice zápalnosti metanu se vzduchem je 5 – 15 % objemových, zápalná teplota je 650 – 750 °C. Bioplyn je těžší než vzduch, pro člověka tvoří smrtelně nebezpečné prostředí v reaktorech a prohlubeninách. [16]

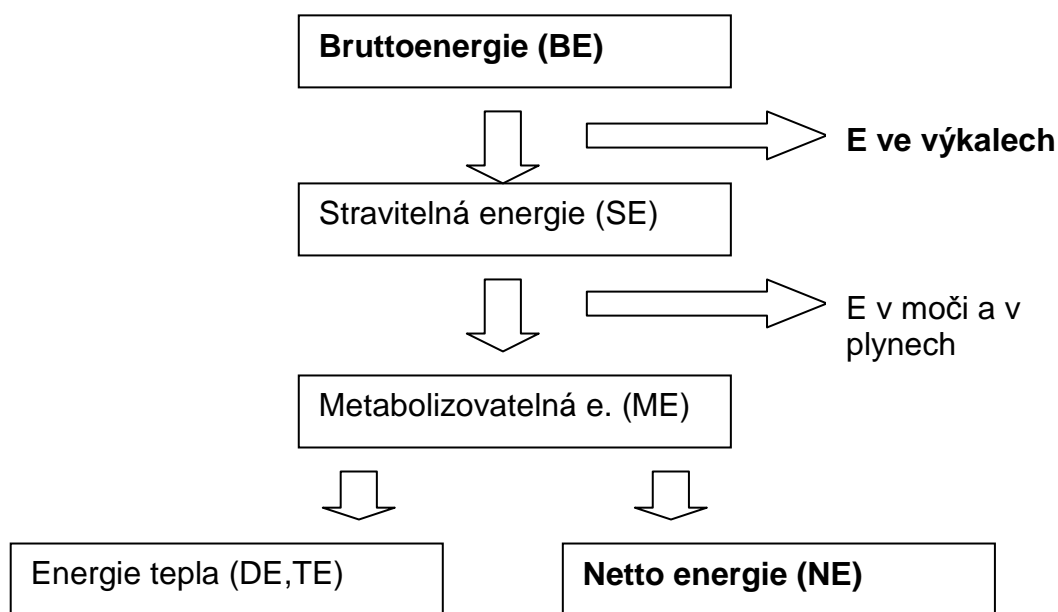


Graf 1. Výhřevnost bioplynu v závislosti na koncentraci metanu (převzato ze [16])

2.8 Energie obsažená ve výkalech, její vztah ke krmivu, fyziologii a anatomii trávení zvířat

2.8.1 Stupně přeměny energie

Chemická energie přijímaná v potravě zvířete je transformována do živočišných produktů, látkové výměny a svalové práce, je spotřebovávána na syntézu. Schema na Obr. 5. znázorňuje energetickou přeměnu probíhající v těle zvířete. Ze schematu vyplývá, že energie obsažená ve výkalech je rozdílem **brutto energie** obsažené v krmivu a stravitelné energie (zdánlivě stravitelné energie) krmiva. [18]



Obr. 5. Stupně přeměny energie potravy (převzato z [18])

Brutto (BE) energie představuje chemickou energii obsaženou v krmivu. Zjišťujeme ji úplným spálením krmiva v kalorimetru nebo výpočtem na základě znalosti obsahu hrubých živin dle známého spalného tepla jednotlivých živin dle následujícího vzorce:

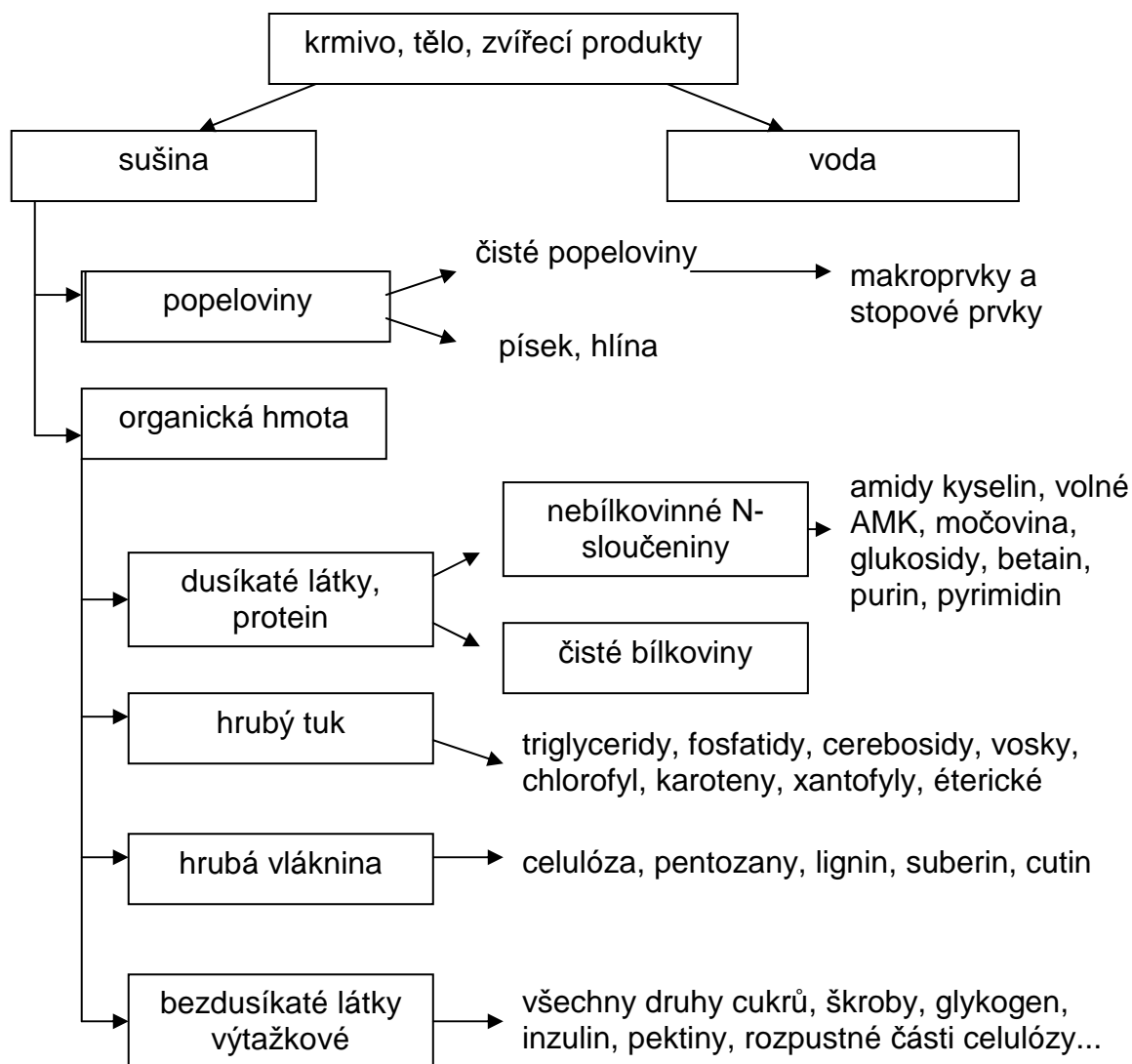
$$\begin{aligned} \text{BE [MJ/kg]} &= 0,0239 \times \text{NL [g/kg]} \\ &+ 0,0398 \times \text{tuk [g/kg]} \\ &+ 0,0201 \times \text{vláknina [g/kg]} \\ &+ 0,0175 \times \text{BNLV [g/kg]} \\ &[18] \end{aligned}$$

Brutto energie neříká nic o využitelnosti energie pro zvíře, tuto část energie popisuje veličina zvaná stravitelná energie.

Stravitelná energie (SE) - zohledňuje ztráty ve výkalech specifické pro druh krmiva a zvířete. Různý podíl stravitelné energie je pro zvíře dále ztracený ve formě moči a kvasných plynů. [18]

2.8.2 Analýza živin v potravě - Weendská analýza krmiv

Jedená se o analytický postup pro stanovení živin obsažených v potravě (krmivu), který byl vyvinut již v roce 1860 ve Weende. Živiny stanovitelné touto nejběžněji používanou metodou znázorňuje graf 2. Existuje rozsáhlý soubor dat pro většinu druhů krmiv. [18]



2.8.3 Stravitelnost živin v potravě

Stravitelnost živin v potravě je ovlivněna faktory uvedenými v následující tabulce:

Tab. 1. Faktory ovlivňující stravitelnost živin v potravě

Skupina faktorů	Příklady
1 - f. závislé na zvířeti	druh, stáří, onemocnění
2 - f. závislé na krmivu	chemické složení, antinutritivní látky, množství, zpracování
3 - krmné doplňky	průmyslové enzymy

Stravitelnost živin je ovlivněna rozdílnou stavbou trávicího traktu jednotlivých druhů zvířat. Největší rozdíly existují mezi zvířecími druhy v trávení hrubé vlákniny. Přežvýkavcům umožňují jejich předžaludky efektivní trávení této složky potravy. V tlustých a slepých střevech monogastrických zvířat probíhá trávení hrubé vlákniny pouze v omezeném rozsahu. Krom toho ovlivňuje obsah hrubé vlákniny v krmné dávce i stravitelnost ostatních živin. Tento vliv roste s klesající mikrobiální aktivitou v pořadí přežvýkavci, koně, králíci, prasata, drůbež. Na stravitelnost živin má vliv také věk zvířat, jelikož enzymatický systém není u mladých savců ještě úplně vyvinut. [18]

Různé rasy a genotypy stejného živočišného druhu se zpravidla ve schopnosti trávení prakticky neliší. [18]

3 CÍLE

3.1 Cíl disertační práce

Přestože jsou tuhé exkrementy velkých hospodářských herbivorů bezesporu důležitým a mnohdy i jediným zdrojem energie nejen rozvojových oblastí, nebyla tato tuhá paliva zatím podrobena žádné klasifikaci a nebyly přesně stanoveny jejich palivové vlastnosti (viz výše).

Poznání palivových vlastností je nezbytné pro výběr vhodného zařízení pro energetickou konverzi, ať už se jedná o:

A: přímé spalování

B: konverzi založenou na produkci bioplynu

Znalost těchto vlastností je nezbytná také pro optimalizaci procesu energetické konverze v zařízení s vhodnými parametry.

Cílem disertační práce je:

1. Stanovení základních chemicko-fyzikálních vlastností trusu vybraných hospodářských herbivorů důležitých pro jeho energetickou konverzi pomocí anaerobní fermentace a přímého spalování.
2. Určení závislosti sledovaných vlastností na příslušnosti zvířete k taxonomické skupině a následné potvrzení nulové hypotézy – palivová vlastnost trusu je na taxonomické skupině nezávislá nebo její vyvrácení a potvrzení hypotézy alternativní – palivová vlastnost je dána příslušností k taxonomické skupině.
3. Stanovení orientačních hodnot základních palivových vlastností zkoumaných skupin herbivorů v podmínkách mírného vegetačního pásu. Rozdělení trusu do skupin založené na taxonomickém zařazení hospodářských zvířat, jejichž exkrementy budou podrobeny analýze. Bude tak navazovat na současně uplatňovanou klasifikaci tuhých biopaliv dle „původu a zdroje“, jak uvádí norma.

4. Případová studie – ověření výsledků laboratorního výzkumu a jejich srovnání s živou praxí v aridní rozvojové oblasti. Budou popsány metody sběru a skladování trusu, na základě dotazníků a měřením bude odhadnuto množství trusu spotřebovaného k energetickým účelům per capita a na domácnost. Budou stanoveny preference využití různých druhů trusu místních obyvatel. Zjištěné množství trusu potřebné k energetickým účelům bude srovnáno s celkovou produkcí trusu hospodářskými zvířaty.

3.2 Specifické cíle disertační práce

Stejně jako ostatní biopaliva, budou se i exkrementy hospodářských zvířat vyznačovat značnou variabilitou fyzikálních a chemických vlastností. Tyto kvalitativní vlastnosti je třeba důkladně popsat nejen za účelem výběru vhodného spalovacího zařízení, ale také pro optimalizaci vlastního spalovacího procesu (snížení obsahu nespáleného uhlíku, minimalizace emisí nedokonalého spalování, zamezení poškození spalovacího a výměňkového prostoru a roštu tavením a tečením popela) [9].

3.2.1 Stanovení palivových vlastností exkrementů specifických pro taxonomicky blízké skupiny býložravců

Jak již bylo popsáno v úvodní literární rešerši, různé druhy herbivorů se vyznačují značnými odlišnostmi v příjmu a zpracování potravy - od dietických preferencí, přes způsob příjmu potravy a anatomii trávicí soustavy, až po fyziologické procesy trávení a energetické konverze v tělech zvířat. Exkrementy budou rozděleny do skupin na základě příslušnosti k taxonomické skupině herbivorů. Poté bude testována pravdivost hypotéz :

H₀ – Palivové vlastnosti trusu taxonomicky vzdálených druhů hospodářských herbivorů nebudou vykazovat žádné rozdíly.

H₁ - Palivové vlastnosti trusu taxonomicky vzdálených druhů produkují exkrementy, které se v palivových vlastnostech významně liší.

Po statistickém zpracování dat a vyhodnocení pravdivosti hypotéz bude následovat první skupina závěrů – stanovení palivových vlastností specifických pro jednotlivé skupiny hospodářských zvířat v podmínkách mírného vegetačního pásma.

3.2.2 Stanovení palivových vlastností sušených exkrementů pro energetickou konverzi přímým spalováním :

Budou stanoveny následující fyzikálně chemické vlastnosti exkrementů:

-	Obsah sušiny	[% m/m]
-	Prchavá hořlavina	[% m/m]
-	Neprchavý zbytek	[% m/m]
-	Popel	[% m/m]
-	C	[% m/m]
-	H	[% m/m]
-	N	[% m/m]
-	S	[% m/m]
-	O	[% m/m]
-	Cl	[% m/m]
-	Spalné teplo	[MJ/kg]
	tepelné chování popele:	
-	bod měknutí	[°C]
-	bod tání	[°C]
-	bod tečení	[°C]

3.2.3 Stanovení energetického potenciálu exkrementů s použitím technologie anaerobní digesce

Exkrementy hospodářských zvířat jsou díky svým vlastnostem také vhodným materiálem pro anaerobní digesci (vysoký obsah organicky rozložitelného materiálu apod.) Pro jejich optimální využití v technologii anaerobní digesce je

třeba stanovit navíc několik dalších vlastností oproti technologii přímého spalování. Jedná se o:

- hodnotu pH
- obsah popelovin
- obsah organické sušiny

Poté je možné laboratorně ověřit potenciál pro bioplynovou produkci, a to pokusem v dávkovém fermentoru s následným měřením množství a vlastností vzniklého bioplynu. Měřeny budou následující parametry fermentačního procesu :

- množství vzniklého bioplynu
- obsah metanu (CH₄)
- obsah oxidu uhličitého (CO₂)
- obsah kyslíku (O₂)

3.2.4 Případová studie - popis praktického využití palivového trusu v aridní rozvojové oblasti

Dotazováním obyvatel vysokohorské vesnice budou porovnány a doplněny výsledky laboratorních testů poznatky ze živé praxe aridní rozvojové oblasti. Budou zjištěny běžné pracovní postupy spojené se sběrem, zpracováním a skladováním palivového trusu. Dále budou zjištěny počty členů domácností, počty kusů domácího zvířectva, doba vaření, subjektivní kvalitativní hodnocení paliva různých druhů hospodářských zvířat a jeho ekonomická hodnota. Budou stanoveny preference různých druhů trusu u místních obyvatel.

Na základě dotazníků a měření bude stanovena denní a roční spotřeba palivového trusu na domácnost / per capita. Zajímavým poznatkem bude také srovnání množství trusu vyprodukovaného hospodářskými zvířaty s množstvím paliva spotřebovaným.

4 MATERIÁL A METODY

4.1 Výběr hospodářských zvířat pro testování trusu

Základním pravidlem pro výběr zvířat jejichž trus bude odebírán k analýze je výborný zdravotní stav zvířete a dosažení dospělého věku. Toto jsou předpoklady plně funkční trávicí soustavy. Trus bude odebírán od zvířat chovaných v zoologických zahradách ČR (ZOO Praha, ZOO Vyškov, ZOO Chomutov) a v experimentálních a výukových zařízeních ČZU v Praze. Zvířata budou mít k dispozici luční seno dovezené z různých míst ČR adlibitně.

Živočišné druhy budou rozděleny do 3 skupin dle příbuznosti, z každé skupiny budou otestovány 2-3 druhy.

- **Skupina A - Bovidae** bude obsahovat 3 podskupiny:

A1 : Turovití: Jak (*Bos mutus f. grunniens*), Tur domácí (*Bos primigenius f. taurus*)

A2: Ovce: *Ovis ammon f. aries*

A3: Kozy: *Capra aegagru f. hircus*

Jedná se o skupinu „čistých přežvýkavců“ se třemi předžaludky a jedním hlavním žaludkem. Trávení u nich probíhá nejdéle a vstřebávání živin je na nejvyšší úrovni. Průchod krmiva trávicí soustavou trvá 3 – 10 dní [18].

- **Skupina B – Tylopoda:** Velbloud dvouhrbý (*Camelus ferus f. bactrianus*), Lama krotká (*Lama guanicoe f. glama*)

Tato skupina se vyznačuje nízkými nároky na kvalitu krmiva. Zvířata podávají pracovní výkony a poskytují své produkty v aridních oblastech od nížin až po vysokohorské polohy. Jejich trávicí soustava se vyznačuje žaludkem složeným ze 3 částí.

- **Skupina C – Equidae** – Kiang (*Equus kiang*), Kůň – Český teplokrevník, Hucul (*Equus Caballus*),

Koňovití mají relativně jednodušší trávicí soustavu, trávení vlákniny probíhá v tlustém a slepém střevě. Průchod krmiva trávicí soustavou trvá 24 – 48 hodin [18].

4.2 Stanovení palivových vlastností

Všechny palivové vlastnosti budou stanoveny na základě technických norem přijatých pro tuhá paliva. Vlastnosti budou rozděleny do dvou skupin dle důležitosti a technických možností jejich stanovení.

4.2.1 I. Skupina – palivové vlastnosti základní :

Palivové vlastnosti z první skupiny jsou pro naše účely nejdůležitější. Jejich stanovení, které je technicky i finančně relativně málo náročné, je možné provádět ve školní laboratoři. Z každé skupiny bude odebráno kolem 30ti vzorků trusu, celkem bude provedeno cca sto měření základních palivových vlastností. Jedná se o následující vlastnosti:

- příprava laboratorního vzorku dle: ČSN P CEN/TS 14778-1, 83 8211: Tuhá biopaliva – Vzorkování – Část 1: Metody vzorkování a ČSN P CEN/TS 14780, 83 8213: Tuhá biopaliva – Metody přípravy vzorku

Vzorky trusu budou vysušeny v chráněných laboratorních podmínkách. Poté budou rozmělněny laboratorním drtičem na částice o průměru menším než 1mm. Poté bude náhodně odebírán zkušební vzorek z homogenizovaného celku.

- stanovení obsahu sušiny dle: ČSN P CEN/TS 14774-2, 83 8220, Tuhá biopaliva - Metody stanovení obsahu vody - Metoda sušení v sušárně - Část 2: Celková voda - Zjednodušená metoda

Vzorek trusu je navážen do vysoušečky a vložen do sušárny se stálým prouděním vzduchu. Poté je vzorek předsušen při teplotě 60 °C po dobu jednoho až dvou dnů. Poté je vzorek vyjmut a ponechán v laboratoři po dobu cca 24 hod pro vyrovnání vlhkosti s okolím. Laboratorní vzorek je rozemlet a je odebrán analytický vzorek. Tento je dosušen po dobu 4 hod při teplotě

105 °C. Po vysušení a vychladnutí (ve vypnuté sušárně) je nádoba se vzorkem zvážena s přesností na 0,001 g. [33]

Na základě stanovení sušiny v čerstvé hmotě a v suché nebo předsoušené hmotě stanovíme % sušiny celkové.

Sušina celková:

$$x = m_2 / m_1 \cdot 100$$

Vlhkost (% vody) se vypočítá podle vzorce:

$$y = 100 - x$$

m₁ - navážka vlhkého vzorku v g

m₂ - hmotnost vysušeného (při 105 °C) vzorku v g [34]

- **obsah popela dle** : ČSN P CEN/TS 14775, 83 8210: Tuhá biopaliva -
Metody stanovení obsahu popela

Stanovení popele následuje po stanovení obsahu sušiny. Vysušený vzorek je navážen do keramického kelímku, který je poté vložen do muflové pece předehřáté na teplotu 850°C na 2 hodiny. Po uplynutí času je vzorek vyjmut, vychlazen v exikátoru a zvážen. Z naměřených hodnot je vypočten obsah popele v % z původní hmoty materiálu. [35]

Spalné teplo: ČSN P CEN/TS 14918, 83 8214: Tuhá biopaliva – Metoda stanovení spalného tepla

Spalné teplo vysušeného vzorku je stanoveno pomocí automatického bombového kalorimetru MS 10 A kalibrovaného kyselinou benzoovou. Jedná se o přístroj s plně automatizovaným průběhem měření, včetně početní korekce výměny tepla.

Postup měření v kalorimetru MS 10 A:

Vzorek navážíme do kelímku a vložíme do kalorimetrické bomby spolu s 5ml vody. Bombu uzavřeme a naplníme stlačeným kyslíkem. Poté ji vložíme do kalorimetru, kde nasedne na zapalovací jehlu a uzemňující podložku. Po stlačení tlačítka „START“ je měření dále řízeno počítačem. Nejprve je otevřen napouštěcí ventil a kalorimetrická nádoba je naplněna vodou z termostatu, jejíž teplota je zobrazena na displeji. Vzorek je zapálen v naprogramovaném čase vybitím kondenzátoru přes zapalovací drátek. Po proběhnutí určené doby je měření ukončeno. Voda je vypuštěna z kalorimetrické nádoby, obsluha je informována akustickým signálem o ukončení pokusu. Na displeji se střídavě zobrazuje korigovaný teplotní skok, teplota při zapálení a číslo měření. Nakonec jsou z kalorimetru vyjmuty oba uzávěry a kalorimetrická bomba. [40]

Spalné teplo vzorku spočítáme dle vzorce:

$$Q_s = (dTk \times Tk - Q_N - Q_d) / D \quad [36]$$

dTk korigovaný teplotní skok

Tktepelná kapacita kalorimetru (9161 J/°C)

Gváha vzorku

Q_Noprava na vzniklou kyselinu dusičnou

Q_doprava na zážehový drátek

4.2.2 II. Skupina palivových vlastností:

Stanovení těchto vlastností je technicky i finančně náročnější, bude provedeno odbornou laboratoří. Vzhledem k této skutečnosti se bude jednat pouze o několik orientačních měření z každé skupiny herbivorů.

- **prvkové složení** bude stanoveno dle ČSN P CEN/TS 15290, 83 8223: Tuhá biopaliva – Stanovení obsahu hlavních prvků a dle ČSN P CEN/TS 15289, 83 8226: Tuhá biopaliva – Stanovení celkového obsahu síry a chloru.

Analýza bude provedena v laboratořích VŠCHT. Obsah hlavních prvků bude stanoven metodou optické emisní spektrometrie s indukčně vázanou plazmou (ICP/OES), obsah síry a chloru bude proveden rozkladem biopaliva a převedením kyselých plynných složek do roztoku s následným stanovením síry a chlóru iontovou chromatografií. [37, 41]

- **prchavá hořlavina** bude stanovena dle ČSN P CEN/TS 15148, 83 8222: Tuhá biopaliva – Metoda stanovení obsahu prchavé hořlaviny.

Stanovení prchavé hořlaviny probíhá zahřátím po dobu 7 min bez přístupu vzduchu při teplotě $900\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$. (Nutno použít kelímek s víčkem.) Úbytek hmotnosti vzorku po odečtení obsahu vody potom představuje obsah prchavé hořlaviny. Součet prchavé hořlaviny a neprchavé hořlaviny je roven hořlavině vzorku v daném stavu. [38]

- **vlastnosti popela** bude stanoveno dle ČSN P CEN/TS 15370-1, 83 8227: Tuhá biopaliva – Metoda pro stanovení teploty tání popela – část 1: Metoda stanovení charakteristických teplot. [39]

4.3 Stanovení potenciálu pro produkci bioplynu

Laboratorní testy bioplynové produkce budou probíhat ve Výzkumném ústavu zemědělské techniky v Praze, Ruzyni.

Před samotným pokusem bude pomocí elektronického pH-metru stanovena hodnota pH zkušební vzorku rozpuštěného ve vodě. Dále bude stanoven hmotnostní podíl sušiny a organické sušiny dle norem uvedených výše (organickou sušinu představuje rozdíl sušiny a popele).

Pro testování bioplynové produkce bude aplikován mokrá fermentační proces – obsah sušiny v pokusné směsi 8 % hm. Jako inokulum startující fermentační proces bude použit fermentát dovezený z bioplynové stanice Kněžice. Fermentát bude namíchán v poměru 2:8 s testovanými exkrementy v množství jeden kilogram do každého ze dvou pokusných dávkových fermentorů. Dva fermentory pro každý vzorek budou plynotěsně uzavřeny a vloženy do vodní lázně o teplotě 42°C. Po dobu 30 – 45 dní bude každodenně měřena denní produkce bioplynu a jeho složení. Bude měřen obsah methanu, oxidu uhličitého a testována přítomnost kyslíku.

Po ukončení pokusu bude opět přezkoumán obsah organické sušiny a stanoven její úbytek oproti počátečnímu stavu.



Obr. 6. Aparatura pro testování bioplynové produkce

4.4 Zpracování výsledků

Výsledky experimentů budou zpracovány ve statistickém softwaru Statgraphics plus 5.1. Ze statistických metod bude využit především parametrický test analýzy rozptylu (ANOVA) a názorné zobrazení krabicovými grafy. Tyto metody umožní ověření nebo vyvrácení hypotézy závislosti jednotlivých palivových parametrů na příslušnosti k příbuzensky blízké skupině druhů.

4.5 Dotazníkové šetření a pozorování v modelové oblasti

V rámci poznání praktického využití palivového trusu bude navštívena modelová rozvojová oblast (vesnice Kargyak 4200 m.n.m., stát Jammu a Kašmír, SZ Indie). Jediným zdrojem tepelné energie pro vaření a vytápění obydlí je zde sušený trus býložravců. Ve vesnici je již zakořeněná spolupráce s českou neziskovou organizací. Budou navštíveny všechny domácnosti, jejich členům budou předloženy dotazníky týkající se problematiky energetického využití trusu. Otázky jsou následující :

1. Počet členů domácnosti
2. Počet a druhy zvířat vlastněné domácností
3. Počet a celková doba vaření za den
4. Množství palivového trusu spotřebovaného za den (zima/léto)
5. Sběr trusu (metody, časové nároky, způsob uskladnění)
6. Celkový objem trusu nashromážděného na zimu
7. Schema železných topných zařízení
8. Cena trusu
9. Kvalitativní rozdělení trusu - označení všech druhů trusu dle stupně preference.
10. Využití trusu pro jiné účely (hnojivo)
11. Využití jiného paliva (kdy, kolik)

Ze získaných dat bude možné přibližně spočítat roční spotřebu paliva na osobu/domácnost dle následujícího vzorce:

$$m_d = m_n \times n \quad [\text{kg}]$$

$$m_r = m_n \times n_1 \times k_1 + m_n \times n_2 \times k_2 \quad [\text{kg}]$$

m_d - denní spotřeba paliva

m_r - roční spotřeba paliva

m_n – hmotnost paliva v donáškové nádobě

n_1 – počet nádob za den v letním období

n_2 – počet nádob za den v zimním období

$k_1 = 210$ - počet dní v „letím“ topném období

$k_2 = 155$ - počet dní v „zimním“ topném období (stanoveno na základě konzultace s vesničany)

Hodnoty z tohoto výpočtu budou ověřeny pokusem v letním období: V několika rodinách bude umístěn pytel plný suchého trusu, ze kterého bude odebíráno palivo pro běžnou spotřebu domácnosti. Pytel bude pravidelně vážen a doplňován. Po ukončení pokusu bude spočítána průměrná denní spotřeba paliva pro danou domácnost.

Celkovou produkci palivového trusu potom spočítáme dle vzorce:

$$m_t = 0,1 \times m_z \times 0,25 / 0,8 \text{ [kg]}$$

m_t – hmotnost suchého trusu vyprodukovaného zvířetem m_z za jeden den

m_z – průměrná hmotnost zvířete daného druhu (stanovena odhadem). Pro jaka je m_z rovno 250, pro koně 170 a pro kozu 40 kg.

Koeficienty 0,25 (sušina čerstvého trusu) a 0,8 (sušina trusu pro spalování) byly stanoveny experimentálně.

5 VÝSLEDKY A DISKUSE

5.1 Palivové vlastnosti trusu

Na základě metodiky popsané výše byly ve VÚZT Praha Ruzyně a ve školní laboratoři naměřeny hodnoty palivových vlastností „základních“ – obsah popele a spalné teplo. Orientační hodnoty palivových vlastností „vedlejších“ byly stanoveny v odborné laboratoři při VŠCHT. Následuje statistické zpracování výsledků měření.

5.1.1 Palivové vlastnosti základní

5.1.2 Spalné teplo

Pro zjištění přítomnosti statisticky významného rozdílu mezi jednotlivými skupinami byla použita analýza rozptylu jednoduchého třídění (ANOVA). Byly splněny předpoklady homogenity rozptylů v jednotlivých skupinách (Bartlettův test). Výsledky testu ANOVA byly tyto:

Tab. 2. Spalné teplo - výsledky testu ANOVA

Zdroj	Sum of Squares	Df	Mean Square	F	P-hodnota
Mezi skupinami	39,6552	2	19,8276	8,16	0,0006
Uvnitř skupin	204,207	90	2,43104		
Celkem (Corr.)	243,862	86			

Hodnota testového kritéria ($F=8,16$) překročila kritickou hodnotu, z čehož vyplývá, že na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ existuje statisticky významný rozdíl mezi průměrnými hodnotami skupin. K podrobnějšímu vyhodnocení výsledků byla použita Fisherova metoda nejmenších významných rozdílů.

Tab. 3. Spalné teplo - výsledky testu LSD:

Skupina	Průměrná hodnota [MJ/kg suš.]
Bovidae	17,9985
Tylopoda	19,0560
Equidae	19,5717

Rozdíl	Diference	+/- Limits
Equidae - Tylopoda	0,515731	0,84075
Equidae - Bovidae	*1,57328	0,784843
Tylopoda - Bovidae	*1,05755	0,784843

* označuje statisticky významné rozdíly mezi skupinami.

První testovanou vlastností palivového trusu významnou zejména pro energetickou konverzi technologií přímého spalování bylo **spalné teplo**. Fisherova metoda nejmenších významných rozdílů ukázala přítomnost statisticky významného rozdílu této veličiny mezi skupinami equidae (19,5717 MJ/kg) a bovidae (17,9985 MJ/kg) a mezi skupinami tylopoda (19,0560 MJ/kg) a bovidae (17,9985 MJ/kg). V závorce je uvedena průměrná hodnota veličiny pro danou skupinu.

Hodnoty spalného tepla určily následující pořadí skupin trusu (od nejvyšší hodnoty k hodnotě nejnižší) :

1. Equidae (19,5717 MJ/kg)
2. Tylopoda (19,0560 MJ/kg)
3. Bovidae (17,9985 MJ/kg)

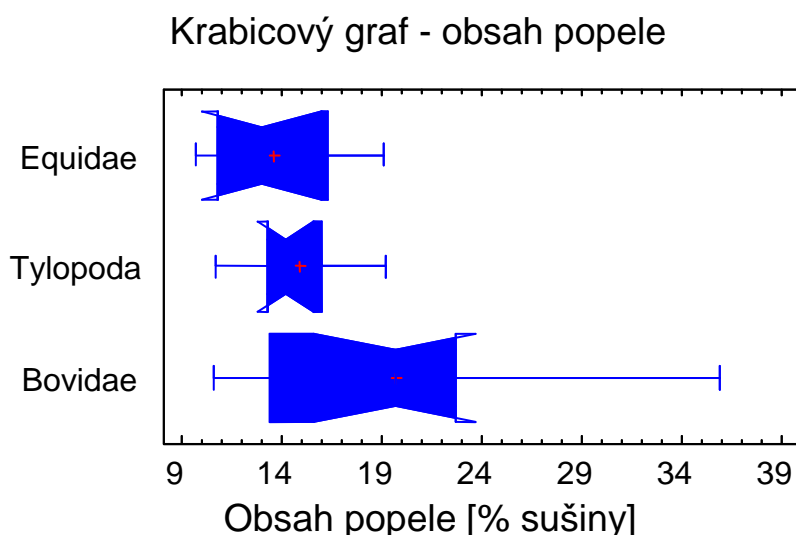
Rhode ve své práci z roku 2007 uvádí následující hodnoty spalného tepla : jak - 13.8441 MJ/kg , ovce - 15.7888 MJ/kg, velbloud - 15.3254 MJ/kg, kůň - 15.2173 MJ/kg [13]. Tyto hodnoty jsou v průměru o 4 MJ/kg nižší než hodnoty, které jsem naměřil já. V uvedené práci není popsána bližší metodika ani počet opakování měření, znám je pouze fakt, že výzkum probíhal v čínské provincii Qinghai, pánev Qaidam, t.j. ve vysoce aridní oblasti (35mm/rok).

Další zdroje uvádějí výhřevnost „koláčů trusu“ nspecifikovaného druhu (jedná se vzhledem k formě pravděpodobně o trus bovidů) s obsahem vody cca 5 % 9,79 MJ/kg [14] , respektive $11,8 \pm 2,0$ MJ/kg [14,19–22].

Existuje mnoho faktorů, které mohly vést k odlišným výsledkům v uvedených pramenech: Odlišná dieta zvířat, doba a místo skladování trusu před provedeným měřením (trus se velmi rychle rozkládá na slunci, při dlouhodobém skladování je napadán plísněmi apod.), příměsi anorganického materiálu, metodika měření, atd.

5.1.3 Obsah popele

Pro zobrazení rozdílů mezi jednotlivými skupinami využít krabicový graf :



Graf 3. Krabicový graf – obsah popele

Tab. 4. Průměrný obsah popele

Skupina	Průměrný obsah popele [% sušiny]
Equidae	13,65
Tylopoda	14,88
Bovidae	19,70

Další testovanou vlastností trusu byl **obsah popelovin**. Skosení hran v krabicovém grafu ukazuje, mezi kterými skupinami existuje významný rozdíl – jedná se o skupiny, u kterých nedochází k překryvu těchto šikmých částí grafu. Významný rozdíl existuje mezi skupinami equidae (13,65 %) – bovidae (19,70 %) a mezi skupinami tylopoda (14,88 %) – bovidae (19,70 %). V závorce uveden podíl popelovin z celkové sušiny.

Literatura uvádí 31,46% obsah popelovin z celkové hmotnosti při 7,86% vlhkosti, t.j. cca 34,14 % sušiny [14]. Vyšší obsah popelovin v literatuře poukazuje na chudší dietu zvířat v aridních oblastech, ale i na možné příměsi (písek, hlína) při odběru měřených vzorků.

5.1.4 Palivové vlastnosti vedlejší

Skupina A - Bovidae

Tab. 5. Palivové vlastnosti – Bovidae

		č.3 Jak domácí ZOO Vyškov	č.4 Skot skotský ZOO Chomutov
voda	% hm.	2,60	5,54
prchavá hořlavina	-, -	67,17	57,79
neprchavá hořlavina	-, -	18,61	14,57
popel	-, -	11,62	22,10
C	-“-	42,87	35,56
H	-“-	5,69	4,85
N	-“-	1,60	2,55
S	-“-	0,18	0,27
O	-“-	35,44	29,13
Cl	-“-	0,14	0,44
spalné teplo	MJ.kg ⁻¹	17,59	14,69
výhřevnost	-, -	16,29	13,50
popel :			
bod měknutí	°C	1110	1200
bod tání	°C	1160	1220
bod tečení	°C	1210	1250

Skupina B – Tylopoda

Tab. 6. Palivové vlastnosti - Tylopoda

		č.5 Velbloud dvouhrbý Vyškov	č.6 Velbloud dvouhrbý Praha
voda	% hm.	2,48	5,90
prchavá hořlavina	„-“	66,55	66,13
neprchavá hořlavina	„-“	14,82	16,89
popel	„-“	16,15	11,08
C	“-“	42,75	41,12
H	“-“	5,86	4,84
N	“-“	1,71	1,62
S	“-“	0,20	0,20
O	“-“	30,85	35,24
Cl	“-“	0,11	0,12
spalné teplo	MJ.kg ⁻¹	17,53	16,90
výhřevnost	„-“	16,20	15,71
popel :			
bod měknutí	°C	1180	1160
bod tání	°C	1220	1195
bod tečení	°C	1260	1210

Skupina C – Equidae

Tab. 7. Palivové vlastnosti - Equidae

		č.7 Kiang Chomutov	č.8 Kiang ZOO Praha
voda	% hm.	4,86	4,62
prchavá hořlavina	-, -	61,89	67,32
neprchavá hořlavina	-, -	11,57	7,99
popel	-, -	21,68	20,07
C	-“-	39,79	41,14
H	-“-	5,48	4,97
N	-“-	1,13	0,90
S	-“-	0,13	0,19
O	-“-	26,93	28,11
Cl	-“-	0,10	0,14
spalné teplo	MJ.kg ⁻¹	15,72	16,31
výhřevnost	-, -	14,41	15,12
popel :			
bod měknutí	°C	1170	1120
bod tání	°C	1200	1160
bod tečení	°C	1230	1170

Orientační měření palivových vlastností vedlejších (viz výše) nevykazovaly velké rozdíly mezi jednotlivými skupinami. Proto jsem všechna měření shrnul do jedné tabulky průměrných hodnot:

Tab. 8. Průměrné hodnoty palivových vlastností vedlejších

Palivová vlastnost		Průměrná hodnota
voda	% hm.	4,322
prchavá hořlavina	-, -	59,99
neprchavá hořlavina	-, -	12,344
C	-, -	37,242
H	-, -	4,684
N	-, -	1,536
S	-, -	0,176
O	-, -	28,696
Cl	-, -	0,17
popel :		
bod měknutí	°C	1130
bod tání	°C	1160
bod tečení	°C	1182

Literatura [14] uvádí podobné hodnoty, viz tabulka:

Tab. 9. Rhode – palivové vlastnosti vedlejší

Palivová vlastnost		Průměrná hodnota
voda	% hm.	7,82
prchavá hořlavina	-, -	51,43
C	-, -	35,76
H	-, -	4,88
N	-, -	1,43
S	-, -	0,13
O	-, -	20,26

5.2 Potenciál pro produkci bioplynu

Následuje skupina vlastností, které jsou rozhodující pro produkci bioplynu.

5.2.1 Hodnota pH

Každému testu bioplynové produkce předcházelo měření **hodnoty pH** již namíchané fermentační dávky (inokulát + testovaný trus). V hodnotách pH nebyl prokázán statisticky významný rozdíl mezi jednotlivými skupinami. Byly naměřeny tyto průměrné hodnoty pH : bovidae – 7,79, tylopoda – 8,29 a equidae – 8,33.

Pro zjištění přítomnosti statisticky významného rozdílu mezi jednotlivými skupinami byla použita analýza rozptylu jednoduchého třídění (ANOVA). Byly splněny předpoklady homogenity rozptylů v jednotlivých skupinách (Bartlettův test). Analýza rozptylu ukázala, že mezi skupinami neexistuje statisticky významný rozdíl na hladině významnosti $\alpha = 0,05$.

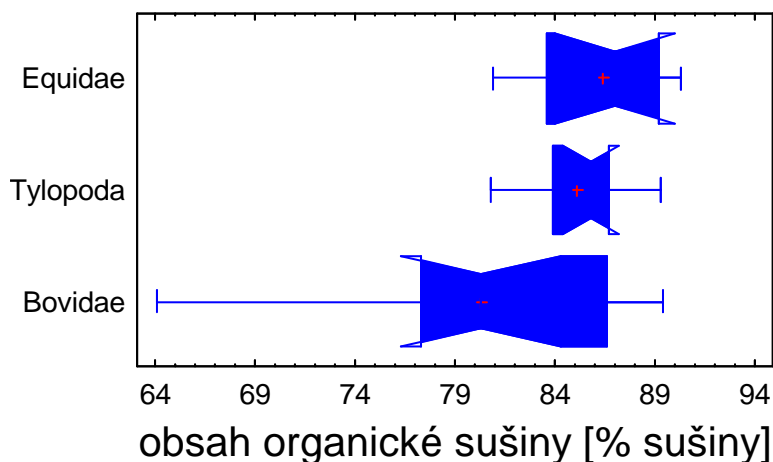
Tab. 10. Průměrné hodnoty pH

Skupina	Průměrná hodnota pH
Bovidae	7,79
Tylopoda	8,29
Equidae	8,33

5.2.2 Obsah organické sušiny

Proporcionální vztah obsahů organické sušiny mezi jednotlivými skupinami nejlépe zobrazuje krabicový graf:

Krabicový graf - obsah organické sušiny



Graf 4. Krabicový graf – obsah organické sušiny

Z grafu je zřejmé, že rozdíl existuje mezi skupinami equidae – bovidae a mezi skupinami tylopoda – bovidae.

Organická sušina je dána rozdílem celkové sušiny a popelovin, její podíly byly spočítány na základě naměřených hodnot popelovin a vyhodnocení bylo následující: Významný rozdíl existuje mezi skupinami equidae (86,35 %) – bovidae (80,29 %) a mezi skupinami tylopoda (85,12 %) – bovidae (80,29 %).

Tab. 11. Průměrný obsah organické sušiny

Skupina	Průměrný obsah organické sušiny [% sušiny]
Bovidae	80,2946
Tylopoda	85,1211
Equidae	86,3562

5.2.3 Produkce bioplynu

Produkce bioplynu byla měřena po 30 dnech trvání fermentačního pokusu v laboratorních podmínkách. Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny metodou ANOVA.

Tab. 12. Obsah bioplynu - ANOVA

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between Groups	62168,4	2	31084,2	4,36	0,0228
Within groups	192384,0	27	7125,34		
Total (Corr.)	254553,0	29			

Hodnota testového kritéria ($F = 4,36$) překročila kritickou hodnotu, z čehož vyplývá, že na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ existuje statisticky významný rozdíl mezi průměrnými hodnotami skupin. K podrobnějšímu vyhodnocení výsledků byla použita Fisherova metoda nejmenších významných rozdílů (LSD):

Tab. 13. Obsah bioplynu - LSD

Skupina	Průměrná Produkce [l/kg sušiny]
Bovidae	196,90
Tylopoda	262,63
Equidae	310,67

Contrast	Difference	+/- Limits
Equidae - Tylopoda	48,0367	74,1593
Equidae – Bovidae	*113,767	79,0541
Tylopoda – Bovidae	65,73	82,1555

* označuje statisticky významný rozdíl

Statisticky významný rozdíl existuje mezi skupinami equidae (310 l/kg sušiny) a bovidae (196 l/kg sušiny). Pořadí skupin trusu dle výtěžnosti bioplynu na kilogram sušiny (od nejvyšší k nejnižší) je následující:

1. Equidae (310 l/kg sušiny)
2. Tylopoda (262,62 l/kg sušiny)
3. Bovidae (196 l/kg sušiny)

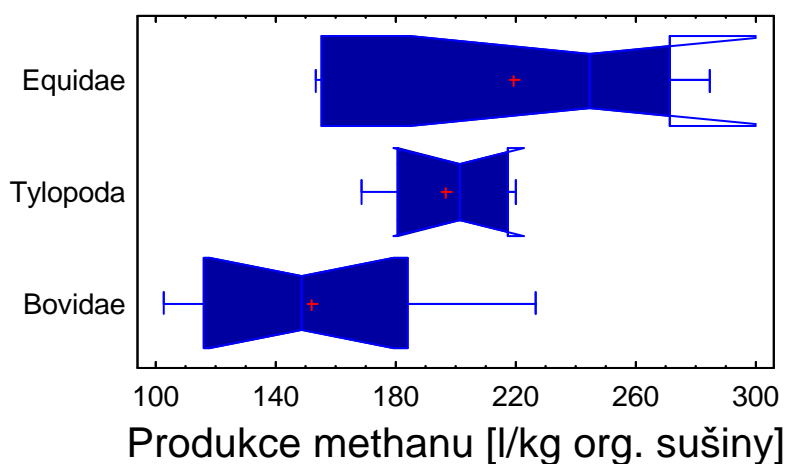
Mandal [23] uvádí výši bioplynové produkce pro velblouda, hovězí dobytek a koně v pořadí odpovídajícím mým výsledkům, zatímco Kalia a Singh [24] dospěli při svých pokusech s různými poměry hovězí/ koňský trus k závěru, že přidavek koňského trusu snižuje produkci bioplynu a je tudíž pro fermentaci méně vhodným materiálem než trus hovězího dobytka. Toto zjištění je v rozporu s mými závěry. Lze jej vysvětlit metodickými problémy indických výzkumníků, kteří také poukazovali na problém separace koňského trusu, jenž zůstával na hladině fermentátu, zatímco kravský trus se usazoval u dna. Docházelo tedy zřejmě k nedostatečnému míchání fermentátu.

Další literatura [16] uvádí produkci 250 l/kg pro hovězí dobytek, respektive 234 l/kg pro hovězí dobytek a 93 l/kg pro ovce. [45]

5.2.4 Produkce methanu

Rozdíly v kumulované produkci methanu mezi jednotlivými skupinami po 30 dnech pokusu zachycuje následující krabicový graf:

Krabicový graf - kumulovaná produkce methanu



Graf 5. Krabicový graf – kumulovaná produkce methanu

Z grafu je patrné, že významný rozdíl existuje mezi skupinami equidae a bovidae.

Byly naměřeny tyto průměrné hodnoty v jednotlivých skupinách:

Tab. 14. Průměrné kumulované produkce methanu

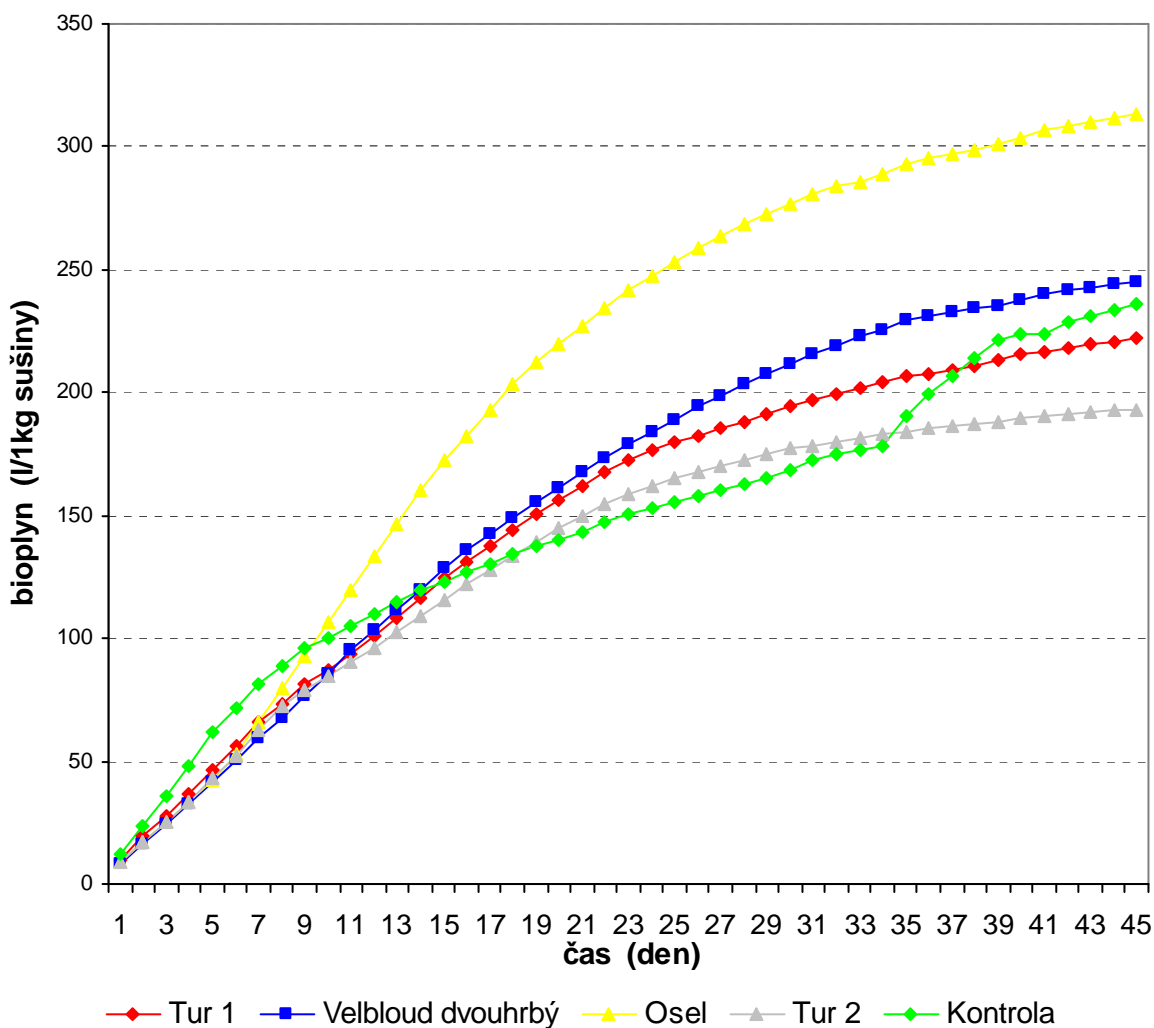
Skupina	Průměrná Produkce [l/kg sušiny]
Equidae	219,6
Tylopoda	196,50
Bovidae	152,05

Pořadí skupin dle množství vyprodukovaného methanu je shodné s pořadím dle vyprodukovaného bioplynu. Viz tabulka 14.

5.2.5 Průběh fermentačního pokusu

Tato kapitola slouží k doplnění statistik fermentačních pokusů – podrobně a názorně, pomocí několika grafů zobrazuje typický průběh jednoho z provedených pokusů. Prvním a zřejmě i nejzajímavějším je graf kumulativní produkce bioplynu.

Kumulativní produkce bioplynu



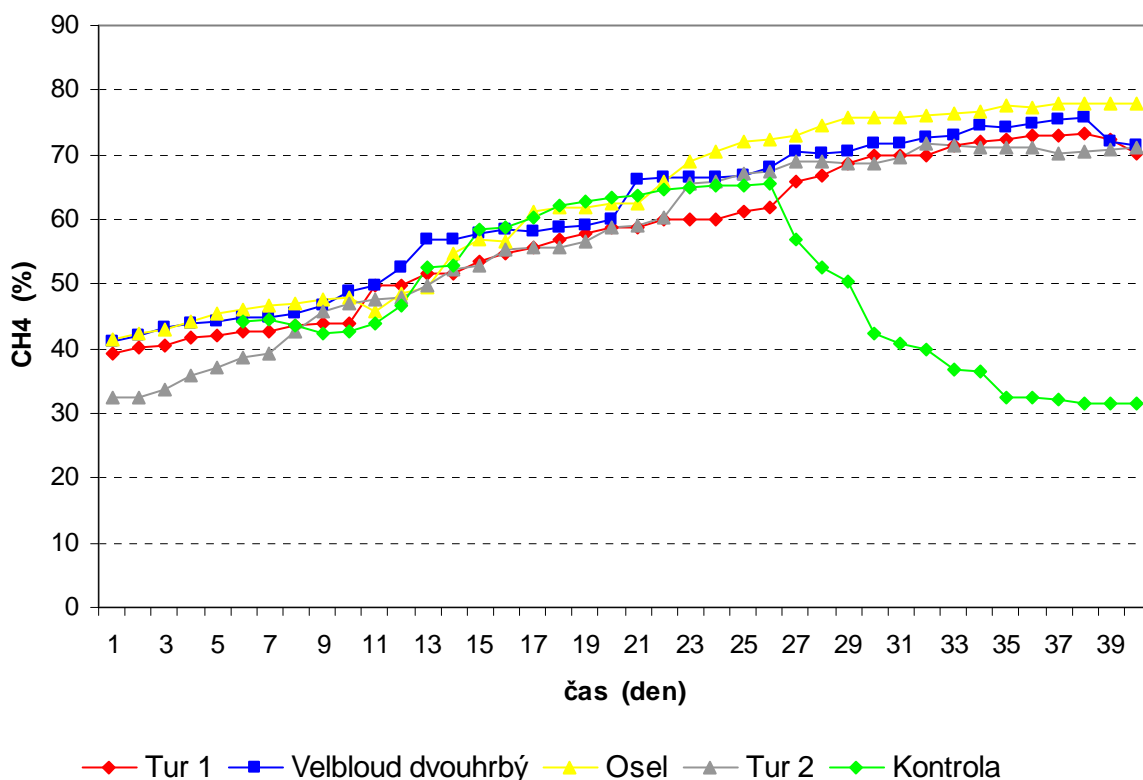
Graf 6. Kumulativní produkce bioplynu

Nejvyšší produkci bioplynu přepočtenou na kg sušiny vykazoval trus osla – 319,1 l/kg kumulované produkce po 45 dnech pokusu. Velbloud se umístil na druhém místě – 245,0 l/kg, dále následovaly 2 různé vzorky trusu tura (235,1 a 193,0 l/kg).

Z grafu je patrná strmě stoupající křivka bioplynové produkce zástupce koňovitých, která naznačuje možné úspěšné pokračování produkce i po 45 dnech pokusu.

Následuje graf znázorňující množství methanu v bioplynu při každodenním měření během celého trvání pokusu. Nejvyšší procentuální podíl je opět u zástupce koňovitých. Methan zde začínal na 40 % a končil těsně pod 80 % po 42 dnech trvání pokusu. U kontrolního vzorku je naopak vidět prudký pokles podílu methanu již po 25 dnech pokusu.

Množství CH₄ v bioplynu

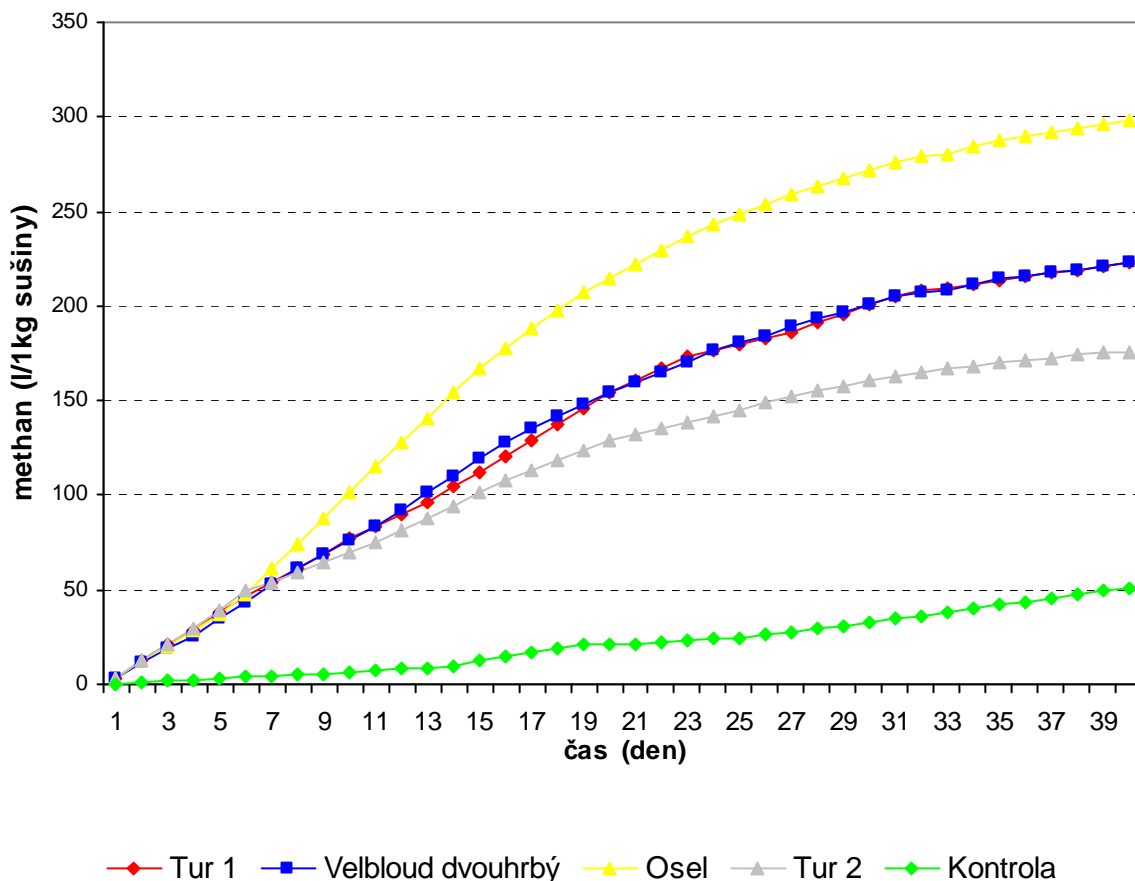


Graf 7. Obsah CH₄ v bioplynu

Vynásobením množství získaného bioplynu a procentuálního podílu methanu získáme absolutní množství methanu. Jeho kumulaci znázorňuje graf 8, který

zároveň nejlépe znázorňuje energetický potenciál trusu při využití technologie anaerobní fermentace. Z grafu jsou patrné markantní rozdíly mezi zástupci jednotlivých skupin v kumulované produkci čistého methanu během 42 dní trvání pokusu.

Kumulativní produkce methanu



Graf 8. Kumulativní produkce methanu

Zástupce koňovitých zde převyšuje zástupce turovitých a velbloudovitých přibližně o jednu třetinu jejich produkce a dosahuje tak kumulované produkce přibližně 300 litrů methanu na kilogram sušiny po 42 dnech trvání pokusu.

5.3 Případová studie - využití palivového trusu v praxi

Případová studie byla provedena ve vysokohorské vesnici Kargyak (4200 m.n.m) ve státě Jammu a Kašmír v SZ Indii.



Obr. 7. Vesnice Kargyak (4200 m.n.m)

Výsledky dotazníkového šetření jsou následující:

Počet stálých obyvatel: 79, z toho 35 dospělých a 44 dětí.

Počet domácích zvířat: 239, z toho 80 jaků, 31 koní, 128 ovcí a koz.

Vaření v domácnostech probíhá třikrát denně každý den. Celková doba vaření je v průměru $3,9 \pm 1,1$ h denně.

Tab. 13. Průměrná spotřeba paliva [kg] (na základě dotazníků a výpočtu)

Roční období	Domácnost/den	Per cap./den	Dom./rok	Per cap. / rok
Letní	14,4 ± 6,0	2,7 ± 1,3	3021,0±1259,6	574,5±280,7
Zimní	26,6 ± 14,8	5,1 ± 3,1	4123,3±2298,0	782,9±482,0
Celkem			7144,3±3533,0	1357,4±756,6

Tab. 14. Průměrná denní spotřeba paliva v letním období [kg] (na základě měření)

	Domácnost/den	Per cap./den	Členů domácnosti
Průměrná domácnost	6,89	1,38	5
Nadprůměrná domácnost	10,08	1,01	10

Celková spotřeba paliva ve vesnici je přibližně 100 020 kg za rok. Zvířata vyprodukují 949,7 kg trusu za den (uvedená váha je po dosušení na 80% sušinu), což odpovídá 346 635,9 kg suchého paliva ročně. Z uvedeného vyplývá, že vesničané pro svojí energetickou potřebu využijí asi 30 % vyprodukovaného trusu. Zbytek zůstává ležet na pastvinách, které jsou takto alespoň mírně hnojeny. Ke hnojení polí využívají vesničané pouze obsah kompostovacích toalet.

Metody získávání paliva jsou v navštívené oblasti celkem 4:

1. Sběrem paliva se zabývají především ženy. Tato činnost jim zabere v průměru 1,5 h denně. Sběr probíhá na pastvinách přilehlých k vesnici. Vysušené koláče trusu ženy přenášejí v proutěných nůších (s kapacitou cca 10kg) na zádech. Trus je odnášen přímo do obydlí a využíván k běžné denní spotřebě, přebytky jsou ukládány na střeše.



Obr. 8. Ženy a jejich nůše s kapacitou na přenesení cca. 10kg jačího trusu

2. Shromažďování trusu na letních putovních pastvinách (doksa). Zde je trus sušen a skladován až do chvíle přesunu tábořiště (jednou za 2 měsíce), kdy jsou zásoby převezeny do domu a uloženy v místnostech nebo na střeše.



Obr. 9. Uložení paliva na putovních pastvinách

3. Na konci zimy je rozřezán a vyjmut ušlapaný kozí a ovčí trus ze stájí. Je umístěn k dosušení na střechu. Poté slouží jako kvalitní palivo nazývané ripa. Tento druh paliva je vesničany ceněn nejvíce – obsahuje i zbytky píce a chlupy zvířat, vyniká nejlepšími vlastnostmi. Je využíván při tuhých mrazech nebo při pálení destilátu z ovsa (araku).
4. Vesničané v nižších horských polohách využívají i techniky zpracování čerstvého trusu. Ten je vměstnán do oválných nádob a vyklopen na slunce. Po vysušení vznikají bochníky trusu stejné velikosti. Tento proces zřejmě velmi zjednodušuje další manipulaci a skladování paliva.

V zimě trus slouží též jako tepelná izolace v neobývaných místnostech domu v horním podlaží, do kterých je přesunut.



Obr. 10. Uložení paliva na střeše domů v letním období

Co se týče kvalitativního rozdělení různých druhů trusu, na první místo řadí vesničané trus jačí, následuje trus ovcí a koz a poslední místo zaujímá trus koňský.

Třicetikilový pytel suchého paliva si vesničané cení v průměru na 55 Rp.

Literatura [30] uvádí podobné výsledky průzkumů preferencí místních obyvatel. Abbé Huc ve své cestopisné práci z roku 1898 se dokonce zmiňuje, že ovčí a kozí trus jsou ceněny nejvíce pro svůj jasný plamen o vysoké teplotě, která umožňuje kout železo.

Saksena [26] ve své práci uvádí denní dobu vaření 4 – 6 h a spotřebu paliva na jeden pokrm 0,3 kg per capita (t.j. cca 0,9 kg per capita/den v letním období), zatímco TERI [27] uvádí denní spotřebu 2,2 – 3,2 kg paliva. Tyto výzkumy se však týkaly níže položených zalesněných oblastí, autoři se shodují, že s rostoucí nadmořskou výškou klesá doba vaření a tedy i spotřeba paliva.

Rozdíly mezi měřenými hodnotami a čísly uvedenými v dotaznících jsou způsobeny jednak neúmyslnými chybnými odhady dotazovaných (tito nikdy neměli důvod přesně měřit spotřebované množství paliva), jednak velkou variabilitou spotřeby různých domácností. Rhode ve svém výzkumu [14] z mongolské náhorní plošiny dospěl k výsledku 1692 kg per capita / rok respektive 22 000 kg pro 13 člennou domácnost/rok a 3162 kg/rok pro jednočlennou domácnost.

6 ZÁVĚR

Biomasa je primárním zdrojem energie, který pokrývá kolem 14 % světové spotřeby a řadí se tak na čtvrté místo za uhlí, ropu a zemní plyn, ale před atomovou energií. Hlavním zdrojem energie je především v rurálních rozvojových oblastech, které například v Indii reprezentují 80 % veškeré spotřeby energie. [15,25] Přímé spalování biomasy je doprovázeno produkcí velkého množství škodlivých látek, které mají negativní dopad na zdraví zejména dětí a žen, trávících dlouhé časové úseky v zakouřených prostorech. [25] Čistší formou energetické konverze je potom anaerobní fermentace odpadů s následným spalováním vzniklého bioplynu [4, 42, 43, 44].

Palivové vlastnosti exkrementů, jakožto specifické formy biopaliv a jejich závislost na příslušnosti zvířete k příbuzensky blízké skupině živočišných druhů doposud nebyly systematicky zkoumány. V práci se podařilo prokázat závislost některých palivových vlastností a potenciálu pro produkci bioplynu na taxonomické skupině zvířete. Byly stanoveny průměrné hodnoty zkoumaných veličin pro dané skupiny zvířat.

První testovanou vlastností palivového trusu významnou zejména pro energetickou konverzi technologií přímého spalování bylo **spalné teplo**. Hodnoty spalného tepla určily následující pořadí skupin trusu (od nejvyšší hodnoty k hodnotě nejnižší) :

4. Equidae (19,5717 MJ/kg)
5. Tylopoda (19,0560 MJ/kg)
6. Bovidae (17,9985 MJ/kg)

Průměrný podíl **popelovin** z celkové sušiny byl nejnižší u skupiny equidae - 13,65 %, následovala skupina tylopoda 14,88 % a nejvýše se umístila skupina bovidae - 19,70 %.

Organická sušina je dána rozdílem celkové sušiny a popelovin, její podíly byly tedy následující: equidae - 86,35 %, tylopoda - 85,12 %, bovidae - 80,29 %.

Průměrná **kumulovaná produkce bioplynu** po 30 dnech pokusu pro jednotlivé skupiny byla následující : nejnižší u skupiny bovidae – 196,9 l/kg sušiny, následovala skupina tylopoda – 262,6 l/kg sušiny, zdaleka nejvíce však vyprodukovala skupina equidae - 310,7 l/kg sušiny. Statisticky významný rozdíl byl prokázán mezi skupinami equidae (310,7 l/kg sušiny) a bovidae (196,9 l/kg sušiny).

Při přepočtu bioplynové produkce na **čistý methan** byly výsledky následující: bovidae – 152,05 l/kg sušiny , tylopoda - 196,50 l/kg sušiny, equidae - 219,63 l/kg sušiny. Pořadí dle množství vyprodukovaného methanu se tedy shodovalo s pořadím v produkci bioplynu. Statisticky významný rozdíl v produkci byl prokázán pouze mezi skupinami equidae a bovidae.

Případová studie ve vysokohorské vesnici Kargyak ukázala následující fakta:

Průměrná spotřeba palivového trusu na osobu v letním období je $2,7 \pm 1,3$ kg per capita denně, respektive $574,5 \pm 280,7$ kg za sezónu. V zimním období se jedná o 5,1 kg per capita za den, respektive $782,9 \pm 482,0$ kg za zimní sezónu. Celková roční spotřeba je tedy $1357,4 \pm 756,6$ kg per capita. Měřená denní spotřeba v letním období se pohybovala v rozmezí 1,01 – 1,38 per capita. Průměrná doba strávená vařením (dle dotazníků) je 3,9h denně.

Osobní preference vesničanů rozdělily trus do tohoto pořadí :

1. Ripa (fonetický přepis označení směsi ovčího a kozího hnoje udusaného ve stájích během zimního období). Ripa obsahuje také zbytky nepožité potravy a chlupy zvířat. Toto z ní činí palivo číslo jedna využívané při speciálních příležitostech jako je pálení araku (alkoholický nápoj z ječmene) nebo při tuhých mrazech. Nejedná se však o čistý trus v pravém slova smyslu.
2. Nejoblíbenějším a v oblasti také nejlépe dostupným palivem jsou koláče trusu turovitých - tedy jaka a jeho místních kříženců.

3. Poslední v žebříčku preferencí obyvatel Kargyaku se umístil trus koňovitých.

Zjištěné preference vesničanů ukázaly, že spalné teplo je bezesporu významným parametrem tuhých biopaliv, není však parametrem nejvýznamnějším. Zatímco spalné teplo řadí trus do pořadí: 1. koňovití, 2. velbloudovití, 3. turovití, vesničané v modelové oblasti uvedli na prvním místě trus jačí (případně trus ovcí a koz smíchaný s dalšími příměsemi), zatímco trus koňovitých se u nich těšil nejmenší oblibě. Vysvětlení je jednoduché: trus jačí po vysušení vytvoří kompaktní „koláče“, trus koňovitých se po vysušení naopak velmi snadno rozpadá na částice nestrávené potravy a představuje tak velice obtížně manipulovatelnou palivovou hmotu. Manipulovatelnost, v tomto případě dána soudržností paliva, je tedy vlastností v praxi nejdůležitější, převažující nad relativně malým rozdílem ve výhřevnosti jednotlivých skupin paliva. Pokud by byl využit potenciál trusu pro produkci bioplynu, pravděpodobně by se preference přesunuly směrem k trusu koňskému vzhledem k jeho vyššímu potenciálu pro výnosy methanu.

Výsledky práce mají povahu základního výzkumu a mohou být využity v technicky, přírodovědně i humanitně orientovaných oborech. Praktické využití výsledků může spočívat v jejich uplatnění při plánování a realizaci rozvojových projektů, při aplikaci domácích zařízení na energetickou konverzi exkrementů, ale i u větších průmyslových zařízení s touto funkcí.

7 LITERÁRNÍ ZDROJE

- [1] Tola, J. *Fyzická geografie*. Praha : Fragment, 2005. 96 s. ISBN 80-253-0081-1. S. 52-53.
- [2] Rhode, D. et al. Human Occupation in the Beringian “Mammoth Steppe”: Starved for Fuel or Dung-Burner’s Paradise? *Archeology*, 2003, CRP 20, p. 68-70.
- [3] Mahias M.-C.: Du bon usage de la bouse et des femmes en Inde du Nord, In: *L’Homme*, 1994, tome 34, n°131. pp. 57-75
- [4] Katuwal, H., Bohara A.K. Biogas: A promising renewable technology and its impact on rural households in Nepal, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13 (2009), p. 2668–2674
- [5] McKendry, P.: Energy production from biomass (part 1): overview of biomass, *Bioresource Technology*, 83 (2002), p. 37–46
- [6] Rogner, H.H., Popescu, A. : World Energy Assessment, Energy and the Challenge for Sustainability, UNDP, 2000, p. 31-37
- [7] Fields, S. : Keeping the Home Fires Burning Cleaner: Solid Fuel Use, Health, and the Millennium Development Goals, *Environmental Health Perspective*, 2006 March; 114(3): A178.
- [8] ČSN P CEN/TS 14961 „Tuhá biopaliva – specifikace a třídy paliv“
- [9] Jevič P., Hutla P., Šedivá Z. : Udržitelná výroba a řízení jakosti tuhých biopaliv na bázi agrárních biopoduktů, Metodická příručka Mze ČR, Výzkumný ústav zemědělské techniky, v.v.i., 2008
- [10] Obernberger I., Brunner T., Barnthaler G. :Chemical Properties of Solid Biofuels – Significance and Impact, *Biomass and Bioenergy*, 30, 2006, p. 973 – 982
- [11] Ochodek T., Koloničný J., Janásek P. : Potenciál biomasy, druhy, bilance a vlastností paliv z biomasy, Metodická příručka ke studii, VŠB - Technická univerzita Ostrava, Výzkumné energetické centrum

- [12] Witt, M., Weyer, K., Manning D. : Designing a Clean-Burning, High-Efficiency, Dung-Burning Stove: Lessons in cooking with cow patties, Aprovecho Research Center, February 2006
- [13] Rhode, D. et al. (2007): Yaks, yak Dung, and prehistoric human habitation of the Tibetan Plateau. *Developments in Quaternary Sciences*. 9:205-225.
- [14] Venkataraman, C., Rao M.: Emission Factors of Carbon Monoxide and Size-Resolved Aerosols from Biofuel Combustion, *Environment Science Technology*, 2001, 35, p.: 2100-2107
- [15] Aggarwal, R.K. , Chandel S.S.: Review of Improved Cookstoves Programme in Western Himalayan State of India, *Biomass and Bioenergy*, 27 (2004) p.: 131 – 144
- [16] Kára, J. et al. Výroba a využití bioplynu v zemědělství. VÚZT, v.v.i. ISBN 978-80-86884-28-8. 11. 2008.
- [17] Rousová, B., Possibilities of bio-gas production in small scale reactors in Ucayali region, Peru, Bachelor thesis, Praha: Česká zemědělská univerzita, ITS, 2005.
- [18] Jeroch, H. et al., Základy výživy a krmení hospodářských zvířat, vědecká monografie, České Budějovice: Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Zemědělská fakulta, 2006, ISBN 80-7040-873-1
- [19] Joshi, V., C. Venkataraman, and D. R. Ahuja (1989): Emissions from burning biofuels in metal cookstoves, *Environ. Manage.*, 13, 763– 772.
- [20] Kandpal, J. B., R. C. Maheshwari, and T. C. Kandpal (1995), Indoor air pollution from combustion of wood and dung-cake and their processed fuels in domestic cookstoves, *Energy Convers. Manage.*, 36, 1073– 1079.
- [21] Ravindranath, N. H., and J. Ramakrishna (1997), Energy options for cooking in India, *Energy Policy*, 25, 63– 75.
- [22] Smith, K. R., et al. (2000), Greenhouse gases from small-scale combustion

devices in developing countries: Phase IIA, Household stoves in India, Rep. EPA-600/R-00-052, 89 pp., Off. of Res. and Dev., U.S. Environ. Prot. Agency, Washington, D.C.

[23] Mandal, T. , Mandal, N. K. : Comparative study of biogas production from different waste materials, Engineering Technology Group, Birla Institute of Technology and Science. Pilani 333 031,Rajasthan, India. 1995.

[24] Kalia, A.. K., Singh S.P. : Horse dung as a partial substitute for cattle dung for operating family size biogas plants in a hilly region, Department of Agricultural Engineering, Himachal Pradesh Agricultural University, Palampur, 176062 H. P., India. 1997.

[25] DE KONING, H. W., SMITH, K. R.,LAST, J.M.: Biomass fuel combustion and health, Bulletin ofthe WorldHealth Organization, 63 (1): 11 – 26.1985.

[26] SUMEETS, A., RAKESH R., : Time allocation and fuel usage in three villages of the Gharwal Himalaya, India, Mountain Reseach and Development. 15, no. 1, PP. 57-67. 1995

[27] Tata Energy Research Institute (TERI). Study of Energy Use and Environmental Effects in the Garhwal Region of the Central Himalaya and an Action Plan for Mitigation. TERI, New Delhi, India. 1991.

[28] Winterhalder, B., Larsen, R., Thomas, R.B. 1974. Dung as an essential resource in a highland peruvian community. Human Ecology 2, 89–104.

[29] Wright, M., 1992. Le Bois De Vache II: This chip's for you too. In: Foster, J., Harrison, D. (Eds.), Alberta: Studies in the Arts and Sciences 3. The University of Alberta Press, pp. 225–244.

[30] Huc, E.R., 1898. Travels in Tartary, Thibet, and China, during the years 1844-5-6. Translated by W. Hazlitt. Reprint of 1852 Edition. Open Court Publishing Co.,Chicago. In Rhode, D. et al. (2007): Yaks, yak Dung, and prehistoric human habitation of the Tibetan Plateau. Developments in Quaternary Sciences. 9:205-225.

[31] U. Stor et al.: Biogas plants in Animal Husbandry .GTZ, 153 p. 1989.

- [32] Lichtman, L. J. et al.: Biogas Systems in India, Volunteers in Technical Assistance, Arlington, Virginia, USA. 1983
- [33] Technická norma: ČSN P CEN/TS 14778-1, 83 8211: Tuhá biopaliva – Vzorkování – Část 1: Metody vzorkování a ČSN P CEN/TS 14780, 83 8213: Tuhá biopaliva – Metody přípravy vzorku
- [34] Technická norma: ČSN P CEN/TS 14774-2, 83 8220, Tuhá biopaliva - Metody stanovení obsahu vody - Metoda sušení v sušárně - Část 2: Celková voda - Zjednodušená metoda
- [35] Technická norma: ČSN P CEN/TS 14775, 83 8210: Tuhá biopaliva - Metody stanovení obsahu popela
- [36] Technická norma: ČSN P CEN/TS 14918, 83 8214: Tuhá biopaliva – Metoda stanovení spalného tepla
- [37] Technická norma: ČSN P CEN/TS 15290, 83 8223: Tuhá biopaliva – Stanovení obsahu hlavních prvků
- [38] Technická norma: ČSN P CEN/TS 15148, 83 8222: Tuhá biopaliva – Metoda stanovení obsahu prchavé hořlaviny
- [39] Technická norma: ČSN P CEN/TS 15370-1, 83 8227: Tuhá biopaliva – Metoda pro stanovení teploty tání popela – část 1: Metoda stanovení charakteristických teplot
- [40] Uživatelská příručka kalorimetru MS 10 A.
- [41] ČSN P CEN/TS 15289, 83 8226: Tuhá biopaliva – Stanovení celkového obsahu síry a chloru
- [42] Omer AM, Fadalla Y. Biogas energy technology in Sudan. *Renewable Energy* 2003;28:499–507.
- [43] Prasertsan S, Sajjakulnukit B. Biomass and biogas energy in Thailand: potential, opportunity and barriers. *Renewable Energy* 2006;31:599–610.
- [44] Yu L, Yaoqia K, Ningshenga H, Zhifenga W, Lianzhonga X. Popularizing

household-scale biogas digesters for rural sustainable energy development and greenhouse gas mitigation. *Renewable Energy* 2008;33:2027–35

[45] S. S. Kanwar , A. K. Kalia. Anaerobic fermentation of sheep droppings for biogas production *World Journal of Microbiology and Biotechnology* Volume 9, Number 2 (1993), 174-175