

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

Přírodovědecká fakulta

Ústav pro životní prostředí



**MODELOVÁ OPTIMALIZACE PROVOZU BIOPLYNOVÉ STANICE
PO OVĚŘOVACÍCH FÁZÍCH PROVOZU**

**MODEL OPTIMIZING OF THE BIOGAS PLANT OPERATION AFTER
VERIFICATION PHASES OF THE OPERATION**

Diplomová práce

Bc. David Raška

Školitel: Ing. Luboš Matějček, Dr.

Srpen 2015, Praha

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a informací, na něž odkazuji. Svoluji k jejímu zapůjčení s tím, že veškeré (i přejaté) informace budou řádně citovány. Rovněž prohlašuji, že předložená diplomová práce je totožná s elektronickou verzí vloženou do SIS.

V Praze dne 14. 8. 2015.

Bc. David Raška

Poděkování:

Rád bych zde poděkoval všem osobám, které mi pomáhaly a podporovaly mě při řešení této práce. Jmenovitě děkuji panu Karlu Srnovi a panu Ing. Josefu Sedláčkovi z bioplynové stanice Úpice za velmi vstřícný přístup a konzultace ohledně mého obeznámení s problematikou svého pracoviště. Dále děkuji za podporu, rady, věcné připomínky a laskavý přístup Mgr. Janu Hanzelkovi, Mgr. Jaroslavu Kuklovi, Mgr. Ing. Pavlu Horákovi, Ing. Milanu Burdovi a svému školiteli Ing. Luboši Matějíčkovi, Dr.

Zvláštní poděkování patří celé mé rodině za její nekončící trpělivost a nenahraditelnou podporu za celou dobu mého studia.

Abstrakt:

Bioplynové stanice jsou zařízení zpracovávající biomasu za účelem produkce bioplynu, který je při správném řízení anaerobního procesu hodnotným energetickým zdrojem. V České republice zatím převládají hlavně zemědělské bioplynové stanice.

Tato práce je zaměřena na vyhodnocování dat získaných z konkrétní bioplynové stanice, která se nachází v obci Úpice. Tato stanice zpracovává biologicky rozložitelné odpady. Data jsou posuzována kvalitativně, pomocí shlukové analýzy s využitím statistického programu R a též i navrženým lineárním regresním modelem v prostředí programu Matlab.

Získané poznatky byly využity k návrhu několika opatření pro provoz bioplynové stanice a k vytvoření modelu nelineární regrese, který může být dále rozvíjen.

Klíčová slova:

Bioplyn, stanice, anaerobní, fermentace, biologický, odpad, datová analýza, diferenciální model

Abstract:

Biogasplants are installations for converting of biomass to produce biogas, which is a valuable energy source if a proper management of an anaerobic process is kept. In the Czech Republic are mainly agricultural biogas plants.

This work is focused on evaluation of data obtained from a specific biogas plant, which is located in the town Úpice. This plant processes biodegradable waste. Data are evaluated qualitatively, also with use of cluster analysis using statistical program R as well as by a proposed linear regression models in Matlab software.

Results were applied for suggestions of several measures for the management of biogas plant and for creation of non-linear regression model, which can be further developed.

Keywords:

Biogas, plant, anaerobic, fermentation, biodegradable, waste, data analysis, differential model

Obsah

1	Úvod	7
1.1	Charakteristika bioplynu	8
1.1.1	Majoritní složky	9
1.1.2	Minoritní složky	11
1.2	Výroba bioplynu	14
1.2.1	Fáze anaerobní fermentace.....	15
1.2.2	Důležité faktory anaerobního procesu	16
1.2.3	Vliv charakteru substrátu na výrobu bioplynu	17
1.3	Bioplynové stanicev České republice.....	19
1.4	Bioplynová fermentační stanice Úpice	20
1.4.1	Technický popis stanice a provoz	22
1.4.2	Popis vstupních surovin	26
1.5	Cíle práce	28
2	Metodika	29
2.1	Základní předpoklady pro použité analýzy	29
2.2	Odhad výtěžnosti bioplynu z kalu ČOV	31
2.3	Výpočet koeficientů výtěžnosti bioplynu.....	32
2.4	Metodika pro shlukovou analýzu	37
3	Výsledky.....	39
3.1	Výsledky kvalitativního zhodnocení dat	39
3.2	Výsledky shlukové analýzy	46
3.3	Porovnání průměrných hodnot v rámci shluků a výsledkyTukey - Kramerova testu	48
4	Diskuze	54
4.1	Diskuze k užití korekci.....	55
4.2	Diskuze k výsledkům výpočtu koeficientů výtěžnosti bioplynu	55
4.3	Diskuze výsledků shlukové analýzy.....	58
5	Závěr.....	60
6	Seznam literatury.....	62

1 Úvod

Ačkoliv se zatím bioplyn neprosadil tak jako jiné konvenční zdroje energie, charakter jeho výroby ho zatím činí surovinově neomezeným zdrojem pro budoucnost. Bioplyn má své místo v dnešních změnách struktury produkce energie, jelikož může být využit jako zdroj elektrické energie i tepla (Da Costa Gomez 2013). Vzhledem k současnému trendu, který se stále více zaměřuje na alternativní zdroje energie, má bioplynové stanice také potenciál při regulaci energetické sítě. Obnovitelné zdroje energie jako jsou větrné a solární elektrárny semohou projevit nestálým výkonem, který by mohl být vyvažován i pomocí energie získané z bioplynu (Hochloff a Braun 2014). Snížení emisí oxidu uhličitého o 50 % oproti roku 2000 do roku 2050 je v plánu Organizace pro hospodářskou spolupráci a rozvoj (OECD), jejímž členem je od 21. prosince roku 1995 i Česká republika. K tomu by měly pomoci obnovitelné zdroje energie, ke kterým bioplyn produkovaný z biologicky rozložitelných odpadů patří (IEA 2013), (Mata-Alvarez et al. 2000).

První technologie biometanizace vznikly na začátku 20. století. Jejich vznik má původ v postupech čištění splaškových a odpadních vod. Skutečný systém využívající anaerobní digesci vznikl roku 1910 v Anglii, ale ještě předtím byla uvedena do provozu v roce 1907 v Německu tzv. emšerská studna, schopná jímání bioplynu vznikajícího ze splaškových vod, vyvinutá K. Imhoffem (Dohányos 1998). V dalších letech se technologie rozvíjela pro stabilizaci čistírenských kalů. Bioplyn byl využíván především pro vlastní provoz vytápěných reaktorů a posléze i k vytápění budov čistíren. Kolem konce 20. let minulého století se bioplyn objevuje i jako pohon u dopravních prostředků pod názvem „čistírenský plyn“. Byl využíván především městskými službami (Straka a Dohányos 2006).

V druhé polovině 20. století se technologie výroby bioplynu dále rozvíjela a testovaly se různé substráty pro anaerobní fermentaci, včetně tuhých biologicky rozložitelných materiálů. Rovněž se začaly vyvíjet biometanizační reaktory zaměřené na energetické účely. Zároveň s tím se pěstovaly plodiny určené pro výrobu bioplynu anaerobními technologiemi. V současné době je výrobě bioplynu věnována velká pozornost (Straka a Dohányos 2006).

Tato práce je zaměřena na produkci reaktorového bioplynu v konkrétní bioplynové stanici (BPS) v obci Úpice. Stanice zpracovává vytríděné biologicky rozložitelné odpady (BRO), zejm. odpady ze zemědělství, stravoven, potravinářského průmyslu, městské zeleně a z městské čistírny odpadních vod, které by se musely jinak ukládat na skládky či spalovat. Dalším hodnotným produktem z fermentovaného BRO je, kromě energie dané spálením bioplynu i digestát, který lze využít jako hnojivo v zemědělství.

1.1 Charakteristika bioplynu

Bioplyn je v širším pojetí označení pro plyny biologického původu, či jejich směsi, vznikající hlavně činností mikroorganismů. Jedná se například o kalový plyn, skládkový, důlní a další plyny. Anaerobně vzniklý bioplyn se tvoří stejnými principy. Procesy vedoucí ke vzniku bioplynu mohou probíhat pod povrchem země, v zaživačím traktu zvířat (typické u přežvýkavců), v litorálu, či ve fermentorech. Pod pojmem bioplyn se dnes v technické praxi rozumí plyná směs vzniklá anaerobní fermentací vlhkých organických substrátů v uměle řízených technologických procesech, ke kterým jsou využívány různá zařízení jako fermentory, digestory nebo například laguny s technikou na zachycování bioplynu (Straka a Dohányos 2006).

Jednoduchou představu o vlastnostech a složení bioplynu nám pomůže vytvořit následující tabulka č. 1. Jednotlivé významné složky vyskytující se v bioplynu jsou popsány v následujících kapitolách.

Tabulka 1: Charakteristické plyny vyskytující se v bioplynu a jejich vlastnosti (Zdroj: Biom.cz)

Charakteristika	Metan CH₄	Oxid uhličitý CO₂	Vodík H₂	Sirovodík H₂S	Bioplyn CH₄ 60 %, CO₂ 40 %
objemový podíl [%]	55 - 70	27 - 47	1	3	100
výhřevnost [MJ.m ⁻³]	35,8	-	10,8	22,8	21,5
zápalná teplota [°C]	650 - 750	-	585	-	650 - 750
hustota [kg.m ⁻³]	0,72	1,98	0,09	1,54	1,2

1.1.1 Majoritní složky

Uměle vytvořený bioplyn je složený optimálně pouze ze dvou hlavních složek. Těmi jsou metan (CH₄) a oxid uhličitý (CO₂). Další plyny přítomné v kvalitním bioplynu jsou pouze marginální s obsahem menším než jedno procento. V závislosti na substrátu a podmínkách prostředí se poměr CH₄ a CO₂ pohybuje v rozmezí obsahu metanu 50 – 80 %. Nejčastější obsah metanu reaktorového plynu tvoří většinou 60 – 65 %, přičemž i změna dvou

procent během procesu poukazuje na změnu v podmínkách fermentace. Již 55% podíl metanu může signalizovat problém ve výrobní technologii s nutností kontroly fermentačního procesu.

Metan

Metan, jako požadovaný hlavní výstup řízené anaerobní fermentace, je hořlavý skleníkový plyn. Ostatní hořlavé složky mají okrajový význam a výhřevnost bioplynu je tedy dána výhradně obsahem metanu (Straka a Dohányos 2006). Metan je bezbarvý plyn bez zápachu s hustotou nižší než vzduch. Jeho výtěžnost závisí na počtu volných valenčních elektronů v atomech látek, které jsou k dispozici v substrátech určených k fermentaci. Nejvýnosnější pro tvorbu metanu jsou lipidy, proteiny a polysacharidy. Pro optimální vznik metanu, vznikajícího díky metanogenním bakteriím, je třeba zajistit správné podmínky anaerobního prostředí, které budou popsány níže. V základním pojetí je hlavním substrátem pro tvorbu metanu vodík a oxid uhličitý. Vhodná je též kyselina octová (CH_3COOH) a další jsou mravenčany – soli kyseliny mravenčí (Dohányos 1998).

Oxid uhličitý

Bezbarvý plyn s vyšší hustotou než vzduch a bez zápachu se může projevat kyselostí na sliznicích. Tento vjem bývá někdy mylně zaměňován za zápach. Je obecně známo, že se jedná o nedýchatelný plyn. Koncentrace hrozící nebezpečím zadušení se pohybují mezi 7 – 10 %.

Oxid uhličitý může upozorňovat svým působením na úniky z plynárenských soustav, například plynovodů vedoucích bioplyn (metan s podílem CO_2). Tento jev se projevuje absencí nebo odumíráním rostlinstva v jejich okolí. Metan oxidující bakterie ve vrchních vrstvách půdy přeměňují unikající metan právě na oxid uhličitý, který je za škody na rostlinách zodpovědný. Negativní vlivy CO_2 se projevují již při koncentraci 5 %. Účinky

nižších koncentrací CO₂ mají často na svědomí trpasličí vzrůst i starších stromů a absenci či horizontální růst centrálního kořene (Christensen et al. 1996).

Pro některé účely nakládání s BP musí být CO₂ z plynu odstraněn. Příkladem může být jeho úprava na kvalitu zemního plynu. V praxi se používají absorpční vypírky pomocí vody pod tlakem díky efektu vyšší rozpustnosti CO₂, H₂S a NH₃ oproti metanu. Efekt jde zintenzivnit snížením teploty a zvýšením tlaku. Tento systém je výhodný díky nízkým nárokům na údržbu. Nevýhodou je vysoká spotřeba vody a energie. Existují i chemické vypírky, které se vyznačují větší selektivitou a rozpustností. Ty jsou však závislé na předchozím odsíření bioplynu. Dále s sebou nesou určitá rizika toxicity a poškozování techniky kvůli korozi (Čermáková a Tenkrát 2010).

1.1.2 Minoritní složky

Přestože se jedná o příměsi nacházející se v bioplynu s velmi malým zastoupením, mohou tyto další složky působit obtíže při jeho využívání. Pokud je v plánu použít bioplyn pro rozvodné sítě zemního plynu nebo jako biopalivo, je odstraňování těchto příměsí nezbytné (Sarperi et al. 2014). Tato kapitola věnuje pozornost některým významnějším minoritním složkám bioplynu a uvádí některé způsoby jejich odstraňování.

Sloučeniny síry

Ačkoliv je síra v bioplynu ve většině případů minoritní složkou, může dojít k situacím, kdy se stává příměsí majoritní, zejm. ve formě sulfanu (H₂S). Síra obsažená v molekulách substrátu je zároveň akceptorem ne vazebných valenčních elektronů, čímž snižuje vlastní tvorbu metanu. Sulfan v produkovaném bioplynu představuje bezpečnostní riziko kvůli své toxicitě. Funguje jako nervový jed a reaguje s kovy v životně důležitých enzymech. Typický je svým

zápachem po zkažených vejcích. Nebezpečný pro člověka je již při koncentraci 20 mg/m^3 při krátkodobé expozici, přičemž vdechnutí sulfanu o koncentraci $1,4 \text{ g/m}^3$ je smrtelné během několika sekund. Nebezpečí tohoto plynu bývá často podceňováno hlavně laickou veřejností. Vzniká ze substrátů s vysokým obsahem proteinů činností sulfátredukujících bakterií, nebo ze substrátů s rozpuštěnými síranovými anionty. Proto bioplyn s vyššími obsahy sulfanu není možné v případech nouze vypouštět přes jednoduché havarijní ventily bez dalších úprav, například pomocí ředícího dmychadla (Straka a Dohányos 2006).

Další sloučeniny síry, které se v bioplynu objevují, jsou thioly (starším výrazem merkaptany), sulfidy a sirouhlík. Sirouhlík se projevuje také jako nervový plyn a je třaskavý. V bioplynu se ale stejně jako ostatní jmenované složky vyskytuje velmi málo (Veselá a Ciahotný 2010).

Přítomnost sirných sloučenin v bioplynu je nežádoucí i kvůli negativním dopadům na technické vybavení spalovacích motorů nebo kogeneračních jednotek. Při spalování BP obsahující vyšší koncentrace sulfanu dochází z důvodu vzniku kyseliny sírové ke korozním procesům a znehodnocování olejů (Maizonnasse et al. 2013).

Tyto negativní účinky sulfanu a thiolů lze eliminovat čištěním BP za pomoci katalytické, adsorpční nebo absorpční technologie. U absorpčních postupů se využívají různé pracovní kapaliny (např. metanol). V případě adsorpčních metod se osvědčují adsorbenty na bázi aktivního uhlí. Zvýšení efektivity působení aktivního uhlí i v prostředí bez kyslíku se docílí pomocí impregnace například jódem, manganistanem draselným, nebo sloučeninami šestimocného chromu (Veselá a Ciahotný 2010). Čištěním bioplynu vhodnou metodou pomocí aktivního uhlí lze získat i kvalitní elementární síru vhodnou pro další využití. Vhodnými metodami eliminace sirných sloučenin z BP je dále také dávkování železitých či železnatých solí nebo zvýšení pH prostředí (Iliuta et al. 2004).

Sloučeniny křemíku

Ze sloučenin křemíku potíže způsobují nízkomolekulární křemičité látky, které mají původ hlavně v organokřemičitých látkách (silany, siloxany) v současnosti hojně využívaných. Výskyt křemíku v bioplynu byl studován v souvislosti se zjišťováním důvodu výskytu nánosů SiO_2 ve spalovacích motorech. Tento efekt bývá příčinou poškození některých typů motorů. Za současného stupně poznání je však ekonomičtější renovace motoru, než čištění křemičitých sloučenin z bioplynu. U nových motorů je vhodnější výběr odolnějších zařízení, která nepodléhají těmto vlivům (Ryckebosch et al. 2011).

Voda

Voda ve formě vodní páry obsažená v BP může vytvářet spolu s CO_2 , NH_3 a H_2S agresivní prostředí způsobující korozi některých technologických zařízení, např. kompresorů, zásobníků plynu či motorů (Ryckebosch et al. 2011). Zvýšené je přitom i riziko zamrzání systémů. Vodní pára obsažená v BP je rovněž nežádoucí pro některé způsoby jeho dalšího využívání, jako v palivových člancích, při úpravě bioplynu na kvalitu zemního plynu, nebo na motorová paliva (Kára et al. 2008).

Ostatní minoritní příměsi

Ostatní látky nalezené v bioplynu tvoří celou řadu různorodých látek. Patří sem jednoduché i složitější uhlovodíky, aminy, furan a jeho deriváty, aldehydy, ketony, karboxylové kyseliny, halogenderiváty, oxid dusný a další. Z pohledu životního prostředí jsou problematické halogenuhlovodíky, ze kterých mohou vznikat nebezpečné a korozivní látky. Výskyt halogenuhlovodíků je problémvětšinou uskládkového bioplynu. BP vznikající v reaktorech by mohl též halogenuhlovodíky obsahovat, pokud by došlo ke kontaminaci zpracovávaných substrátů. V bioplynu se dále může vyskytovat plynný dusík a amoniak.

Dusík se negativně projevuje na výhřevnosti a amoniak je prekurzorem vzniku dusíkatých sloučenin při jeho spalování(Deublein 2010).

1.2 Výroba bioplynu

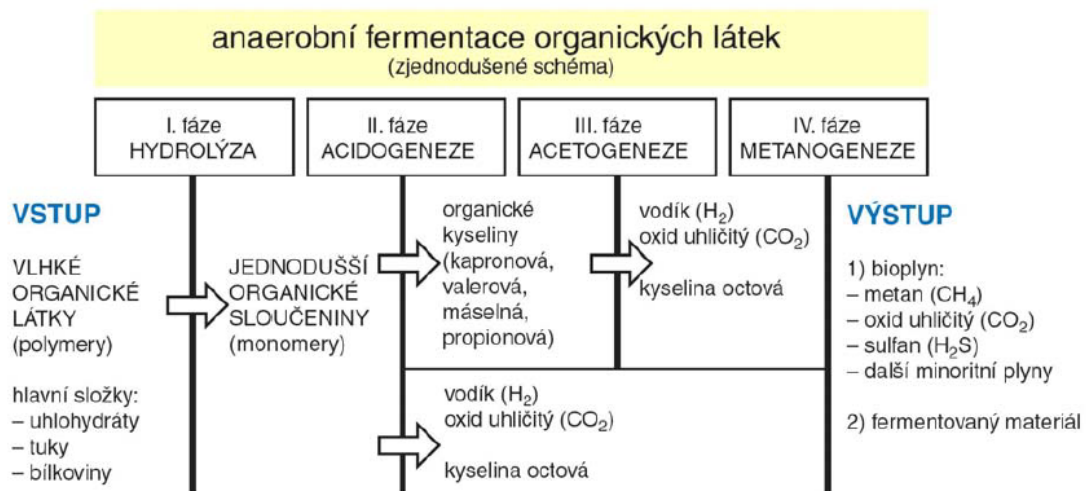
Tvorba bioplynu anaerobní fermentací je složitý vícestupňový proces probíhající v prostředí bez přítomnosti kyslíku. Na vzniku bioplynu se podílí mnoho kmenů a druhů mikroorganismů. Jejich činnost můžeme zjednodušeně rozdělit do čtyř fází. Všechny čtyři fáze musí být udržovány v optimální rovnováze, aby se zabránilo nežádoucím procesům. Ve většině BPS probíhají všechny 4 fáze simultánně. (Kára et al. 2007)

Všechny mikroorganismy vytvářející metan jsou striktně anaerobní a v bezkyslíkatém prostředí jsou schopné rychlého množení. Kyslík je pro ně velmi toxickým plynem a to již při koncentracích menších než 0,001 %. Jedná se o jedny z nejstarších organismů na naší planetě. Vyvíjely se ještě v dobách, kdy zemská atmosféra neobsahovala kyslík. Tyto mikroorganismy z říše *Archaeobakterie* se adaptovaly na extrémní proterozoické prostředí. Speciální skladba buněčné membrány, jejíž fosfolipidy jsou propojované na rozdíl od bakterií a eukaryotních buněk etherovou vazbou, jim umožnily přežít při extrémních výkyvech teploty, salinity a nízkém pH (Straka a Dohányos 2006). Dnes přežívají díky dalším mikroorganismům, se kterými vytvářejí společné útvary. Metanogenní mikroorganismy vykazují také vysokou odolnost vůči tlaku a pouze v nich se vyskytuje koenzym F₄₂₀. Ten funguje jako elektronový přenašeč a účastní se redukce CO₂ na metan a má fluorescenční vlastnosti(Surín et al. 2006).

1.2.1 Fáze anaerobní fermentace

Jako první fáze probíhá tzv. hydrolytická fáze. Dochází při ní k přeměňování makromolekulárních organických látek na nižší monomerní látky. Děje se tak účinkem extracelulárních hydrolytických enzymů. Tato část fermentačního procesu začíná ještě za přítomnosti kyslíku a je nutné, aby substrát obsahoval více jak polovinu hmotnostního podílu vlhkosti. Později po rozvinutí organismů činných v dalších fázích probíhá i tento proces v anaerobním prostředí. Poté následuje acidogeneze. Produkty acidogeneze jsou mastné kyseliny, které vznikají působením acidogenních bakterií. Může zde být přítomný ještě určitý malý podíl kyslíku, avšak během této fáze se již proces stává plně anaerobním. Nastává tak díky fakultativním anaerobním organismům v poměrně krátkém čase. V této fázi vzniká CO_2 , H_2 , a kyselina octová (CH_3COOH). Tyto látky jsou důležité pro produkci metanu. Vznikají také jednodušší organické látky zejm. alkoholy a vyšší organické kyseliny, např. kyselina valerová, kapronová, máselná či propionová. Další fáze je acetogeneze, ve které vzniká činností specializovaných kmenů bakterií především kyselina octová. Někdy je označována jako mezifáze. Dalšími produkty jsou opět CO_2 a H_2 . Závěrečnou fází je metanogeneze. Výsledkem metanogeneze je vznik metanu a oxidu uhličitého pomocí metanogenních bakterií, které jsou specializované právě na zpracovávání kyseliny octové a směsi oxidu uhličitého s vodíkem. Ačkoliv tyto fáze probíhají většinou současně, mají různou reakční rychlost. Průběh metanogenní fáze je asi pětikrát pomalejší, nežli fáze předchozí. Proto je třeba udržovat mezi procesy rovnováhu a přizpůsobit tomu zařízení stanice a množství vsázek (Straka et al. 2006; Kára et al. 2007).

Průběh anaerobní digesce ukazuje zjednodušené schéma (obr. č. 1)



Obrázek 1 Zjednodušené schéma anaerobní digesce (Kára et al. 2007)

1.2.2 Důležité faktory anaerobního procesu

Rozklad organických látek bez přítomnosti kyslíku ovlivňuje řada faktorů, kterémění podmínky pro mikroorganismy a jejich identifikace je tedy zásadní pro celý proces tvorby bioplynu. Těmito hlavními faktory jsou vlhkost a anaerobicita prostředí, intenzita světla a teplota v reaktoru, hodnota pH, přísun výživových látek, kontaktní plocha částic substrátu, přítomnost inhibujících nebo toxických látek, zatížení vyhnívacího prostoru, rovnoměrný přísun substrátu a odplynování substrátu. (Amon et al. 2007)

Metanogenní bakterie potřebují neoxidativní (bezokyslíkaté) prostředí o minimální vlhkosti 50 % s co nejmenší intenzitou světla, neboť světlo inhibuje jejich množení. Hodnota pH by měla být mezi 6,5 – 7,5. Metan se potom za těchto podmínek tvoří v širokém rozmezí teplot od 4 do 90 °C, avšak pro udržení ustáleného stavu by měla být zajištěna konstantní teplota. Musí být zajištěn přísun dusíkatých sloučenin, minerálních látek, stopových

prvků minerálů a zároveň rovnoměrný přísun substrátu do fermentoru tak, aby nedocházelo k jeho nadměrnému zatížení. Také je žádoucí dezintegrovat nerozpustné látky ve vodě za účelem zvětšení jejich povrchu a tedy reakčních ploch, čím se chemické reakce usnadní a zrychlí. (Straka a Dohányos 2006)

Důležitý je rovněž poměr dusíku a uhlíku v užívaných substrátech. Autoři uvádějí, že tento poměr by měl činit 20 – 40 C: N (Fricke et al. 2007). Nežádoucí je přítomnost mastných kyselin a amoniaku, které působí inhibičně na proces ve své neionizované formě (Kwietniewska a Tys 2014).

Mikroorganismy můžeme dělit podle pro ně optimálního rozpětí teplot na tři skupiny. Mikroorganismy, kterým vyhovují teploty pod 20 °C, spadají do skupiny psychrofilních (chladnomilných) organismů. V rozmezí od 25 °C do 40 °C se teplotní oblast nazývá mezofilní a teploty nad 45 °C náleží termofilní oblasti. Není ale úplně jasné, které kmeny bakterií přesně náleží do té které oblasti, avšak obvykle BPS pracují v mezofilní oblasti. Termofilní procesy jsou při tvorbě BP účinnější a zároveň lépe hygienizují zpracovávanou suspenzi včetně digestátu, ovšem jsou nákladnější a zvyšují koncentrace těkavých alifatických karboxylových kyselin ve fugátu. Pro optimální provoz fermentačního procesu je důležitý i vyrovnaný příjem vstupních surovin. Výpadky dodávek často vedou k rozkolísání metanotvorných procesů, někdy mohou vést až k úplnému zastavení produkce bioplynu. (Kára et al. 2007; Straka et al. 2006).

1.2.3 Vliv charakteru substrátu na výrobu bioplynu

Organismy působící při anaerobní fermentaci jsou závislé na přísunu vhodných substrátů. Jako nejlepší substráty pro anaerobní fermentaci fungují hlavně celulózo- a ligninové, ale i jiné

polysacharidy, lipidy a proteiny. Většinou jsou hlavním zdrojem produkce metanu polysacharidy. Patří sem celulóza, hemicelulóza (které je v rostlinách více), škrob, mono- i disacharidy. Nevýhodou polysacharidů jsou vyšší koncentrace oxidu uhličitého ve výsledném bioplynu. U rostlinných substrátů jsou některá další úskalí bránící anaerobům jejich plnému využití. Tím je obsah látek, které procházejí procesem anaerobní digesce téměř nezměněny, nebo mají i inhibiční účinky. Těmito látkami je lignin, dále pak lignany a terpeny. Lignin se nachází hojně v rostlinných odpadech, papírenských odpadech a ve dřevě (Tan et al. 2014).

Lignany a terpeny jsou také obtížně biologicky rozložitelné. V přírodě slouží často jako obranné látky rostlin díky svým baktericidním či fungicidním účinkům. Kvůli těmto vlastnostem fungují při tvorbě bioplynu jako inhibitory. (Straka a Dohányos 2006)

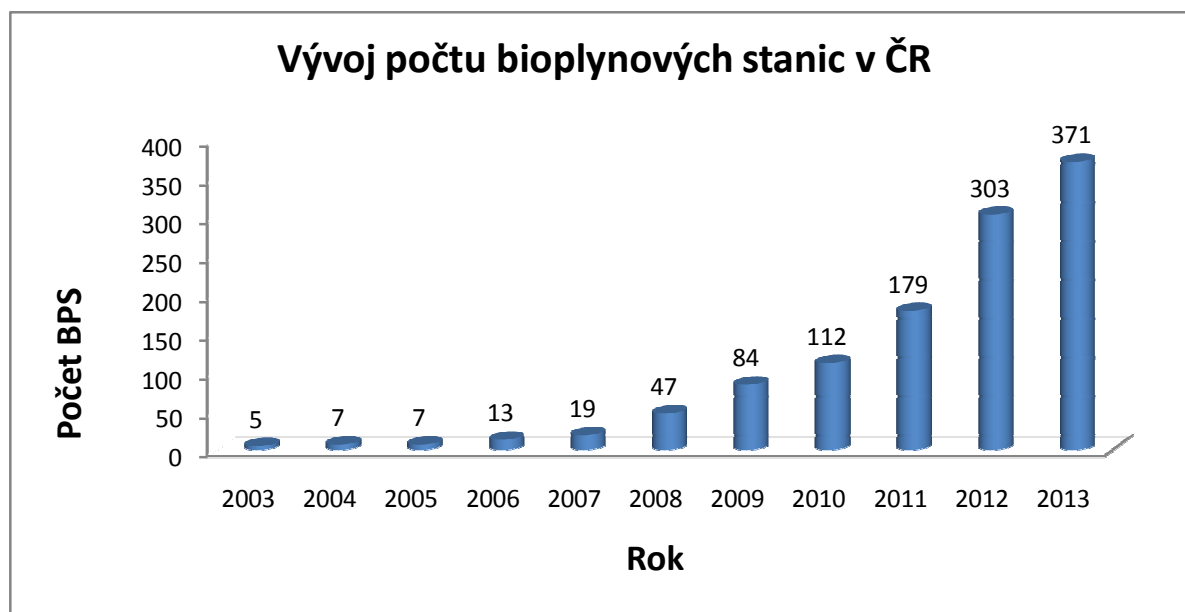
Lipidy jsou přetvářeny na bioplyn s vysokými výtěžky metanu. Obsahují majoritně triglyceridy. Obtíže při anaerobní fermentaci vytváří vlastnost lipidů oddělovat se od vody, přesouvání se do horních vrstev k hladině a mohou zde vytvořit i nežádoucí pění.

Proteiny jsou také dobře využitelné pro výrobu bioplynu, nicméně je třeba brát na vědomí jejich obsah dusíku a síry. Při nevhodných provozních podmínkách se z nich uvolňuje příliš mnoho sloučenin těchto prvků. V případě že příliš vzroste koncentrace amoniakových iontů, nebo se zvýší pH nad vhodné meze, vede to ke vzniku toxického prostředí účinkem volného amoniaku. Vysoký obsah organického dusíku nacházíme například v masokostní moučce (Straka a Dohányos 2006).

Anaerobní společenstva pro svůj zdárný vývoj potřebují celou řadu prvků. Jako zdroj dusíku slouží společenstvům amoniakové ionty. V případě jejich nedostatku jsou schopny vázat i dusík elementární. Nutná k jejich růstu je i poněkud problematická síra. Poměr uhlíku vůči fosforu ve zpracovávaném substrátu by se měl pohybovat mezi 100 – 150 (Hochloff a Braun 2014).

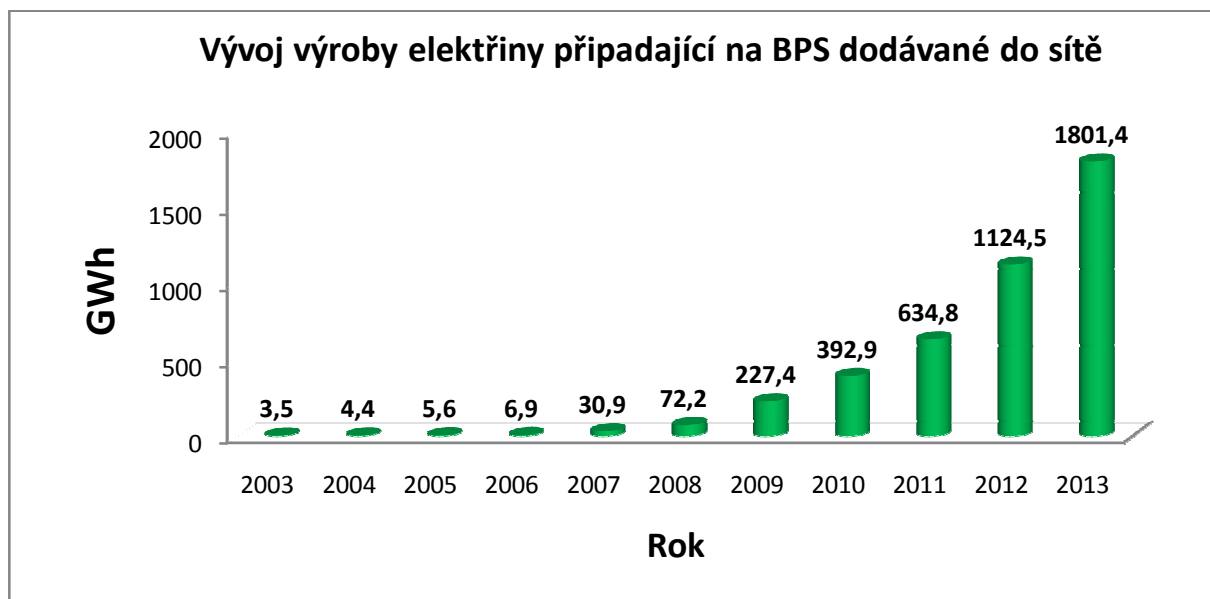
1.3 Bioplynové stanicev České republice

V České republice se BPS stanice začaly rozvíjet intenzivně od roku 2007. Kvůli několika problematickým provozům na sebe také upoutal veřejnou pozornost. V tomto vývoji můžeme i nadále pozorovat prudce rostoucí trend až do současnosti (Grafč.1). Česká bioplynová asociace na svém webu sleduje aktuální stav bioplynových stanic v ČR, kde uvádí k datu 1. 5. 2015 celkem 400 BPS, z čehož je 382 evidovaných jako zemědělské, 11 jako průmyslové a pouze 7 komunálních. Přitom podpora výstavby instalací pro zpracovávání biologicky rozložitelných odpadů kvůli negativním dopadům pro společnost a především kvůli směrnici 1999/31/ES je i jedním z cílů odpadového hospodářství ČR (Zemánek 2010).



Obrázek 2 Graf vývoje počtu bioplynových stanic za roky 2003 až 2013. (MPO 2014)

Současně s počtem BPS roste i jejich výroba elektrické energie. Graf č. 2 přehledně znázorňuje vývoj ve výrobě energie BPS.



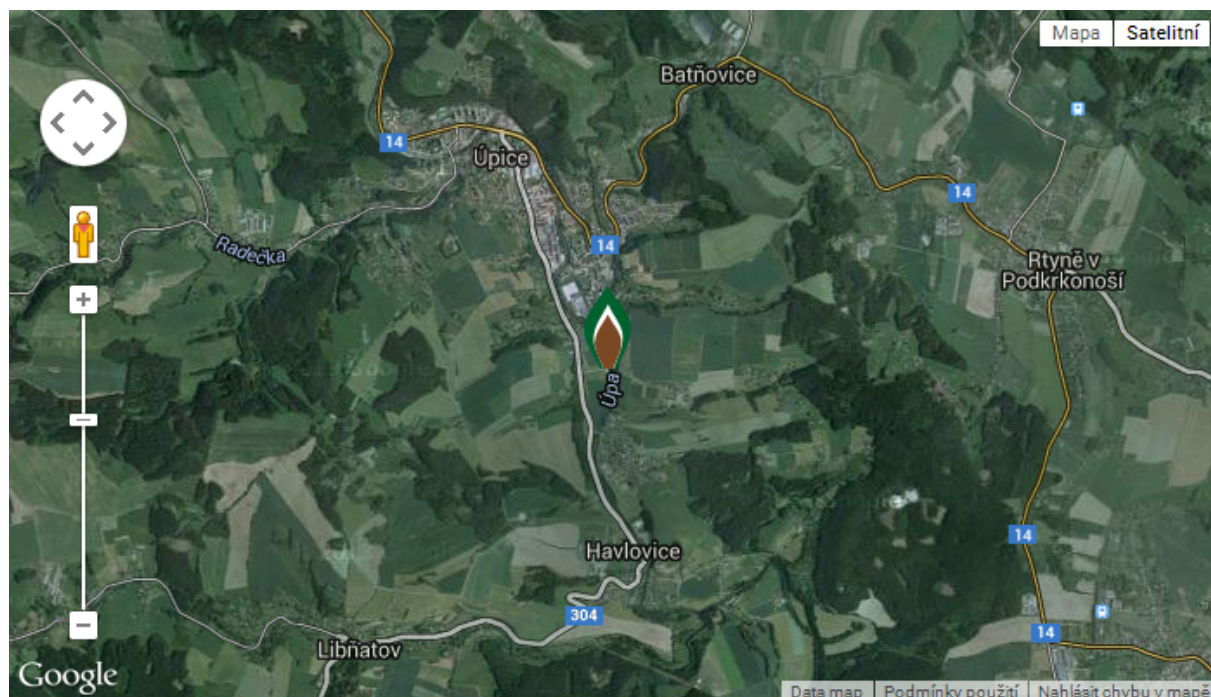
Obrázek 3 Vývoj výroby elektřiny z BPS dodávané do rozvodné sítě. (MPO 2014)

1.4 Bioplynová fermentační stanice Úpice

Na úvod této kapitoly bych chtěl uvést, že veškeré informace o bioplynové stanici v Úpici jsem shromáždil při návštěvách stanice z poskytnutých materiálů a informací mě poskytnutých operátory a personálem BPS Úpice.

Stanice se nachází na jižním okraji města Úpice na pomezí s Havlovicemi v Královéhradeckém kraji (Obrázek č.2). Město mělo k 1. lednu roku 2014 podle Českého statistického úřadu 5768 obyvatel. Stanice byla zřízena městem Úpice především za účelem využívání organických odpadů z městské zeleně a čistírenského kalu z čistírny odpadních vod města Úpice, se kterou sdílí areál. V BPS Úpice se nadále zpracovávají organické odpady z firem, stravoven, zemědělství a od občanů žijících v regionu. Provozovatelem stanice jsou Městské vodovody a kanalizace Úpice (MěVak). BPS Úpice byla vystavěna v roce 2006 a její zkušební provoz byl zahájen počátkem následujícího roku. Po zkušební době byl trvalý

provoz zahájen v červenci roku 2009. Svými parametry se BPS Úpice řadí mezi menší zařízení tohoto typu.



Obrázek 4: Mapa s označenou BPS Úpice (Zdroj: GEODIS Brno, 2015)

Tabulka 2: Technické a provozní parametry BPS Úpice (Zdroj: Provozní řád BPS Úpice)

Kapacita BPS Úpice	cca 8 000 t/rok
Elektrický výkon	150 kW
Tepelný výkon	207 kW
Počet provozních hod. kogenerační jednotky	8 300 h/rok
Vyrobené množství bioplynu	500 000 m ³ /rok
Vyrobené množství elektrické energie	780 000 kWh/rok
Odstředěný substrát 25% sušiny	2 550 t/rok
Produkce bioplynu	54 m ³ /hod
Spotřeba bioplynu	65,2 m ³ /hod
Objem fermentoru	1350 m ³
Teplotní režim fermentace	Hranice mezi mezo/termofiní (42° C)
Projektovaná doba zadržení	28 dní

Během let 2008 – 2010 probíhal projekt výstavby skladovací a manipulační plochy za účelem navýšení kapacity skladování zelených odpadů a také zajištění plochy k uskladňování stabilizovaných produktů fermentačního procesu. Jako cena celkových nákladů je uváděna částka 3,6 mil. Kč. Tímto projektem došlo k navýšení celkové kapacity BPS na 8 000 t/rok. Svoz odpadu pro BPS Úpice zajišťují Technické služby Úpice.

BPS užívá získávanou energii přednostně k vlastnímu provozu a provozu připojené ČOV. Také využívá vznikající teplo pro ohřev vlastních technologií potřebných k provozu. Přebytečnou energii odvádí stanice do distribuční sítě.

1.4.1 Technický popis stanice a provoz

Bioplynová fermentační stanice Úpice je tvořena provozním objektem, homogenizační nádrží, fermentorem se strojovnou, usazovací nádrží, odstředivkou, skladovací plochou, manipulační plochou a administrativním zázemím stanice.

V provozní budově je přijímací objekt - hala s automobilovou mostovou vahou, násypkou pro tuhý odpad a potrubním zařízením pro možnost přijímání tekutých odpadů z cisteren.

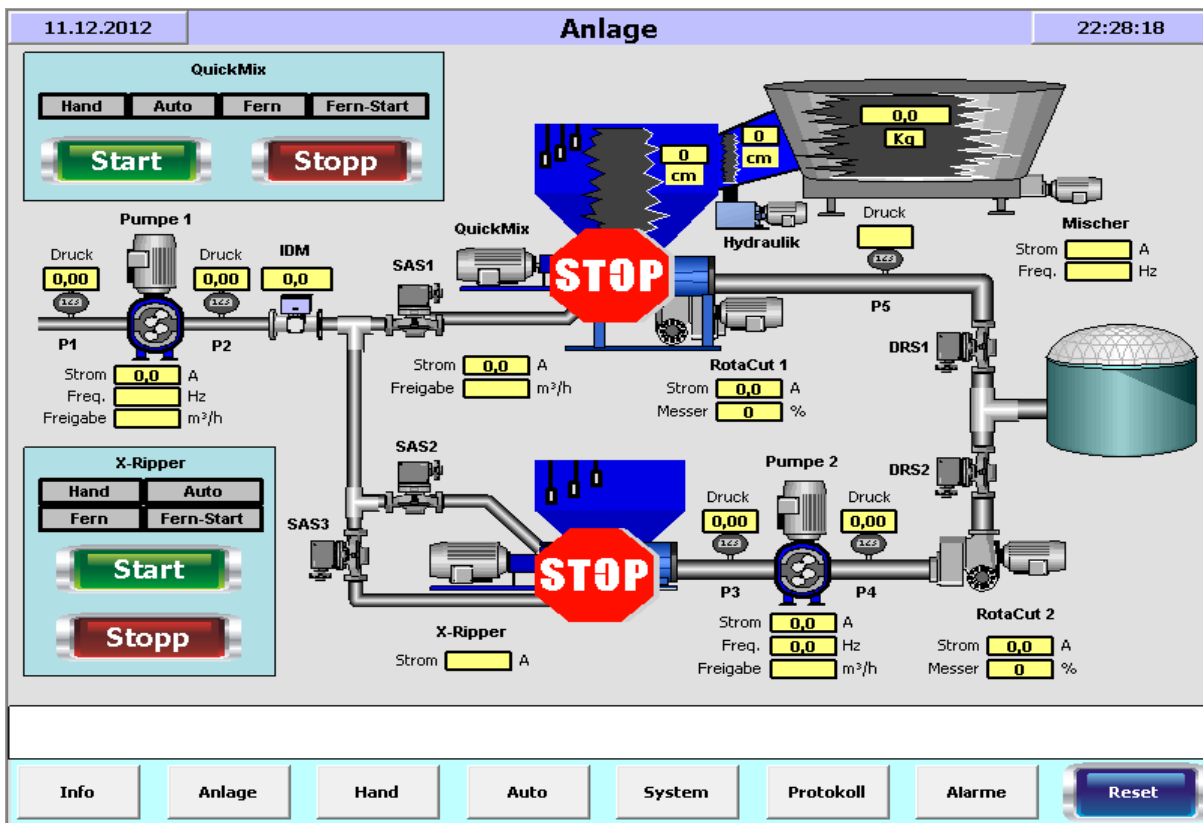
Původní přijímací technologie stanice, která nevyhovovala přijímaným substrátům, byla ke konci roku 2012 optimalizována pomocí nových zařízení. Jedním z problematických substrátů byla dlouhá tráva, která se namotávala na původní šnekové dopravníky. Dalšími byly některé tekutější odpady, neboť je dopravníky nebyly schopné efektivně transportovat. Nevyhovující byl rovněž původní drtič příměsí budoucího substrátu kvůli neschopnosti dostatečného rozdrčení některých zpracovávaných složek na 12 mm kousky. Byl zde přítomen i detektor kovů, který ovšem nebyl schopen odhalit přítomnost kamenitých elementů v přijímaných odpadech. Tím docházelo k poruchám vyžadující nákladné opravy.

Pro vylepšení systému přijímání a úpravy využívaných odpadů byly provedeny mnohé úpravy. Příjem surovin jenyní rozdělen na suchou a mokrou cestu. V současné době se stanice již nepotýká s žádnými zásadními technickými či provozními obtížemi.

Používané odpady jako je senáž, tráva či řezanka, putují přes násypku do směšovacího automatického stroje. V násypce je rovněž nainstalován míchací šnek, který míchá a mísí přijímané suché materiály. Kromě míchání rovněž protrhává například dlouhé traviny. Ve směšovacím stroji se suchá směs mísí s tekutou směsí, která je sem přiváděna z homogenizační nádrže. Směs dále putuje do macerátoru QuickMix, kde probíhá 1. stupeň drcení. Z macerátoru směs postupuje do drtiče RotaCut 1, ve kterém dochází k finálnímu drcení směsi na potřebnou velikost částic do 12 mm. Poté je směs přiváděna do homogenizační nádrže. Tato příjmová cesta má výkon až 6 t v hodině.

Substráty z živočišné výroby (vedlejší produkty živočišné výroby – VŽP) jsou přes vstupní nádrž transportovány ke stroji X-Ripper. Vstupní nádrž má objem 6 m³. V X-Ripperu se VŽP mísí s obsahem homogenizační nádrže a prvotně drtí. Čerpadlo Pumpe 2 dále dopravuje předdrcené VŽP k dalšímu drtiči RotaCut 2. Tam probíhá další drcení na nutnou velikost před tím, než je směs čerpána do homogenizační nádrže. Cesta směsi VŽP je v uzavřeném systému potrubí. Zařízení disponuje strojem na odstraňování kamení, který je nutno kontrolovat a čistit. Výrobce výše uvedených strojů (X-Ripper, Čerpadlo Pumpe 2, RotaCut 2) je firma Vogelsang.

Celé příjmové zařízení je ovládáno poloautomaticky nebo plně automaticky pomocí řídicí jednotky. Tato jednotka se nachází v rozvaděči umístěném uvnitř haly stanice. Následující obrázek č. 3 vyobrazuje schématicky celý výše popsany systém příjmu a chybová hlášení.



Obrázek 5 Schéma nového příjmového objektu BPS Úpice

Po takovéto úpravě míří materiál do homogenizační nádrže o objemu 208 m³ opatřené míchadlem. Homogenizační nádrž má rozměry 7 m v průměru a 5,4 m na výšku. V homogenizační nádrži dochází k promísení veškerých nových složek budoucího substrátu s již přítomným obsahem nádrže. Je zde kalibrován substrát tak, aby ve výsledku obsahoval pouze mezi 8 – 12 % sušiny. K tomu je využíván přímý přívod kalu z ČOV a vyčištěná voda, případně další tekuté odpady s velmi malým obsahem sušiny (škrobová voda apod.). Tyto další tekuté bioodpady jsou sem čerpány přímo z cisteren. Obsah homogenizační nádrže je sledována a promíchávána. Zpracováváný odpad je do nádrže přiváděn ve všední dny. Objem nádrže bývá naplněn z 30 – 60 %, přičemž například maximální využití objemu od poloviny roku 2012 do poloviny roku 2014 nepřesáhlo 70 %. Teoretická doba zadržení v homogenizační nádrži je 9 dnů, ale nikdy se tak dlouhá doba nevyužívá.

Nad homogenizační nádrží je umístěn biofiltr, který má za úkol zabraňovat úniku pachů z technologie. Jeho náplní je zvlhčovaná borka stromů s imobilizovanými mikroorganismy.

Z homogenizační nádrže je směs přečerpávána na hygienizaci. Ta probíhá ve dvou pastérech o objemu 6 m³. V pastérech dochází k ohřevu na 70° C a to po dobu jedné hodiny. Pastéry jsou promíchávány a jsou vybaveny systémem pro rekuperaci tepla, kdy se přenáší teplo z jednoho pastéru na druhý. Denně proudí do fermentoru 5-6 pastérů.

Fermentor objemu 1350 m³ funguje na principu 1 stupňového procesu a je promícháván. V horní části je vybaven plynojemem o kapacitě 350 m³. Doba zadržení je udávána na 37 dní. Hodnoty pH ve fermentoru se pohybují mezi 6,8 až 7,8.

Koloběh látek vstupujících i odcházejících z fermentoru a plynojemu probíhá skrze dvě strojovny, kde je rovněž umístěna odvodňovací jímka. Digestát je odváděn do usazovací nádrže, která je z důvodu prevence úniku pachů zastřešena. Její objem činí 353 m³. V budově, kde se nachází administrativní zázemí stanice a ČOV je umístěna i odstředivka, která odděluje fugát (tekutá složka charakteru odpadní vody o obsahu sušiny > 1 %) od pevné složky, kterou je separát o přibližném obsahu sušiny 25 %. Ten může být dále využíván jako kvalitní hnojivo. Fugát je veden přes flokulační stanici do ČOV.

Plyn zbavený vlhkosti je spalován v kogenerační jednotce umístěné v místnosti s pastéry příjmové haly. Součástí spalovacího procesu je i teplovodní kotel, který slouží k ohřevu vody pro BPS. Funguje rovněž i jako pojistka, kdyby došlo k přebytkům vznikajícího bioplynu. (Sedláček, Srna, ústní sděl., Provozní řád BPS Úpice)

1.4.2 Popis vstupních surovin

Kal z čistírny odpadních vod

Kal pochází z čistírny odpadních vod provozované MěVak. V této práci označován jako „Kal ČOV“.

Mléčný odpad

Tento odpad pochází z mlékárny Hlinsko. Mléčný odpad je tvořen výplachem z mlékárenských technologií, smetanou a mlékem. V této práci označen jako „Mléko“

Kejda a krev

Jedná se o odpady z porážek skotu a vepřů. Hlavní složky jsou krev, kejda a živočišné tuky z masné výroby. V práci označeny jako „Kejda“.

Lapoly

Odpad pocházející z obsahu lapolů, což jsou lapače tuků zabraňující úniku použitých tuků a olejů do kanalizace ze stravoven, restaurací, hotelů, atd. Mohou obsahovat i různé zbytky potravin (Chu a Ng 2000). V kanalizačních a potrubních systémech pak vytváří povlaky, což může vést až k jejich ucpání (Zhu et al. 2011).

Siláž

Pod označením siláž se bere silážovaná tráva a kukuřičná siláž, přičemž travní siláž tvoří odhadem 60 % a kukuřičná siláž 40 %. Někdy se v tomto odpadu vyskytují i odpadní materiály z cukrové řepy, ale pouze v malém množství.

Tráva

Většina tohoto zpracovávaného odpadu je tvořena čerstvě posečenou trávou převážně z prostoru a okolí obce Úpice. Občas vzhledem k venkovnímu skladování dojde k jejímu částečnému rozkladu na vzduchu.

Obsahy bachorů

Odpad pocházejí z trávícího traktu hovězího dobytka, většinou tvořena nestrávenými zbytky krmiva. V analýze je použité označení „Obsah bachor.“.

Brambory

Brambory je označení pro odpad tvořený odpady ze zpracování brambor. Jde tedy o různé odřezky a shnilé brambory, nebo jiné brambory vyloučené z výroby.

V BPS Úpici byl do 17. 4. 2012 rovněž zpracováván tekutý odpad označen jako „škrobová voda“. Tato škrobová voda vzniká oplachováním brambor v továrně pro jejich zpracování.

Odpady z kuchyní

Odpadní materiály pocházející ze stravoven, mohou se svými vlastnostmi výrazně lišit v závislosti na svém původu. Obvykle je tento druh odpadu velmi vhodný k produkci BP, obvykle vyžadují menší dobu zadržení ve fermentoru. Vyskytuje se v nich často optimální poměr C:N stejně jako vysoký podíl bílkovin a tuků, což se odráží na větší měrné výtěžnosti metanu oproti polysacharidům (Mužík et al. 2012). V této práci jsou tyto odpady označovány jako „Kuchyně“.

Biologicky rozložitelný komunální odpad

Tento odpad pochází z oddělených nádob na sběr BRKO v obci Úpice. V analýzách dle původní evidence uveden jako „BIO“.

1.5 Cíle práce

- Kvalitativní posouzení dat z provozu bioplynové stanice Úpice s cílem vyzorování trendů ve zpracovávaných množstvích substrátů a produkce bioplynu.
- Navržení korekce dat zohledňující charakter fungování anaerobní digesce využitelné pro prováděné analýzy a výpočty
- Navrhnout možný postup vyhodnocování produkce bioplynu v závislosti na složení vsázek s využitím vybraného matematického programu
- Pomocí shlukové analýzy posoudit, jaké je vhodné složení vsázek k efektivní produkci bioplynu

2 Metodika

V této práci byla zpracována data získaná během návštěv BPS Úpice za období 1. 1. 2013 až 29. 6. 2014, tedy v době již po vylepšení příjmového objektu. Pro analýzy byly použity denní údaje o množství jednotlivých odpadů vložených do technologie BPS Úpice a denní údaje o vyprodukovaném bioplynu. Kal z ČOV vstupující do procesu je v původní evidenci uváděn v m³, ostatní odpady jsou evidovány v tunách. Data byla podrobena kontrole a poté za přítomnosti operátora stanice byly některé chybné údaje opraveny.

V této práci byly zanedbány údaje o využívané „škrobové vodě“ a vodě používané k ředění obsahu homogenizační nádrže. Hodnoty zpracovávaného kalu uváděné v m³ ČOV byly přepočítány na tony.

Součástí metodiky bylo rovněž vytvoření grafů vývoje trendů jednotlivých složek vsázky a vývoje vznikajícího bioplynu na základě získaných dat. Při vytváření skriptů v programu Matlab byla využívána nápověda programu a vzdělávací materiály zabývající se tímto programem.

2.1 Základní předpoklady pro použité analýzy

Z denních dat byly vytvořeny 14 denní intervaly a to proto, že během víkendů bylo přijímáno vzhledem k ostatním dnům minimum druhů odpadů. Kratší interval (např. týden) by se projevoval výkyvy především v přijímaném množství materiálů, což by znesnadnilo další analýzy. Při vytvoření čtrnáctidenních intervalů se lépe zohlední vliv substrátů již dříve v reaktoru přítomných. Zvolení delšího časového úseku by oproti tomu snížilo využívaný datový základ, což by mohlo vést mimo jiné k porušení předpokladů dále využitých metod.

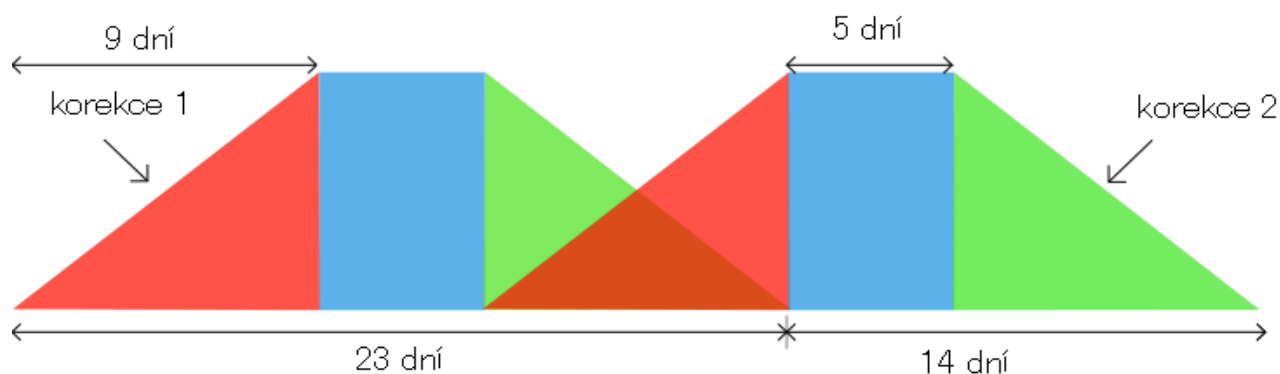
Dále byly za účelem zohlednění látek podílejících se na vzniku bioplynu navrženy dvě korekce zohledňující postupný rozklad materiálů v reaktoru. Korekce jsou zapotřebí dvě. A tokorekce z období předcházející čtrnáctidennímu intervalu, ve kterém byla provedena sumace dat vyprodukovaného bioplynu a právě v tomto intervalu. Dalším předpokladem je v čase konstantní produkce bioplynu z jednotkové hmotnosti substrátu, kvůli užitým postupům, které by jinak musely být mnohem složitější.

Pro celkovou představu prováděných korekcí v této práci můžeme využít schematického obrázku č.6. Obrázek znázorňuje, jakým způsobem jsou započtena množství jednotlivých vsázek v daných obdobích. Nejprve je sečteno množství bioplynu vyprodukovaného během 14 dnů. K tomuto vyprodukovanému množství bioplynu je přiřazen jistý časový úsek, ve kterém metodou ilustrovanou na tomto obrázku jsou sečteny kofermenty a to následovně:

Červeně vyznačená plocha je schematické naznačení množství vsázky, jež byla přítomna ve fermentoru ještě před cílovým 14 denním obdobím, ve kterém je prováděn součet vzniklého bioplynu. Na příklad sečteme-li bioplyn vyprodukovaný 10. 1. až 24. 1., tak k tomuto období musíme přiřadit časový úsek odpovídající vsázkám, za které bylo toto množství bioplynu vyprodukováno. Bioplyn totiž vzniká i z materiálů, jež byly v reaktoru přítomny již před cílovým obdobím (zde 10. 1. až 24. 1.). Předpokládáme totiž, že čerstvě vložené substráty (např. 2 dny před obdobím) se nepodílejí ještě plnou mírou na tvorbě bioplynu vzhledem k povaze metanogeneze.

Předpokládáme, že vsázka vložená 9 dní před sledovaným obdobím se projeví pouze 10 % do sledovaného období, neboť se již projevila 90 % v obdobím předchozím. Vsázka vložená v 8. Dni se projeví 20 % a tak dále, až vsázek vložená den před sledovaným obdobím se projeví 90 % množství vznikajícího bioplynu. Stejným způsobem jsou brána data před

koncem sledovaného období. A tedy vsázka vložena 2 dny před koncem sledovaného období se projeví pouze 20 %, den před koncem období 10 % atd. (vyznačeno zeleně).



Obrázek 6 Grafické znázornění intervalů a na nich prováděných korekcí.

2.2 Odhad výtěžnosti bioplynu z kalu ČOV

Odhad výtěžnosti z kalu ČOV, tak i analýza výtěžnosti bioplynu ze směsí jednotlivých vsázek v jednotlivých obdobích bude vycházet z aproximace provedené lineární regresí. Nejprve jsou vymezeny dva blízké časové intervaly, jež se mohou vzájemně překlývat. Předpokládáme, že je možné odděleně posuzovat vliv kalu a ostatní směsi na tvorbu bioplynu. Dvě časově blízká období mají podobné složení směsi, ale mají rozdílnou hmotnost. Kal necht' v těchto dvou blízkých intervalech má také velmi podobné složení. Pak můžeme kalu přiřadit koeficient výtěžnosti C_{kal} a výtěžnost směsi neobsahující kal označme C_s . Nyní můžeme sestavit soustavu algebraických rovnic o dvou neznámých C_{kal} a C_s .

$$C_{kal} * m_{kal1} + C_s * m_{s1} = V1 \quad (1.1)$$

$$C_{kal} * m_{kal2} + C_s * m_{s2} = V2$$

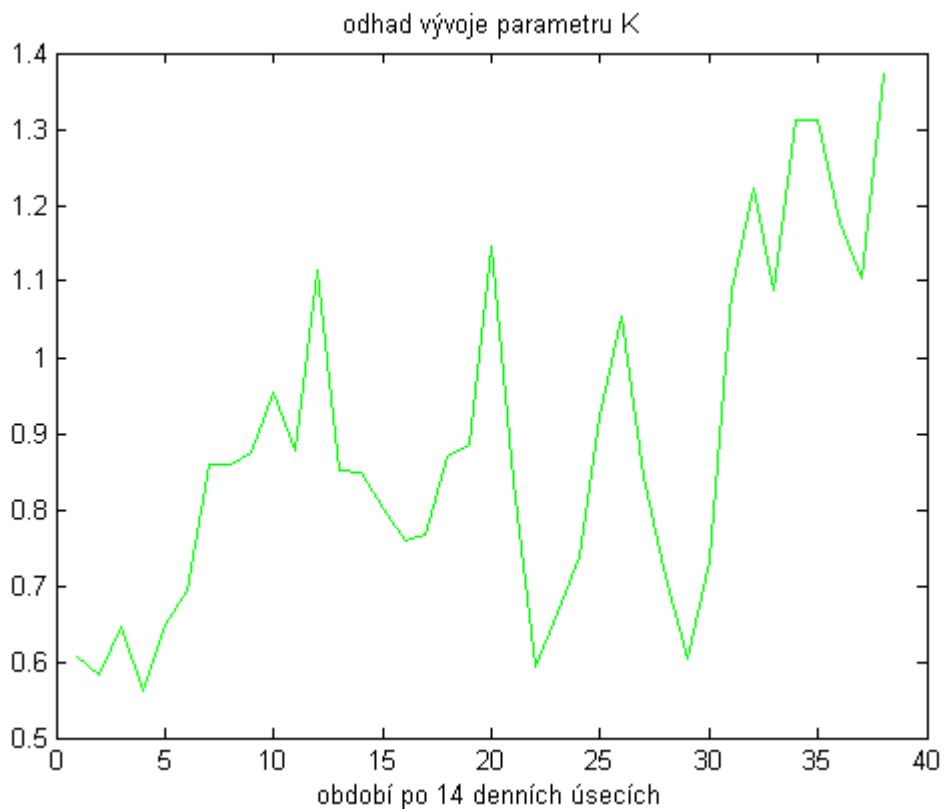
Na pravé straně soustavy rovnic jsou objemy vyprodukovaného bioplynu $V1$ a $V2$, které jsou součtem celkového objemu plynu vzniklého ve zvolených čtrnáctidenních intervalech, které jsou vůči sobě posunuty tak, aby se vzájemně překrývaly. Zvolený překryv zajišťuje, že můžeme předpokládat podobné složení vsázek a tím i podobné probíhající interakce mezi jednotlivými složkami. Tento vzájemný překryv byl zvolen na 9 dní. Pro představu můžeme opět využít obrázku č. 6, kdyby celý interval vybraného období byl posunut vůči předchozímu tak, že by modře vyznačené plošky na sebe navazovaly. Překryv je určen subjektivně. Byl ale vybrán tak, aby složení směsi si bylo podobné (chceme jinou hmotnost a m_{s1} a m_{s2} a zároveň m_{kal1} a m_{kal2} , přičemž považujeme složení směsi s hmotností m_{s1} i m_{s2} za podobné), ale nebyl příliš velký, neboť by mohly vznikat větší nepřesnosti při výpočtu rovnic. Pro získání výsledku alespoň blízkého realitě je potřeba mít dvě odlišné rovnice. Tento postup je využit při vytváření soustavy rovnic pro všechna 14 denní období. Získané hodnoty pro koeficient C_{kal} byly zprůměrovány a tímto způsobem byla získána hodnota popisující množství vznikajícího bioplynu z 1 t kalu ČOV, která je v práci dále využívána. Z tohoto poznatku byl vytvořen graf zobrazující produkci bioplynu vytvářeného směsí ostatních substrátů bez přítomnosti kalu ČOV (Obr. č. 12).

2.3 Výpočet koeficientů výtěžnosti bioplynu

Tento postup je založený na předpokladu, že časový vývoj vyprodukovaného plynu je závislý na jednotlivých koeficientech výtěžností jednotlivých substrátů. Předpokládáme, že se koeficienty výtěžností v čase vyvíjejí. Stále však uvažujeme lineární závislost vývoje bioplynu na hmotnostech jednotlivých složek. Názorně lze tento postup zobrazit v rovnici:

$$V(t) = K(t) * (c_1(t) * m_1(t) \dots c_n(t) * m_n(t)) \quad (1.2)$$

V rovnici (1.2) c_1 až c_n mají význam výtěžností jednotlivých složek směsi, které mají v čase pomalý vývoj a nepříliš mnoho se odlišují od teoretických v literatuře uváděných hodnot výtěžností. Jejich vzájemný poměr je závislý na interakcích, které v dané době probíhaly. Převážná míra interakce je však zachycena koeficientem $K(t)$. Koeficient $K(t)$ nabývá malých hodnot oproti hodnotám výtěžností c a jeho vývoj by měl být rychlejší než koeficientů jednotlivých výtěžností. Index t značí konkrétní časové období.



Obrázek 7 Graf odhadu hodnot parametru $K(t)$

Jistý odhad vývoje parametru $K(t)$ lze získat tak, že se do rovnice (1.2) dosadí teoretické hodnoty výtěžností a poté se vyjádří zmíněný parametr. Obrázek č. 7 znázorňuje

takovýto odhad parametru pro výtěžnosti jednotlivých substrátů s výjimkou kalu ČOV. Parametrem $K(t)$ není korigována hodnota výtěžnosti kalu, jehož hodnota je brána jako konstantní a to o výši prezentovaného odhadu $8,22\text{m}^3/\text{t}$.

V rámci této práce bylo ozkoušeno několik postupů, například postupu využívajícího matice 8×8 . Jednotlivé kroky v těchto postupech však nevedly k přijatelným výsledkům. Z tohoto důvodu byla zvolena metoda, sestavení rovnice pouze ze čtyř odlišných čtrnáctidenních období s průniky dle obrázku č.6, což umožňuje sestavit pouze čtyři rovnice o 8mi neznámých. Zde se omezíme pouze na hledání osmi neznámých koeficientů výtěžnosti, poněvadž úloha s rostoucím počtem neznámých proměnných nabývá na obtížnosti. Z tohoto důvodu byl algoritmus výpočtu upraven tak, že byl využit v této práci prezentovaný odhad výtěžnosti kalu ČOV. V jistých časových obdobích, konkrétně mezi 12. až 20. časovým úsekem, vsázky neobsahovaly ani odpad z mlékáren, ani nebyly zpracovávány kuchyňské odpady. V případě využití odhadu výtěžnosti kalu by musel být celý algoritmus výpočtů primárně pracující s maticí 4×8 , přebudován, aby mohl pracovat s maticí o rozměru 4×7 , tak byl mezi hledané neznámé zařazen právě zmíněný koeficient výtěžnosti kalu ČOV.

Nyní se budeme zabývat, jakým způsobem je možné odhadnout jednotlivé koeficienty výtěžností, na které je kladeno, že jsou blízké teoretickým hodnotám výtěžností převzatých z literatury, a zároveň, aby se výpočty co nejlépe shodovaly s naměřenými hodnotami produkce bioplynu v daném období.

Postup sestavení rovnic a posléze hledání neznámých koeficientů c_i je možné shrnout do následujících bodů.

- Nejprve ve zvolených blízkých časových překrývajících se úsecích byl proveden součet hodnot vyprodukovaného bioplynu. V této práci byl zvolen překryv 5 dní, který je dostatečně malý tak, že lze zanedbat změnu parametrů výtěžnosti bioplynu na

analyzovaném úseku. K těmto časovým intervalům, jež bylo celkově vzato 8, byly přiřazeny hmotnosti jednotlivých komponent vsázek, které byly určeny za pomoci výše uváděných korekcí viz. obrázek č. 6.

- Byly načteny údaje z osmi blízkých časových úseků. Ke každému z tohoto úseku byl vypočten koeficient K . To bylo provedeno prostým vynásobením teoretických výtěžností, které jak předpokládáme, se nebudou příliš lišit od hledaných $c_i(t)$. Jak již bylo řečeno hlavní míru interakce zohledňuje právě koeficient K . Z nalezených těchto osmi koeficientů K jsou vybrány pouze sobě čtyři nejbližší hodnoty. Tyto čtyři hodnoty jsou využity k sestavení soustavy 4x8 podle rovnice 1.2.
- Posledním krokem je řešení této čtveřice rovnic ve smyslu hledání kladných koeficientů c_i tak, aby odchylky od levé strany (tedy produkce bioplynu v daných časových úsecích) byly pokud možno co nejmenší.

Poslední krok bude více rozebrán níže. Je však potřeba zdůraznit, že autor se nesnažil o rigorózní matematický postup, neboť ani nemá k tomuto potřebné vzdělání a tak se jedná spíše o návrh možného postupu, který je možné dále upravovat a rozvíjet.

Rovnice (1.2) je využito při sestavení soustavy čtyř rovnic, což je možné zapsat v maticové podobě (vztah 1.3):

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{1,1} & \cdots & m_{8,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{1,4} & \cdots & m_{8,4} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} C_1 \\ \vdots \\ C_8 \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

Indexem 1 až 4 jsou označeny údaje o produkci bioplynu a hmotnostech substrátů z vybraného prvního až čtvrtého období. Velkými písmeny C_i jsou označeny hledané koeficienty výtěžností z jednotlivých substrátů. Velikost těchto koeficientů zhruba splňuje relaci $C_i \approx K * c_i$. Matice s hmotnostmi jednotlivých substrátů bude dále v textu značena

jako M . Výše uvedená soustava má sice nekonečně mnoho řešení, ale našim cílem je získat pouze kladné hodnoty C_i , a ty, které se neodlišují výrazně od teoretických hodnot výtěžností. To může být v mnoha případech jen přibližné řešení. Možné je postupovat například tak, že namísto soustavy (1.3) s maticí M budeme hledat přibližná řešení dvou soustav s maticemi M_L a M_P , každé o rozměrech 4 x 4. Matice M_L bude obsahovat pouze první čtveřici sloupců matice M , obdobně matice M_P bude sestavena z posledních čtyř sloupců matice M . Samozřejmě je v možnostech sestavení dvojice matic jistá libovůle, výběr sloupců se může dít i jiným způsobem. V prvním kroku je tedy možné přibližně řešit rovnici (1.4) :

$$\begin{pmatrix} m_{1,1} & \cdots & m_{4,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{1,4} & \cdots & m_{4,4} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} C_{L1} \\ \vdots \\ C_{L4} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_4 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} m_{5,1} & \cdots & m_{8,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{5,4} & \cdots & m_{8,4} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} C_{T5} \\ \vdots \\ C_{T8} \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

V rovnici (1.4) jsou koeficienty C_{T5} až C_{T8} teoretické hodnoty výtěžností pronásobeny zjištěným koeficientem K , konkrétně $C_{T5} = K * c_{T5}$, kde c_{T5} představuje teoretickou hodnotu výtěžnosti substrátu o indexu 5. Matice na levé straně rovnice (1.4) označujeme maticí M_L rovnice na pravé straně je maticí M_P .

Nalezené přibližné řešení pro koeficienty výtěžnosti C_{L1} až C_{L4} je možné uplatnit pro hledání dalších koeficientů výtěžností pro složky s indexem 5 až 8, a symbolicky značené C_{P5} až C_{P8} následovně :

$$\begin{pmatrix} m_{5,1} & \cdots & m_{8,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{5,4} & \cdots & m_{8,4} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} C_{P5} \\ \vdots \\ C_{P8} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_4 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} m_{1,1} & \cdots & m_{4,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{1,4} & \cdots & m_{4,4} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} C_{L1} \\ \vdots \\ C_{L4} \end{pmatrix} \quad (1.5)$$

Celkový vektor přibližného řešení, jenž má význam výtěžností pro jednotlivé komponenty vsázek v jistém časovém úseku, má tvar $(C_{L1}, \dots, C_{L4}, C_{P5}, \dots, C_{P8})$. Ještě nebylo zmíněno, jakým způsobem zajistit kladné hodnoty hledaných koeficientů. Postup, který byl užit v rámci této práce, spočíval v nahrazení případných záporných hodnot koeficientů jejich teoretickými hodnotami. Ty byly korigovány koeficientem K . Například pokud by byl koeficient C_{L1} záporný, pak byl nahrazen koeficientem C_{T1} a zbylé koeficienty C_{L2} až C_{L4} , které byly díky záporné hodnotě C_{L1} nadhodnoceny, byly vypočítávány znovu, ale nyní již ze soustavy 3×3 , vycházející ze soustavy (1.5) a to tak, že se ze soustavy vybraly pouze tři rovnice a za neznámou C_{L1} byla dosazena právě hodnota C_{T1} .

2.4 Metodika pro shlukovou analýzu

Shluková analýza byla využita pro zjištění podobnosti vsázek v jednotlivých čtrnáctidenních obdobích. Nejdříve byl určen nejmenší počet shluků vysvětlující co největší míru variability dat grafickým odečtem ze scree diagramu. Scree diagram vzniká pomocí výpočtů počtu shluků pomocí metody kmeans, v tomto případě od jednoho shluku do 15. Při tomto postupu se zaznamenává nejmenší velikost čtverců mezi středem centroidu a polohou čtrnáctidenních období v daném shluku. Takto se pokračuje od prvního až po poslední shluk, přičemž se hodnoty sčítají. Poté se hodnoty vynesou do screediagramu kde se hledá místo, kdy již zřetelně neklesá suma čtverců. Tímto postupem byl počet shluků určen na 4.

Poté byly vypočítány průměrné hodnoty jednotlivých složek substrátu a průměrné hodnoty vzniklého bioplynu pro každý shluk. Následně byly testovány rozdíly průměrů složek

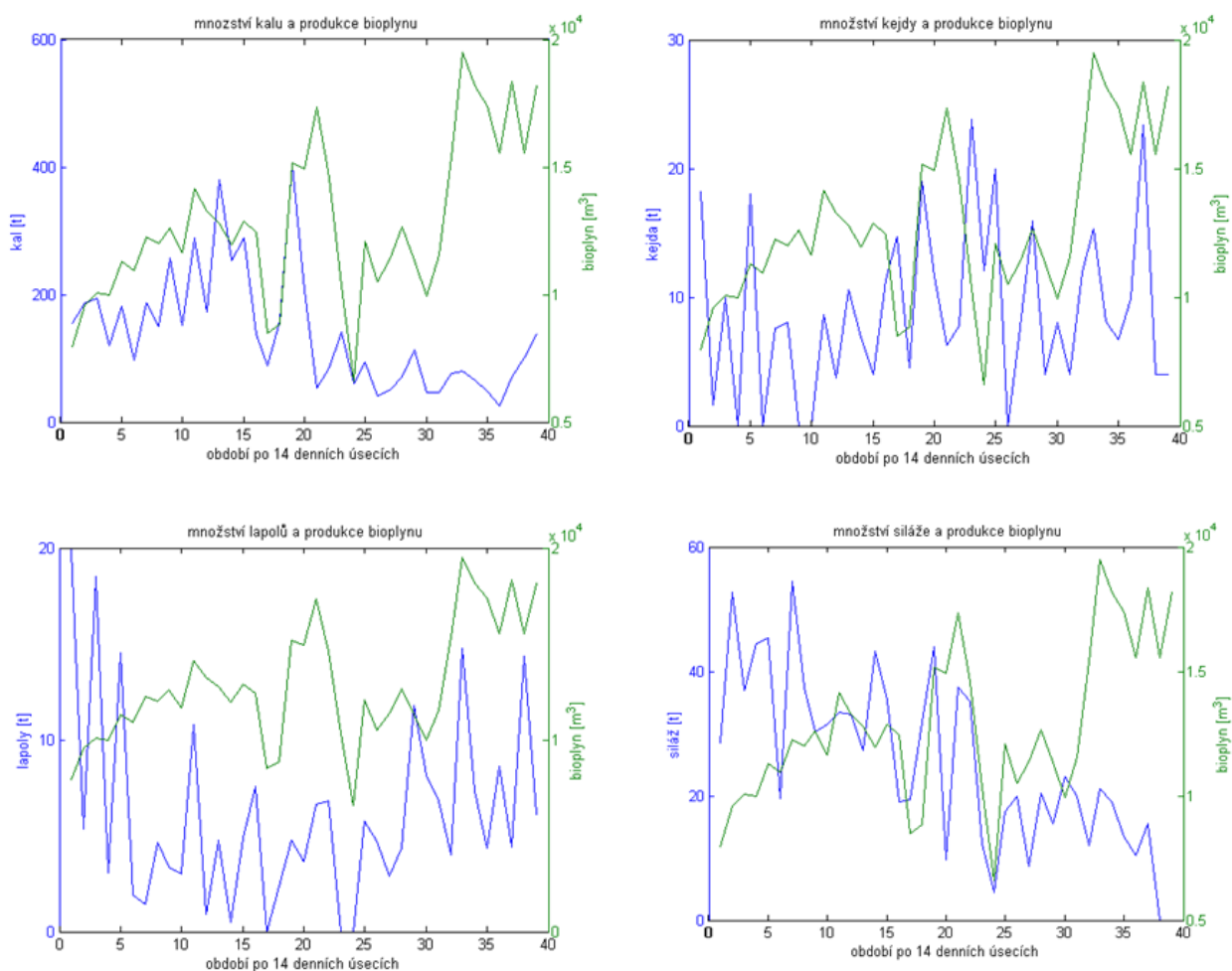
a bioplynu mezi jednotlivými shluky pomocí Tukey-Kramerova testu. Toto je neparametrický, pořadový post hoc test, ke kterému bylo přistoupeno z důvodu malého rozsahu vzorku jednotlivých vysvětlujících proměnných.

Dále bylo vytvořeno grafické zobrazení vývoje produkce bioplynu z dat analyzovaného souboru s vyznačenými hodnotami patřícími k jednotlivým shlukům.

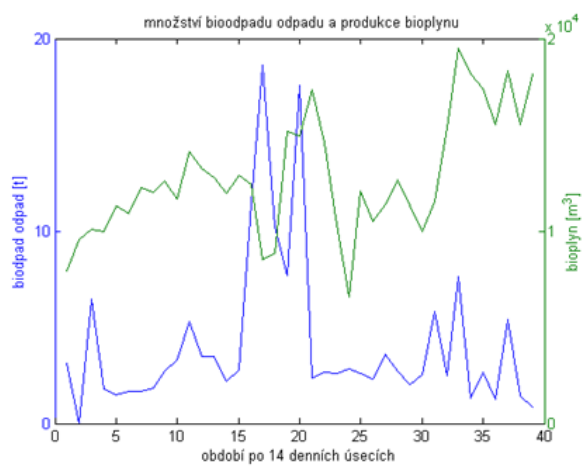
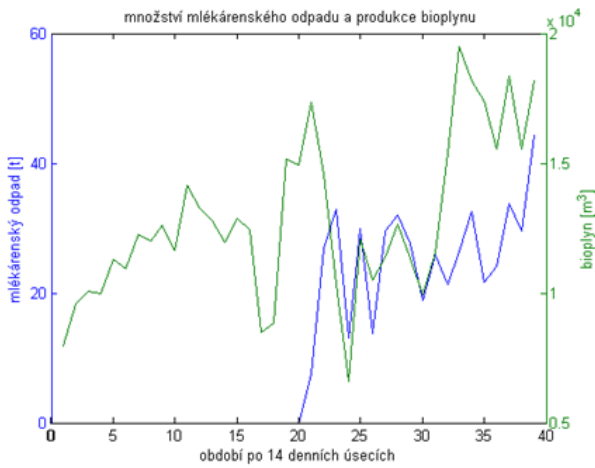
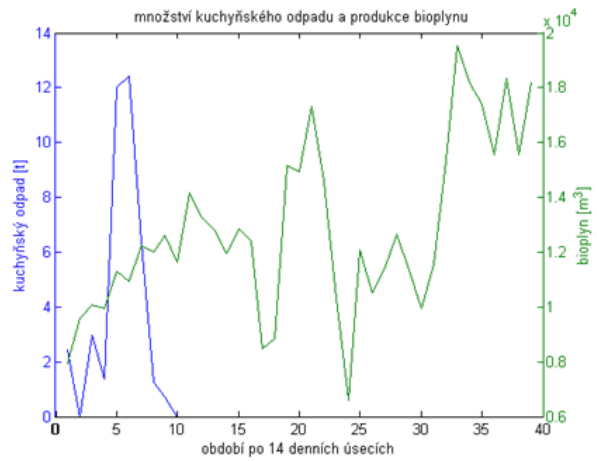
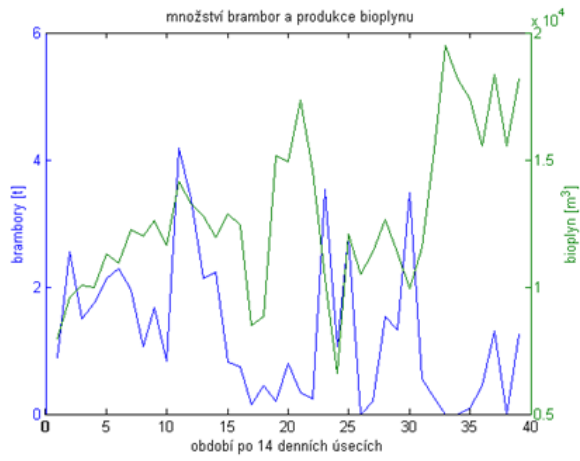
3 Výsledky

3.1 Výsledky kvalitativního zhodnocení dat

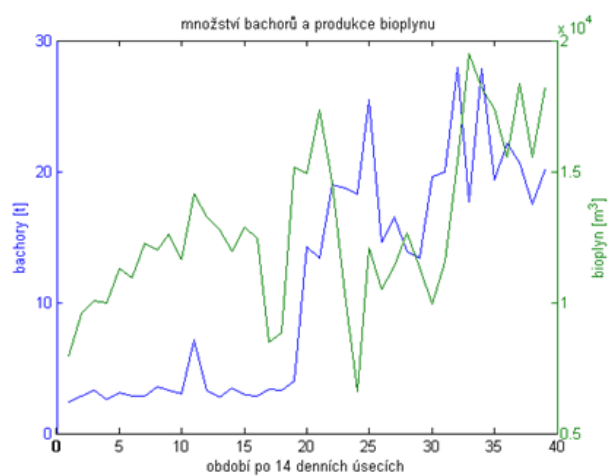
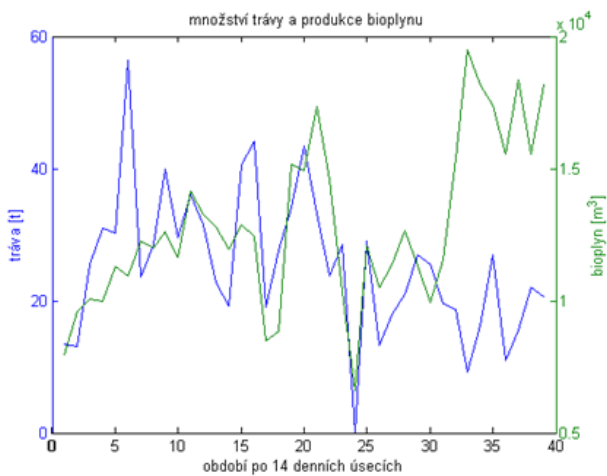
Zde prováděná analýza má za cíl z uvedených grafů vysledovat trendy vývoje bioplynu v závislosti na zpracovávaném množství jednotlivých vsázek. Data o množstvích jednotlivých vsázek, tak i údaje o vyprodukovaném množství bioplynu, byla upravena na sumu branou po čtrnáctidenních úsecích. Graficky jsou tedy znázorněny údaje od prvního do 39. Časového úseku, každý obsahující sumu dat během 14 dní. Toto bylo učiněno především z důvodu objektivnější analýzy dat, neboť údaje vzaté v menších časových intervalech vykazují podstatně výraznější výkyvy hodnot.



Obrázek 8 Grafy znázorňující průběh zpracovávaného množství kalu, kejdy, lapolů a siláže spolu s produkcí bioplynu



Obrázek 9 Grafy znázorňující průběh zpracovávaného množství odpadů z brambor, kuchyní, mlékáren a odpadu BIO spolu s produkcí bioplynu



Obrázek 10 Grafy znázorňující průběh zpracovávaného množství trávy a bachelorů spolu s produkcí bioplynu

Produkcí bioplynu, jež je vynesena zelenou křivkou, je možné rozčlenit do časových období vykazující významné trendy. Údaje v těchto intervalech je poté možné posuzovat a srovnávat s údaji o zpracovávaných množstvích jednotlivých odpadů a usuzovat tak na významnost jednotlivých vsázek na produkci bioplynu v daném sledovaném časovém úseku.

Přestože je možné nalézt ve vybraných úsecích relativní podobnost s rostoucím či klesajícím množstvím zpracovávaného odpadového materiálu s nárůstem či poklesem produkce bioplynu, je však potřeba upozornit, že tato zdánlivá shoda může být způsobená celou řadou možných nám neznámých mechanismů a je tedy značně obtížné vyvozovat z tohoto jisté závěry. Jak bude dále ukázáno, může v jistém období nastat okem patrná shoda v produkci bioplynu se zpracovávaným množstvím dané vsázky, která v dalších časových úsecích není ani v náznaku pozorována.

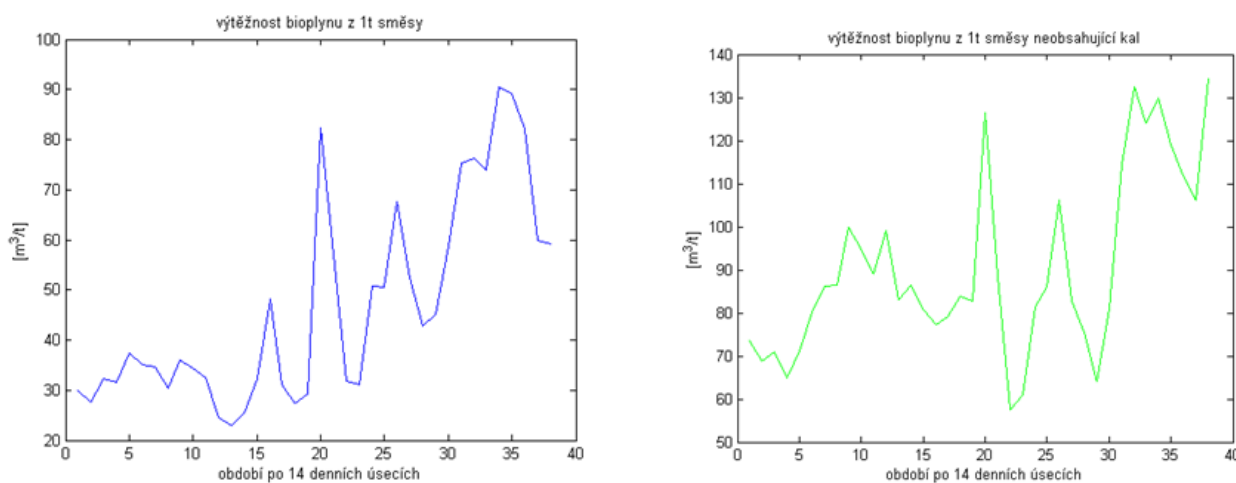
Významnou roli z tohoto pohledu mohou hrát interakce jednotlivých materiálů a neznalost přesného složení dané vsázky. Jako příklad lze uvést mlékárenský odpad, jenž může v jistém období v podstatné míře obsahovat především rozředěné mléčné odpady, jindy může jeho složení být svým obsahem smetanových tuků výrazně prospěšnější pro produkci bioplynu.

Křivku produkce bioplynu je tedy vhodné rozčlenit například na následující úseky. První v období od 1. do 12. dvou-týdenní, kde je patrný pozvolný růstový trend v produkci bioplynu. Poté období od 12. do 17. čtrnáctidenního časového úseku, kde je naopak zjevný klesající trend. V období mezi 17. až 20. časovou jednotkou je zřetelný významný nárůst produkce bioplynu až o 70 procent oproti předchozímu minimu, za kterým následuje výrazný propad produkce bioplynu o více než 75 procent v časovém intervalu mezi 20. až 24. časovou jednotkou. V rozmezí 24. až 27. časového úseku je možné pozorovat nárůst produkce

bioplynu. Ve 27. až 35. úsekem je nejdříve možné pozorovat významný nárůst bioplynu, poté mírný pokles a kolísání poblíž maximální hodnoty produkce bioplynu ve 35. až 38. intervalu.

Obrázek č.11 ukazuje vývoj měrné výtěžnosti bioplynu z jedné tuny vsázky.

Výtěžnost na levé části obrázku č. 11 ukazuje tuto měrnou výtěžnost i ze vsázek, které obsahovaly kal ČOV. Pravá část obrázku č.11 ukazuje měrnou výtěžnost bioplynu na 1 t vsázky kal ČOV neobsahující. Na pravé části obrázku č. 11 pozorujeme mezi 5. až 12. období rostoucí trend měrné výtěžnosti. Oproti tomu na levé části obrázku č. 11 měrná výtěžnost v tomto období kolísá a je značně nízká. Od 15. do přibližně 29. období pozorujeme velké výkyvy u obou porovnávaných grafů (obr. č. 11), přičemž následuje prudce rostoucí trend. Pouze u vývoje na levé straně obrázku č.11 se v posledních obdobích nachází strmý pokles.

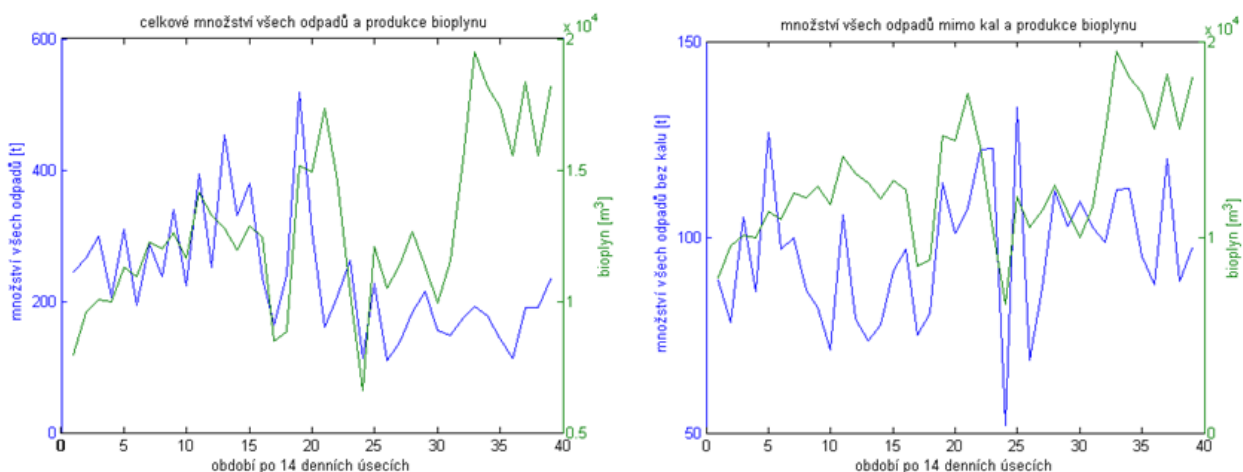


Obrázek 11 Grafy znázorňující vývoj měrné výtěžnosti bioplynu na 1 t směsi – na levé straně se započítaným kalem ČOV, na pravé směsi kal ČOV neobsahující

Následující část je zaměřena na vyjmenování trendů především u významných odpadů.

Období mezi 1. až 12. úsekem

V prvním sledovaném období mezi 1. až 12. dvou-týdenním úseku je v bioplynové stanici zpracováváno relativně velké množství kalu, lapolů, siláže, trávy a v jistém úseku tohoto období i kuchyňského odpadu, množství kejdy lze označit jako spíše podprůměrné, ostatní odpadů je zpracováváno poměrně málo ve srovnání s jinými obdobími.



Obrázek 12 Grafy zobrazující vývoj celkového množství zpracovávaných odpadů. Na levém grafu včetně kalu ČOV a na pravé bez kalu ČOV

Podíváme-li se na výše uvedený obrázek (Obr. č. 12) znázorňující srovnání produkce bioplynu s celkovým množstvím všech odpadů a obrázku vpravo celkového množství všech odpadů s výjimkou kalu, jeví se období mezi 1. až 5. dvou-týdenním srovnání s produkcí plynu v jiných obdobích jako méně účinná.

Období mezi 12. až 17. úsekem

Zajímavé je porovnat období mezi 14. až 15. časovým úsekem a mezi 16. až 17. . V prvním zmíněném období je zpracovááno více siláže, kalu, brambor, v druhém období je zpracovááno podstatně více lapolů, odpadu BIO, trávy, kejdy, a zhruba trojnásobně menší množství kalu. Pomineme-li možné interakce a rozdílnou efektivitu produkce bioplynu z různých složek vyplývá z toho, že trojnásobné množství kalu zhruba 300 t v prvně jmenovaném období mezi 14. až 15. časovém úseku navýší celkovou produkci bioplynu zhruba jen o 25 procent oproti období mezi 16. až 17. dvou-týdenním, kde se zpracovávalo okolo 100 t kalu. To plně souhlasí s dříve odhadnutou velmi nízkou efektivitou produkci bioplynu z kalu. V počátku tohoto období byla produkce bioplynu

Období mezi 17. až 20. úsekem

Během tohoto se oproti předcházejícímu období navyšovala množství travních odpadů, siláže, kejdy kalu z ČOV a odpadu označeného jako BIO. Odpad BIO zde dosahuje svého maxima (až 20 t za 14 dní) viz obrázek č. 9. Ostatních odpadů bylo využíváno znatelně méně. Jak vidíme z obrázků č. 8, 9 10. S tímto obdobím je též spjat značný nárůst produkce bioplynu.

Období mezi 20. až 24. úsekem

Časový úsek mezi 20. až 24. obdobím se vyznačuje začátkem zpracování značného množství bacherů a mlékárenského odpadu. Zároveň bylo využito v počátku období většího množství lapolů (až 7 t). Pozorujeme i pozitivní výkyv množství kejdy a siláže. Trávy a čistírenského kalu bylo zpracovááno o poznání méně, než v jiných časových intervalech. Zaznamenáváme zde ale prudký propad v produkci bioplynu.

Období mezi 24. až 27. úsekem

Pro toto období je charakteristická vsázka většiny odpadů v krátkém čase. Zaznamenáváme značný pokles pouze u obsahu bachorů a kejdy. V tomto i následujících obdobích bylo zpracováváno přibližně třetinové množství kalu ČOV oproti obdobím mezi 1. a 15. čtrnáctidenním. Produkce bioplynu v tomto období vzrostla.

Období mezi 27. až 30. úsekem

Toto období lze popsat oproti předešlému období mírným nárůstem obsahu trávy a siláže, avšak ve vztahu k první polovině celého sledovaného datového souboru je znatelně menší. V tomto období je též patrný pokles množství kejdy a bachorů naopak vyšší množství v sázce je pozorováno u lapolů, mírně u mlékárenských odpadů. Množství odpadu BIO se drží na stabilní nízké úrovni. Ačkoliv oproti předchozímu období je zpracováváno celkově větší množství substrátů, produkce bioplynu se téměř nezměnila.

Období mezi 30. až 35. úsekem

Třicáté až třicáté páté období je charakteristické kladným výkyvem množství kejdy přibližně na 15 t, poté následoval propad. Travní odpad a siláž vykázaly pokles obsahu ve vsázce, přičemž u siláže byl pokles mírnější. Množství obsahu bachorů v tomto úseku zaznamenalo určitý pokles na zhruba 18t, ale drží se na svých vyšších úrovních. Obsah lapolů byl proměnlivý. Množství mlékárenských odpadů narostlo cca o 25 %. Produkce dosáhla v tomto úseku svého maxima za celé analyzované období.

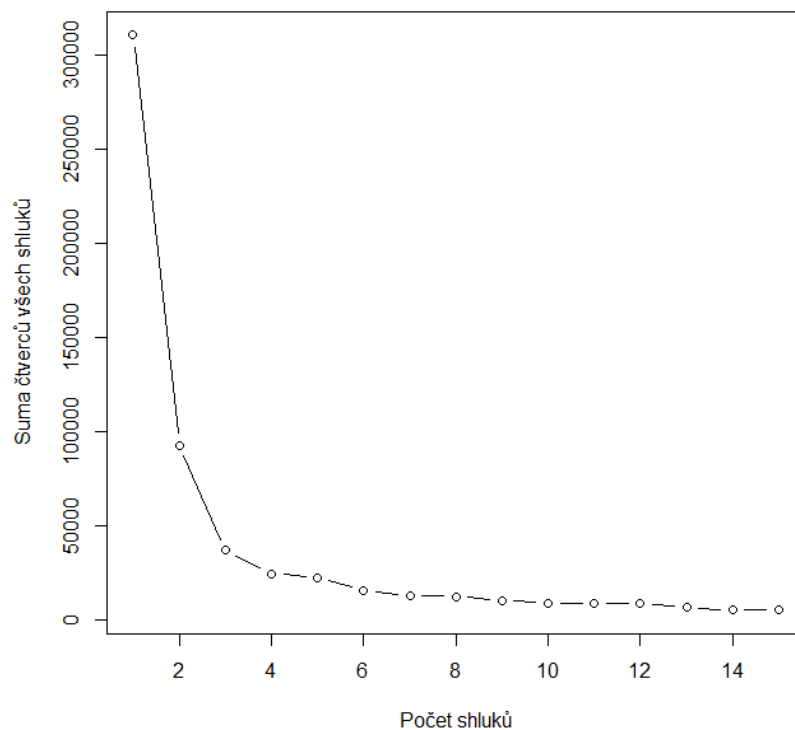
Období mezi 35. až 38. úsekem

V krátkém období během tohoto úseku bylo přidáno značné množství kejdy. Travní odpad zaznamenal propad a poté nárůst k přibližnému množství nad 20 t. Siláž v tomto období přestává být zpracovávána. Hmotnost zpracovávaných množství bachorů se

pohybujekolem 20 t. Obsah mlékárenských odpadů výrazně roste. Došlo i k využití většího množství lapolů (cca 15 t).

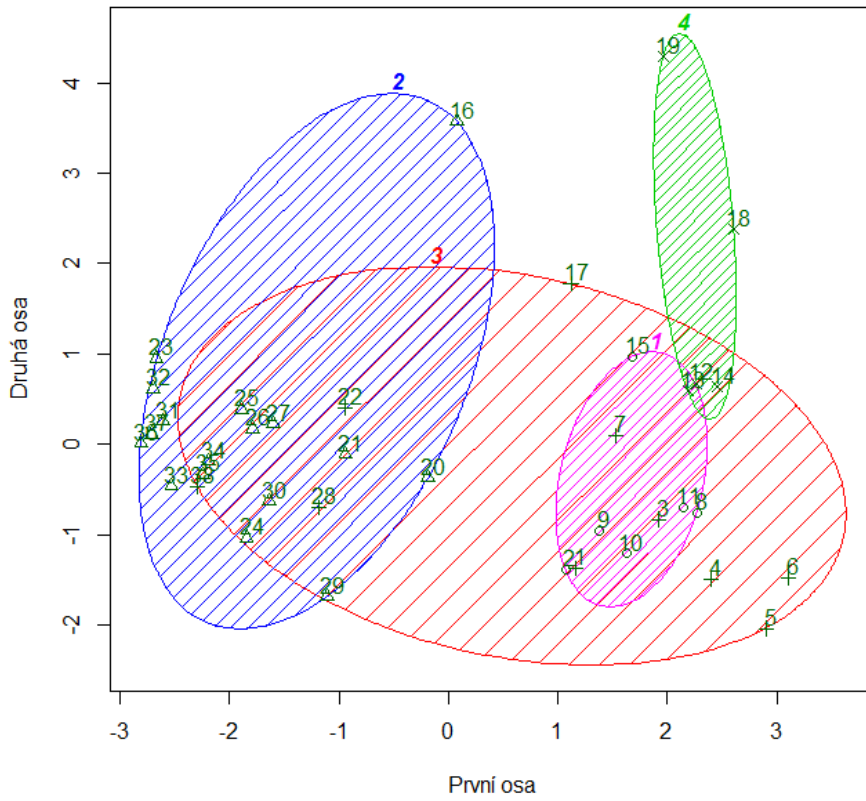
3.2 Výsledky shlukové analýzy

Ze shlukové analýzy prováděné metodou k-meansvyšel pro zkoumané období (1. 1. 2013 – 29. 6. 2014) jako vhodný počet 4shluky.Výsledný scree diagram pro analyzované období ukazuje obrázek č. 13. Následná shluková analýza vysvětlila 52,8 % pomocí prvních dvou os (Obr. 14). Vývoj hodnot vzniklého bioplynu a jejich přiřazení ke konkrétním shlukům zobrazuje obrázek č. 15.

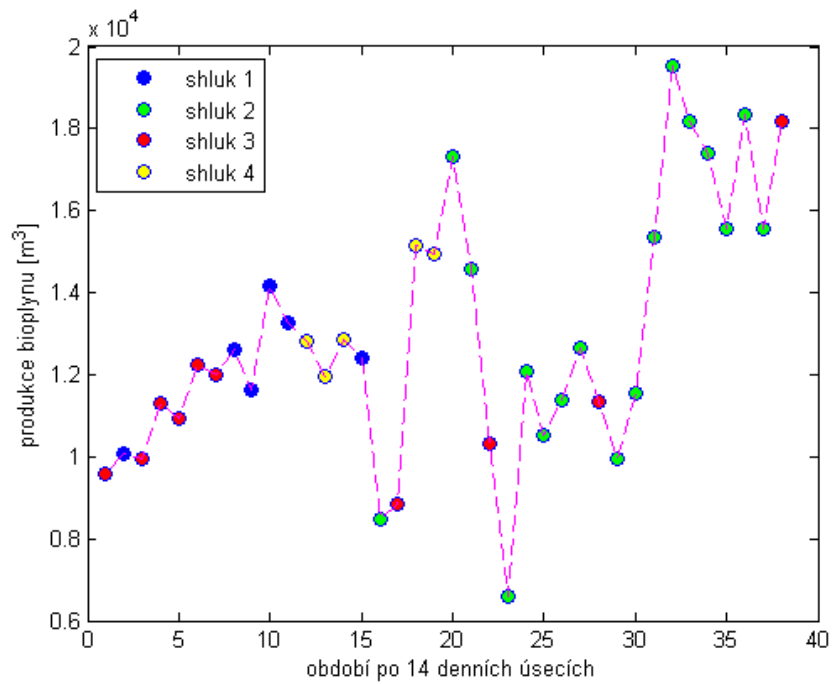


Obrázek 13 Výsledný scree diagram pro analyzovaný datový soubor

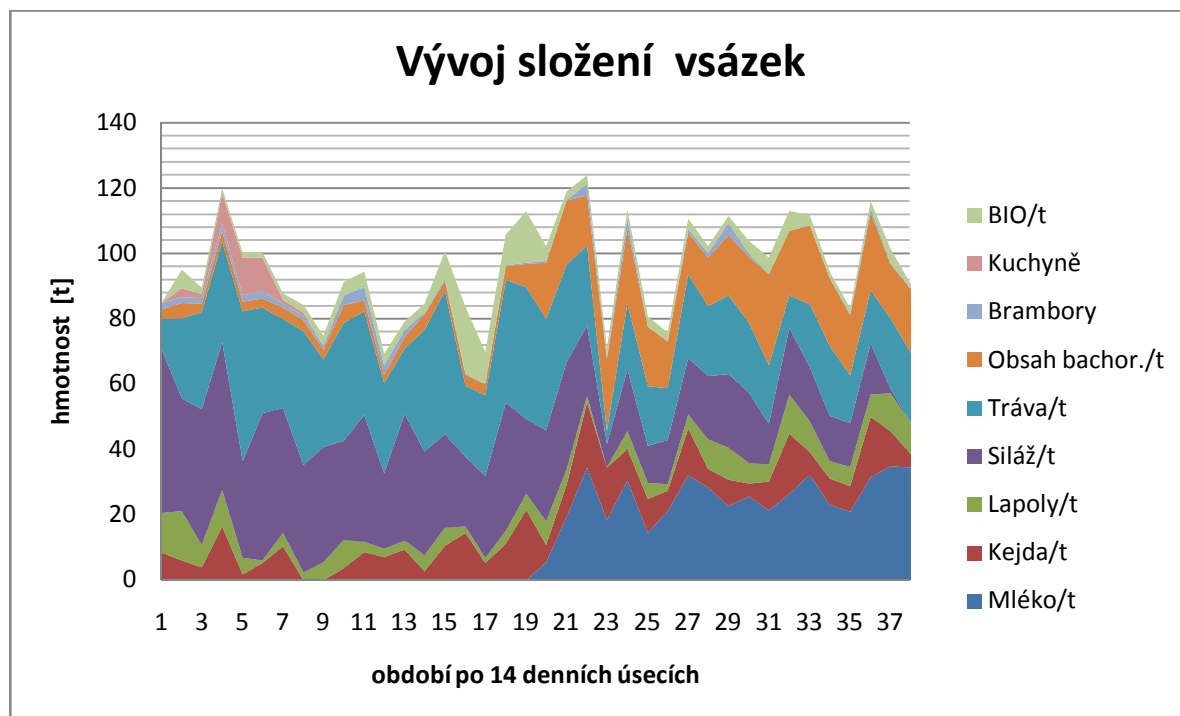
Výsledek clusterové analýzy



Obrázek 14 Výsledný shlukový diagram přiřazující konkrétní intervaly ke shlukům



Obrázek 15 Grafické znázornění vývoje produkce bioplynu s vyznačenými příslušnostmi k jednotlivým shlukům



Obrázek 16 Grafické znázornění vývoje množství všech analyzovaných složek odpadů mimo kal ČOV

3.3 Porovnání průměrných hodnot v rámci shluků a výsledky Tukey - Kramerova testu

Všechny výstupy porovnání průměrů jednotlivých složek byly testované Tukey – Kramerovým testem na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ pomocí programu R v rozhraní R commander. Porovnávané tabulky průměrů vyrobeného bioplynu a zpracovávaných složek odpadů včetně středních chyb jsou uvedeny v tabulkách (tabulky č. 3 až 13). Zjištěné průkazné hodnoty rozdílů průměrů jsou uvedeny tučným písmem v tabulce č.14. U vyrobeného bioplynu v jednotlivých shlucích nebyl prokázán testem významný rozdíl. Průkazně se liší průměrné hodnoty množství kalu, bachorů a siláže mezi shlukem č. 2 a ostatními shluky. Shluk 2 se liší rovněž průkazně od shluků 1 a 4 v průměrném obsahu trávy a

odpadů označených jako Mléko. Rovněž se shluk 2 liší v bramborách oproti shlukům 1 a 3. Další průkazné rozdíly průměrů množství vsázky byly nalezeny shlukem 3 a 4; 3 a 1 a to u odpadu BIO.

Výsledné matice pro porovnání průměrných hodnot vyrobeného bioplynu a jednotlivých složek za analyzovaný datový soubor:

Tabulka 3

	Shluk 1	Shluk 2	Shluk 3	Shluk 4	Bioplyn.m ³	SE
Shluk 1	x	1466,00	-887,00	1194,00	12357,00	1225,20
Shluk 2		x	-2353,00	-272,00	13823,00	727,90
Shluk 3			x	2081,00	11469,00	949,10
Shluk 4				x	13551,00	1342,20

Tabulka 4

	Shluk 1	Shluk 2	Shluk 3	Shluk 4	Kal ČOV.t	SE
Shluk 1	x	-148,26	-65,20	98,85	210,56	8,12
Shluk 2		x	83,06	247,10	62,30	4,82
Shluk 3			x	164,04	145,36	6,29
Shluk 4				x	309,40	8,90

Tabulka 5

	Shluk 1	Shluk 2	Shluk 3	Shluk 4	Mléko.t	SE
Shluk 1	x	22,32	9,74	0,00	0,00	0,00
Shluk 2		x	-12,58	-22,32	22,32	2,51
Shluk 3			x	-9,74	9,74	3,27
Shluk 4				x	0,00	0,00

Tabulka 6

	Shluk 1	Shluk 2	Shluk 3	Shluk 4	Kejda.t	SE
Shluk 1	x	5,64	3,28	5,51	4,81	2,11
Shluk 2		x	-2,36	-0,13	10,45	1,25
Shluk 3			x	2,23	8,08	1,64
Shluk 4				x	10,32	2,31

Tabulka 7

	Shluk 1	Shluk 2	Shluk 3	Shluk 4	Lapoly.t	SE
Shluk 1	x	-0,61	-0,44	-2,87	6,66	1,47
Shluk 2		x	0,16	-2,27	6,05	0,87
Shluk 3			x	-2,43	6,22	1,14
Shluk 4				x	3,79	1,61

Tabulka 8

	Shluk 1	Shluk 2	Shluk 3	Shluk 4	Siláž.t	SE
Shluk 1	x	-16,47	-1,85	-2,23	33,42	4,06
Shluk 2		x	14,62	14,24	16,95	2,41
Shluk 3			x	-0,38	31,57	3,14
Shluk 4				x	31,19	4,44

Tabulka 9

	Shluk 1	Shluk 2	Shluk 3	Shluk 4	Tráva.t	SE
Shluk 1	x	-14,26	-7,26	-1,43	34,02	3,26
Shluk 2		x	7,00	12,84	19,76	1,94
Shluk 3			x	5,83	26,76	2,53
Shluk 4				x	32,60	3,57

Tabulka 10

	Shluk 1	Shluk 2	Shluk 3	Shluk 4	Obsah.bachor..t	SE
Shluk 1	x	15,11	3,30	0,60	3,77	2,09
Shluk 2		x	-11,81	-14,51	18,87	1,24
Shluk 3			x	-2,71	7,07	1,62
Shluk 4				x	4,36	2,28

Tabulka 11

	Shluk 1	Shluk 2	Shluk 3	Shluk 4	Brambory.t	SE
Shluk 1	x	-1,26	-0,32	-0,75	2,03	0,44
Shluk 2		x	0,94	0,51	0,77	0,26
Shluk 3			x	-0,43	1,71	0,34
Shluk 4				x	1,28	0,49

Tabulka 12

	Shluk 1	Shluk 2	Shluk 3	Shluk 4	Kuchyně.t	SE
Shluk 1	x	-0,63	2,69	-0,63	0,63	1,04
Shluk 2		x	3,33	0,00	0,00	0,62
Shluk 3			x	-3,33	3,33	0,80
Shluk 4				x	0,00	1,34

Tabulka 13

	Shluk 1	Shluk 2	Shluk 3	Shluk 4	BIO.t	SE
Shluk 1	x	-0,48	-2,27	2,03	4,72	1,59
Shluk 2		x	-1,78	2,51	4,24	0,94
Shluk 3			x	4,30	2,45	1,23
Shluk 4				x	6,75	1,74

Tabulka 14 Výsledná tabulka Tukey-Kramerova testu

Bioplyn			
Shluk	1	4	3
4	0,88	x	x
3	0,67	0,23	x
2	0,91	0,99	0,11

Tráva			
Shluk	1	4	3
4	0,9895	x	x
3	0,5251	0,7852	x
2	0,0064	0,0389	0,1497

Kal ČOV			
Shluk	1	4	3
4	0,84632	x	x
3	0,50306	0,11835	x
2	0,00027	1,10E-05	0,01233

Obsah bachor.			
Shluk	1	4	3
4	0,99498	x	x
3	0,99891	0,99919	x
2	0,00456	0,02378	0,00084

Mléko			
Shluk	1	4	3
4	1	x	x
3	0,5696	0,6168	x
2	0,0075	0,015	0,1402

Brambory			
Shluk	1	4	3
4	0,76	x	x
3	0,985	0,874	x
2	0,048	0,597	0,042

Kejda			
Shluk	1	4	3
4	0,4	x	x
3	0,81	0,81	x
2	0,13	1	0,48

Kuchyně			
Shluk	1	4	3
4	0,82	x	x
3	0,9	0,37	x
2	0,69	1	0,12

Lapoly			
Shluk	1	4	3
4	0,52	x	x
3	1	0,54	x
2	1	0,36	0,99

BIO			
Shluk	1	4	3
4	1	x	x
3	0,025	0,043	x
2	0,742	0,797	0,069

Siláž			
Shluk	1	4	3
4	0,9966	x	x
3	0,9679	0,9973	x
2	0,0087	0,0357	0,0084

Výsledky výpočtů koeficientů výtěžnosti jednotlivých složek

Všechny získané koeficienty výtěžností bioplynu za každou složku substrátu jsou přehledně uvedeny v tabulce č. 15.

Tabulka 15 Tabulka vypočítaných koeficientů výtěžností bioplynu jednotlivých substrátů

Shluk	Č.úsek	Kal ČOV	Mléko	Kejda	Lapoly	Silaž	Tráva	Bachory	Brambory	Kuchyňe	BIO
3	3-5	8.22	neni	11.0	138.9	103.5	26.9	58.7	29.3	151.8	55.0
3	4-6	8.22	neni	19.7	125.3	166.9	50.8	105.5	52.7	174.8	98.9
1	7-9	8.22	neni	60.8	137.9	134.2	79.8	244.9	58.1	192.3	108.8
2	27-29	8.22	89.7	111.3	114.2	117.7	99.3	186.5	48.1	neni	90.1
4	18-20	107.6	neni	18.1	114.9	111.9	156.5	207.1	48.4	neni	90.7

4 Diskuze

Než budou diskutovány výsledky, je nutné si uvědomit, že technologie probíhá ve skutečném provozním režimu BPS a nikoliv v laboratorních podmínkách, což je nutno při zpracování dat respektovat. Vsázky jednotlivých odpadů jsou také přijímány do technologie velmi nepravidelně. Důležité je také uvést, že údaje o produkci bioplynu nejsou měřena přímo, ale jsou evidována na základě spotřeby v kogenerační jednotce stanice. BPS Úpice přitom žádné zásoby bioplynu nevytváří a spalování bioplynu v teplovodním kotli je zanedbatelné, neboť byl využíván minimálně. Údaje do evidence přijatého odpadu jsou sice zaznamenávány i přes výjimečné překlepy pečlivě, nicméně se jedná o odpadní materiály, jejichž přesné složení je závislé na kázni, třídění, či charakteru zdrojů, ze kterých pocházejí. Bez dostatečných rozborů reprezentativních vzorků těchto odpadů tedy nelze s jistotou určit možné nežádoucí příměsi.

Data o odpadní vodě používané k oplachu brambor (v evidenci označena jako „škrobová voda“) byla zanedbána. Tato škrobová voda obsahuje velmi malé obsahy sušiny a byla používána především k ředění obsahu homogenizační nádrže. V případě že by ve zpracování dat nebyla zanedbána, mohla by velmi zkreslit výsledky shlukové analýzy (Everitt a Hothorn 2006). I podle zkušeností operátorů stanice je její přínos pro vznik bioplynu zanedbatelný (Srna, Sedláček, úst. sdělení).

Evidovaný bioplyn je zaznamenáván stejný den, jako přijímané odpady. Tyto odpady ovšem nevstupují přímo do anaerobního procesu, ale přes technologii příjmového objektu do homogenizační nádrže, kde se míchají již s dříve přijatým odpadem. Dále musí projít pasterizací. Bioplyn rovněž nezačne vznikat z nových substrátů okamžitě. Ze substrátů se bioplyn začíná tvořit až po několika hodinách a tvoří se nejvíce zhruba prvních 10-15 dnů (Mast et al. 2014) S přihlédnutím k těmto aspektům ataké tomu, že není známo přesné složení

vsázky do fermentoru, a nelze říci jaká část příchozí směsi mohla být odčerpána dříve, než by bylo vhodné, byly ve výpočtech i ostatních analýzách využity v metodice zmíněné korekce dat.

4.1 Diskuze k užití korekci

V této práci byla využita korekce vycházející z předpokladu konstantního koeficientu výtěžnosti na zvoleném časovém intervalu. Tento předpoklad není přesný vzhledem k charakteru procesu vzniku bioplynu, nicméně tento předpoklad byl nutný, pokud jsme chtěli zohlednit vliv odpadů ve fermentoru ještě před obdobím, ve kterém jsme zjišťovali produkovaná množství bioplynu. Dále tento předpoklad umožňuje proveditelnost v práci využité analýzy, která by jinak musela být mnohem sofistikovanější. Jiný než konstantní koeficient by vyžadoval více parametrů popisujících pochody probíhající v reaktoru a přesné složení substrátů. Již 10 složek reagujících společně představuje velmi komplexní problém.

4.2 Diskuze k výsledkům výpočtu koeficientů výtěžnosti bioplynu

Důležitým faktorem pro zde uváděné výpočty jsou teoretické hodnoty výtěžností, se kterými algoritmus pracuje. Dá se očekávat, že by se výsledky mohly značně odlišovat při zadání jiných teoretických hodnot.

Jak se ukazuje, v metodice popsaný algoritmus výpočtu výtěžností často nadhodnocuje výtěžnosti těch substrátů, u kterých se předpokládala nízká výtěžnost. To je ostatně vidět u hodnoty 111, která patří výtěžnosti kejdy v období zhruba okolo 27-29. čtrnáctidenní. Navíc zde musí být přihlédnuto na fakt, že v bioplynové stanici pod označením kejda je zpracovávána směs kejdy s krví. Měrné výtěžnosti u kejdy prasat a skotu se podle literatury

(Straka a Dohányos 2006) mohou značně lišit. Zřejmě závisí na stáří zvířat, druhu a složení píce. Také je doporučováno udržovat obsah krve při anaerobní digesci nízký, kvůli vysokým koncentracím obsaženého dusíku (Klintenberg et al. 2014)

Pokud se podíváme na vypočtené výtěžnosti bioplynu ze siláží (tabula č. 15), je patrné, že se může jejich hodnota značně měnit. Mast (Mast et al. 2014) uvádí, že se siláže mohou svým měrným výtěžkem velmi lišit (až několika násobně) v závislosti na odrůdě a době sklizně rostlinných kofermentů.

Z provedených výpočtů by bylo možné usoudit, že obsahy lapolů mají dobrý potenciál pro úspěšné využití v anaerobní digesci jako vhodný koferment. Toto tvrzení nacházíme i v literatuře (Zhu et al. 2011).

Dále i uváděná hodnota výtěžností z časového okolí 18-20 čtrnáctidenní se nejeví jako reálná. Při tomto výpočtu již nebyla využita odhadovaná hodnota výtěžnosti kalu a to z důvodů výše popsaného v metodice. Bohužel tímto způsobem určená hodnota výtěžnosti kalu vyšla značně nadhodnocena. Svou roli v nežádoucí odchylce může hrát skutečnost, že období, ve kterém byl výpočet proveden je prudký nárůst produkce bioplynu, což mohlo způsobit, že jisté předpoklady výpočtu nemusely být již platné.

Bohužel je také třeba dodat, že malé množství vypočtených dat neumožňuje zevrubnější analýzu jednotlivých shluků, což by jinak bylo velmi přínosné. Algoritmus totiž není plně doladěný, a je zapotřebí podchytit některé chyby v kódu neumožňující předat hodnoty následujícím funkcím v kódu a tak vůbec provést výpočet.

Z výsledků shlukové analýzy vyplývá, že převážné množství shluků vykazující velkou míru shody se nachází ve svém sousedství (obr. č. 15). To v zásadě opodstatňuje potřebu se zaměřit na časové intervaly, na nichž lze předpokládat podobnou interakci. Zvolený postup k vyšetření jednotlivých výtěžností byl založen na postupu lineární regrese, avšak takto byly

analyzovány relativně krátká období a navíc úsecích s co nejmenšími rozdíly parametru $K(t)$. Popis, jenž byl užit vykazuje nemalou souvislost s nelineární regresí (dynamických modelů), která vychází z primární rovnice, která bude níže odvozena. Zderivujeme-li rovnici (1.2) podle času a za předpokladu pomalé změny hmotností jednotlivých substrátů, jež jsou v reaktoru platí :

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dK}{dt} * (c_1 * m_1 + \dots c_n * m_n) + K * \left(\frac{dc_1}{dt} * m_1 + \dots \frac{dc_n}{dt} * m_n \right) \quad (1.6)$$

Zavede-li se dále substituce $(dK/dt)/K = -K_v$, a její použití ve vztahu (1.6), pak následným porovnáním s původní rovnicí (1.2) lze získat diferenciální rovnici prvního řádu:

$$\frac{dV}{dt} = -K_v * V + K * \left(\frac{dc_1}{dt} * m_1 + \dots \frac{dc_n}{dt} * m_n \right) \quad (1.7)$$

Pokud by touto rovnicí byl posuzován vývoj plynu na krátkém časovém úseku, pak by teoreticky bylo možné považovat interakci za neměnnou, a tedy koeficient K_v za konstantní. To by tedy umožnilo provádět numericky méně náročnou vícerozměrnou nelineární regresí, kterou by se teoreticky dala provádět predikce produkce bioplynu na velmi krátký časový úsek do budoucna. Poslední závorka v rovnici (1.7) se v literatuře označuje sumou $\sum_{i=1}^n q_i * m_i$. Z toho vyplývá, jaký význam by měly regresí hledané parametry q_i . Jednalo by se o časové derivace koeficientů výtěžností jednotlivých substrátů. Integrací parametrů q_i by mohli být zjišťovány koeficienty výtěžností. Otázkou však zůstává přes jak velké časové intervaly a také jak by bylo možné ošetřit, aby regresní parametry nabývaly pouze kladných hodnot.

Pro účely optimalizace provozu bioplynové stanice se jako nejvýhodnější způsob zdá vytvoření databáze s korekcemi dat o množstvích každého ze substrátů na vhodně zvolených časových úsecích a tyto data doplňovat o výpočty příslušných výtěžností. Procházením dostatečně rozsáhlé databáze by mohly být nalezeny směsi vsázek k těm, které by mohli být v krátké době připraveny k zpracování. O vhodném složení směsi by na základě počítačem vytvořených návrhů mohl rozhodnout operátor stanice.

4.3 Diskuze výsledků shlukové analýzy

I když shluková analýza rozdělila celkový soubor intervalů na 4 shluky, oproti očekávání testováním nebyl prokázán významný rozdíl mezi průměrnými výtěžnostmi bioplynu. Z diagramu shlukové analýzy (obr. č. 14) a z obrázku č. 15 ale můžeme vidět, že shluky číslo 1, 3 a 4 se nacházejí společně na stejné polovině obrázků, přičemž z grafu (obr. č. 15) je patrné, že jde o část přibližně do 20. intervalu. Z obrázku č. 15 rovněž vyčteme, že kolem tohoto intervalu dochází k razantním změnám ve vývoji tvorby bioplynu. Také díky poznatkům z kvalitativní analýzy a z grafického znázornění složení vsázek (obr.č.16) si můžeme povšimnout značného výkyvu v množství přijímaných odpadů, přičemž se zde objevuje značné zastoupení mlékárenského odpadu a později i obsahu bachorů. Z výsledků usuzují, že ne jen menším množstvím celkové hmotnosti zpracovávaných substrátů, ale i tato prudká změna ve složení zpracovávaných substrátů je příčinou tak značného propadu výtěžnosti bioplynu, jak můžeme odvodit z obrázku č. 11. Pokud v tomto úkazu nehrají roli i jiné nám neznámé faktory (jako například snížení pH pod hladinu 6,6 pH, na kterou jsou metanogenní organismy extrémně citlivé) (Ward et al. 2008), dalo by se říci, že tento jev ukazuje právě na nepříznivý vliv rychlé změny složení zpracovávané vsázky (Straka a Dohányos 2006).

Shluk označený číslem 2, zaujímající hlavně tedy pozdější období po 20. intervalu se vyznačuje průkazně nižšími hodnotami kalu ČOV v porovnání s ostatními shluky. I celkově má nejnižší průměrnou hmotnost. Přesto jeho průměrná produkce bioplynu je nejvyšší. I když obsahuje v průměrech průkazně méně trávy a siláže, jak vidíme z tabulky č. XX, lze usuzovat, že jeho skladba kofermentů je pro výrobu bioplynu nejvýhodnější. Je v něm hodně zastoupen mlékárenský odpad a obsahy bacherů. Mlékárenské odpady mají schopnost efektivní tvorby metanu při anaerobní fermentaci. Jejich obsah účastníci se procesu musí být však hlídán, aby nedošlo k inhibičnímu efektu vlivem příliš vysoké koncentrace lipidů a je také doporučováno aby byly fermentovány spolu s rostlinnými substráty (Domingues et al. 2015).

I jak je z grafů zobrazujících průběh měrné výtěžnosti bioplynu na tunu vsázky patrné(obr.č.) dosahuje měrná výtěžnost bioplynu svých maximálních hodnot v oblastech prisouzených shluku 2. Překvapivé by se mohlo zdát, že ostatní shluky se svými průměrnými hodnotami průkazně liší pouze u odpadu BIO.

Domnívám se, na základě výsledků provedené shlukové analýzy, že shluková analýza by mohla být využívána jako vhodný nástroj k efektivnějšímu řízení bioplynových stanic.

5 Závěr

V úvodní části této práce je mapován provoz bioplynové stanice Úpice, v rámci toho jsou uváděny zjištěné technické údaje, které také byly zohledněny v diskuzi. Z poznatků získaných při studiu procesů anaerobní digesce lze usoudit, že by bylo potřebné sledovat chemické složení produkovaného bioplynu. Znalost takového poznatku by napomohla operátoru stanice učinit adekvátní zásahy do fermentačního procesu. Neopomenutelnou roli také hraje vyrovnané složení vsázky umožňující plynulejší proces fermentace. Dále je vhodné při změně složení vsázky tuto změnu provádět pozvolna, aby nedocházelo k příliš prudkým změnám podmínek pro anaerobní digesci (např. pH, poměru C:N, apod.), které by mohly negativně ovlivnit mikrobiální procesy. Tento závěr byl proveden s ohledem na výše diskutovanou prudkou změnu výtěžnosti a provedené analýzy.

Pro skutečnou optimalizaci anaerobní digesce by byly třeba laboratorní experimenty z konkrétních substrátů využívaných konkrétními bioplynovými stanicemi, testování výtěžnostikombinací jejich směsí a získané poznatky uvést do praxe.

Vhodným přínosem pro provoz BPS by mohla být možnost alespoň krátkodobého skladování využívaných substrátů, což by umožňovalo vytvářet lepší skladbu vsázky. Otázkou je, zda by tato možnost byla reálná jak z ekonomického tak i technologického hlediska. V této konkrétní stanici se to však nejeví jako reálná možnost.

Přínosy práce

Přínosy diplomové práce je možné shrnout do následujících bodů:

- V první části této práce byla podána rešerše o provozu konkrétní bioplynové stanice, jejíž poznatky byly využity k možnému návrhu korekce dat a v diskuzi o možné optimalizaci výroby bioplynu.
- Byl navržen algoritmus výpočtu koeficientů výtěžnosti pro vymezené časové úseky, vycházející z postupu lineární regrese a využívající teoretických hodnot výtěžností.
- V prostředí programu Matlab byl vytvořen m-file, dle v této práci popsaných postupů, který je možné dále upravovat a zdokonalovat.
- V diskuzi u této práce byla zmíněna spojitost mezi využitým algoritmem a popisem systému pomocí vícerozměrné nelineární regrese vycházející z modelu systému popsaného lineární diferenciální rovnicí prvního řádu.
- V této práci byla též uvedena možná metodika postupů, jak by mohla být v budoucnu prováděna optimalizace bioplynové stanice Úpice. Optimalizace by měla využívat shlukové analýzy z širokého spektra dat o údajích produkce bioplynu a složení vsázek v kombinaci s vícerozměrnou regresní analýzou.
- Přínosem je rovněž kód v prostředí programu MATLAB, který bude k dispozici pro případné navazující práce.

6 Seznam literatury

AFAZELI, Hadi, Ali JAFARI, Shahin RAFIEE a Mohsen NOSRATI, 2014. An investigation of biogas production potential from livestock and slaughterhouse wastes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 6., roč. 34, s. 380–386 [vid. 4. květen 2015]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2014.03.016

AMON, Thomas, Barbara AMON, Vitaliy KRYVORUCHKO, Andrea MACHMÜLLER, Katharina HOPFNER-SIXT, Vitomir BODIROZA, Regina HRBEK, Jürgen FRIEDEL, Erich PÖTSCH, Helmut WAGENTRISTL, Matthias SCHREINER a Werner ZOLLITSCH, 2007. Methane production through anaerobic digestion of various energy crops grown in sustainable crop rotations. *Bioresource Technology* [online]. 12., roč. 98, č. 17, s. 3204–3212 [vid. 4. květen 2015]. ISSN 09608524. Dostupné z: doi:10.1016/j.biortech.2006.07.007

ČERMÁKOVÁ, Jiřina a TENKRÁT DANIEL, 2010. Využití bioplynu a biomethanu. *Paliva*. 24.5., roč. 2010, č. 2, s. 36–41.

DA COSTA GOMEZ, Claudius, 2013. Biogas as an energy option: an overview. In: *The Biogas Handbook* [online]. B.m.: Elsevier, s. 1–16 [vid. 24. červenec 2014]. ISBN 9780857094988. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780857094988500014>

DANDIKAS, V., H. HEUWINKEL, F. LICHTI, J.E. DREWES a K. KOCH, 2014. Correlation between biogas yield and chemical composition of energy crops. *Bioresource Technology* [online]. 12., roč. 174, s. 316–320 [vid. 4. květen 2015]. ISSN 09608524. Dostupné z: doi:10.1016/j.biortech.2014.10.019

DEUBLEIN, Dieter, ed., 2010. *Biogas from waste and renewable resources: an introduction*. 3. Nachdr. Weinheim: Wiley-VCH-Verl. ISBN 9783527318414 9783527318414.

DOHÁNYOS, Michal, 1998. *Anaerobní čistírenské technologie*. Brno: NOEL 2000. ISBN 8086020193 9788086020198.

DOMINGUES, R.F., T. SANCHES, G.S. SILVA, B.E. BUENO, R. RIBEIRO, E.S. KAMIMURA, R. FRANZOLIN NETO a G. TOMMASO, 2015. Effect of enzymatic pretreatment on the anaerobic digestion of milk fat for biogas production. *Food Research International* [online]. 3. [vid. 4. květen 2015]. ISSN 09639969. Dostupné z: doi:10.1016/j.foodres.2015.03.027

EVERITT, Brian a Torsten HOTHORN, 2006. *A handbook of statistical analyses using R*. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC. ISBN 1584885394.

FRICKE, Klaus, Heike SANTEN, Rainer WALLMANN, Axel HÜTTNER a Norbert DICHTL, 2007. Operating problems in anaerobic digestion plants resulting from nitrogen in MSW. *Waste Management* [online]. 1., roč. 27, č. 1, s. 30–43 [vid. 4. květen 2015]. ISSN 0956053X. Dostupné z: doi:10.1016/j.wasman.2006.03.003

- HOCHLOFF, Patrick a Martin BRAUN, 2014. Optimizing biogas plants with excess power unit and storage capacity in electricity and control reserve markets. *Biomass and Bioenergy* [online]. 6., roč. 65, s. 125–135 [vid. 24. červenec 2014]. ISSN 09619534. Dostupné z: doi:10.1016/j.biombioe.2013.12.012
- CHRISTENSEN, Thomas H., R. COSSU a R. (Rainer) STEGMANN, ed., 1996. *Landfilling of waste: biogas*. 1st ed. London ; New York, NY: E & FN Spon. ISBN 0419194002.
- CHU, Wei a Fung-Lin NG, 2000. Upgrading the conventional grease trap using a tube settler. *Environment International* [online]. 8., roč. 26, č. 1-2, s. 17–22 [vid. 4. květen 2015]. ISSN 01604120. Dostupné z: doi:10.1016/S0160-4120(00)00073-8
- IEA, 2013. *World Energy Outlook 2013* [online]. B.m.: IEA. World Energy Outlook [vid. 4. květen 2015]. ISBN 9789264201309, 9789264201316. Dostupné z: http://www.oecd-ilibrary.org/energy/world-energy-outlook-2013_weo-2013-en
- ILIUTA, Maria C., Faiçal LARACHI a Bernard P.A. GRANDJEAN, 2004. Solubility of hydrogen sulfide in aqueous solutions of Fe(II) complexes of trans-1,2-cyclohexanediaminetetraacetic acid. *Fluid Phase Equilibria* [online]. 4., roč. 218, č. 2, s. 305–313 [vid. 4. květen 2015]. ISSN 03783812. Dostupné z: doi:10.1016/j.fluid.2004.01.030
- KÁRA, Jaroslav, Petr HUTLA a Zdeněk PASTOREK, 2008. *Využití organických odpadů ze zemědělské výroby a venkovských sídel: sběr, třídění a využití organických odpadů : zařízení pro termické zpracování organických odpadů : [metodická příručka MZe ČR. Praha: Výzkumný ústav zemědělské techniky. ISBN 9788086884400 8086884406.*
- KÁRA, Jaroslav, PASTOREK, ZDENĚK a PŘIBYL, EVŽEN, 2007. *Výroba a využití bioplynu v zemědělství. Praha: VÚZT. ISBN 9788086884288 8086884287.*
- KLINTENBERG, Patrik, Max JAMIESON, Viviane KINYAGA a Monica ODLARE, 2014a. Assessing Biogas Potential of Slaughter Waste: Can Biogas Production Solve a Serious Waste Problem at Abattoirs? *Energy Procedia* [online]. roč. 61, s. 2600–2603 [vid. 4. květen 2015]. ISSN 18766102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2014.12.257
- KLINTENBERG, Patrik, Max JAMIESON, Viviane KINYAGA a Monica ODLARE, 2014b. Assessing Biogas Potential of Slaughter Waste: Can Biogas Production Solve a Serious Waste Problem at Abattoirs? *Energy Procedia* [online]. roč. 61, s. 2600–2603 [vid. 4. květen 2015]. ISSN 18766102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2014.12.257
- KWIETNIEWSKA, Ewa a Jerzy TYS, 2014. Process characteristics, inhibition factors and methane yields of anaerobic digestion process, with particular focus on microalgal biomass fermentation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 6., roč. 34, s. 491–500 [vid. 4. květen 2015]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2014.03.041
- MAIZONNASSE, Mark, Jean-Sébastien PLANTE, David OH a Claude B. LAFLAMME, 2013. Investigation of the degradation of a low-cost untreated biogas engine using preheated biogas with phase separation for electric power generation. *Renewable Energy* [online]. 7., roč. 55, s. 501–513 [vid. 4. květen 2015]. ISSN 09601481. Dostupné z: doi:10.1016/j.renene.2013.01.006
- MAST, Benjamin, Andreas LEMMER, Hans OECHSNER, Annett REINHARDT-HANISCH, Wilhelm CLAUPEIN a Simone GRAEFF-HÖNNINGER, 2014. Methane yield

potential of novel perennial biogas crops influenced by harvest date. *Industrial Crops and Products* [online]. 7., roč. 58, s. 194–203 [vid. 4. květen 2015]. ISSN 09266690. Dostupné z: doi:10.1016/j.indcrop.2014.04.017

MATA-ALVAREZ, J, S MACÉ a P LLABRÉS, 2000. Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. *Bioresource Technology* [online]. 8., roč. 74, č. 1, s. 3–16 [vid. 4. květen 2015]. ISSN 09608524. Dostupné z: doi:10.1016/S0960-8524(00)00023-7

MPO, 2014. *Obnovitelné zdroje energie*. jen 2014. B.m.: Ministerstvo průmyslu a obchodu.

MUŽÍK, J. KÁRA a I. HANZLÍKOVÁ, 2012. Odpady ze stravování jako surovina pro výrobu bioplynu [Food Waste as a Feedstock for Biogas Production]. *AgriTechScience[online]*. roč. 6, č. 1, s. 1–5. ISSN 1802-8942.

RYCKEBOSCH, E., M. DROUILLON a H. VERVAEREN, 2011. Techniques for transformation of biogas to biomethane. *Biomass and Bioenergy* [online]. 5., roč. 35, č. 5, s. 1633–1645 [vid. 4. květen 2015]. ISSN 09619534. Dostupné z: doi:10.1016/j.biombioe.2011.02.033

SARPERI, L., A. SURBRENAT, A. KERIHUEL a F. CHAZARENC, 2014. The use of an industrial by-product as a sorbent to remove CO₂ and H₂S from biogas. *Journal of Environmental Chemical Engineering* [online]. 6., roč. 2, č. 2, s. 1207–1213 [vid. 4. květen 2015]. ISSN 22133437. Dostupné z: doi:10.1016/j.jece.2014.05.002

STRAKA, František a Michal DOHÁNYOS, 2006. *Bioplyn: [příručka pro výuku, projekci a provoz bioplynových systémů II. rozšířené a doplněné vydání]*. Praha [i.e. Říčany u Prahy]: GAS. ISBN 8073280906 9788073280901.

SURÍN, S., L' CUBONOVÁ, A. I. MAJERNÍK a P. SMIGÁN, 2006. Amiloride resistance in the methanoeon Methanothermobacter thermoautotrophicus: characterization of membrane-associated proteins. *Folia Microbiologica*. roč. 51, č. 4, s. 313–316. ISSN 0015-5632.

TAN, Sie Ting, Haslenda HASHIM, Jeng Shiun LIM, Wai Shin HO, Chew Tin LEE a Jinyue YAN, 2014. Energy and emissions benefits of renewable energy derived from municipal solid waste: Analysis of a low carbon scenario in Malaysia. *Applied Energy* [online]. 12., roč. 136, s. 797–804 [vid. 4. květen 2015]. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2014.06.003

VESELÁ, Kristýna a Karel CIAHOTNÝ, 2010. Odstraňování sulfanu z bioplynu. *Paliva*. 23.3., roč. 2010, č. 2, s. 21–25.

WARD, Alastair J., Phil J. HOBBS, Peter J. HOLLIMAN a David L. JONES, 2008. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology* [online]. 11., roč. 99, č. 17, s. 7928–7940 [vid. 14. srpen 2015]. ISSN 09608524. Dostupné z: doi:10.1016/j.biortech.2008.02.044

ZEMÁNEK, Pavel, 2010. *Biologicky rozložitelné odpady a kompostování*. Praha: Výzkumný ústav zemědělské techniky. ISBN 9788086884523 808688452X.

ZHU, Zhenwei, Michael K. HSUEH a Qiang HE, 2011. Enhancing biomethanation of municipal waste sludge with grease trap waste as a co-substrate. *Renewable Energy* [online]. 6., roč. 36, č. 6, s. 1802–1807 [vid. 4. květen 2015]. ISSN 09601481. Dostupné z: doi:10.1016/j.renene.2010.11.014