



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**VLIV MEBRÁNOVÉ SEPARACE BIOPLYNU NA STÁVAJÍCÍ
PROVOZ BIOPLYNOVÉ STANICE**

IMPACT OF MEMBRANE SEPARATION OF BIOGAS ON BIOGAS STATION OPERATING CONDITIONS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Svoboda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Lisý, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Bc. Jan Svoboda**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Energetické inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Martin Lisý, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Vliv membránové separace bioplynu na stávající provoz bioplynové stanice

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zpracovat popis technologického řešení membránové separace bioplynu na stávající bioplynové stanici.
Zpracovat bilanční výpočty, ze kterých bude patrný vliv implementované technologie membránové separace na provoz pístových spalovacích motorů stávajících kogeneračních jednotek.
Zpracovat na technicko – ekonomické posouzení provozu bez a s membránovou separací bioplynu.

Cíle diplomové práce:

Cílem diplomové práce je posouzení vlivu implementované membránové separace bioplynu na provoz stávajících kogeneračních jednotek.

Seznam literatury:

Jaroslav Kouřa: Bioplynové stanice s mokrým procesem, Vydavatelství: Informační centrum ČKAIT, 2008

Průvodce výrobou a využitím bioplynu, Vydal: CZ Biom – České sdružení pro biomasu, 2009

Internetové zdroje

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problematikou odstraňování oxidu uhličitého z bioplynu metodou membránové separace. Řeší vliv implementace malého výzkumného zařízení na stávající provoz bioplynové stanice. Posouzení vlivu na provoz je řešeno z hlediska technického i ekonomického.

ABSTRACT

The thesis deals with the issue of removing carbon dioxide from biogas using membrane separation. Addresses the impact of the implementation of a small research facility at the existing operation of the biogas plant. Assessment of the impact on traffic is solved in terms of technical and economic.

KLÍČOVÁ SLOVA

Bioplyn, membránová separace, biometan, bioCNG, bioplynová stanice, upgading bioplynu, membrána, bilance, finanční analýza

KEY WORDS

Biogas, membrane separation, biomethane, bioCNG, biogas plant, biogas upgrading, membrane, balance, financial analysis

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SVOBODA, J. *Vliv membránové separace bioplynu na stávající provoz bioplynové stanice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 59 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Lisý, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: **Vliv membránové separace bioplynu na stávající provoz bioplynové stanice** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

28. května 2016

Jan Svoboda

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Martinu Lisému, Ph.D. za rady, informace a poznámky potřebné k tvorbě této diplomové práce.

OBSAH

1	Úvod	13
2	Bioplyn	14
2.1	Vznik bioplynu	14
2.1.1	Fáze vzniku	14
2.1.2	Podmínky prostředí	15
2.2	Složení plynu	18
2.3	Zdroje biomasy	19
2.4	Bioplynové technologie	19
2.4.1	Způsob plnění	21
2.4.1.1	Diskontinuální	21
2.4.1.2	Kontinuální	22
2.4.2	Počet procesních stupňů	22
2.4.3	Konzistence substrátu	22
2.4.4	Procesní teplota	23
2.5	Schéma bioplynové stanice	23
2.6	Využití bioplynu	24
2.6.1	Kogenerace	24
2.6.2	Upgrading bioplynu	24
2.6.2.1	Biometan	25
2.6.2.2	Podpora biometanu v ČR	27
2.6.2.3	Technologie úpravy bioplynu na biometan	27
2.6.3	Ostatní možnosti využití	27
3	Membránová separace	28
3.1	Obecný popis membránové separace	28
3.1.1	Typy membrán	29
3.1.2	Membránové materiály	30
3.1.3	Membránové moduly	32
3.2	Popis technologie MemBrain	34
3.2.1	Zapojení zařízení membránové separace	35
3.2.2	Technologie membránové separace	38
4	Materiálová a energetická bilance	40
4.1	Provoz BPS bez technologie membránové separace	40
4.2	Provoz BPS s implementovanou technologií membránové separace	42
4.2.1	Bilance uzlu I (bilance 1)	43
4.2.2	Bilance Technologie (bilance 2)	43
4.2.3	Bilance uzlu II (bilance 3)	45
4.2.4	Vyhodnocení ovlivnění provozu	46
5	Technicko – ekonomické vyhodnocení	49
5.1	Ovlivnění provozu BPS	49
5.2	Stanovení ceny vyčištěného bioCNG	49
5.3	Faktory ovlivňující cenu bioCNG	51
5.4	Modelové příklady provozu bioplynové stanice s membránovou separací	53
5.4.1	Kombinace s kogenerační jednotkou	53
5.4.2	Výroba biometanu	53
5.5	Podíl bioplynových stanic s čištěním bioplynu na energetické soběstačnosti ČR	54
6	Závěr	55
7	Seznam použitých zdrojů	56
8	Seznam použitých zkratk a symbolů	58

1 Úvod

Technologie výroby bioplynu je v dnešní době, kdy je stále více podporováno využívání obnovitelných zdrojů energie, velice zajímavé a diskutované odvětví. Samotný vznik bioplynu je lidstvu znám od nepaměti, ale zájem o toto odvětví významně vzrostl teprve začátkem 19. století, kdy se ukázalo, že procesem anaerobní fermentace lze čistit odpadní vody [3]

Samotný proces anaerobní fermentace, jinak řečeno kvašení bez přístupu kyslíku, začal postupně pronikat do dalších odvětví, zejména do oblasti zemědělství (výstavkou bioplynových stanic), kde se tato technologie v posledních několika desetiletích ukázala jako výhodná a to hned z mnoha důvodů. Následkem značného potenciálu velice neprobádaného odvětví a zároveň dobré podpory ze strany státních institucí v podobě vhodných legislativních zásahů a dotací, začal intenzivní vývoj bioplynové technologie, který i dnes pokračuje a stále se objevují nové cesty a způsoby jak tuto technologii vylepšovat a rozšiřovat do dalších sfér zájmu.

Výroba samotného bioplynu je sice stále hlavním, ale nikoliv jediným důvodem vzniku těchto zařízení. Je třeba zmínit, že bioplynové stanice jsou velice vhodné pro zlikvidování a využití většiny biologicky rozložitelných odpadů a tím pádem tyto odpady není nikde potřeba ukládat. Mimo vzniku bioplynu, lze zfermentovaný substrát využít jako hodnotné hnojivo a v neposlední řadě lze touto technologií zajistit hygienizaci značné řady biologických odpadů které jsou kontaminovány zdravými škodlivými organismy. [3]

Avšak v dnešním světě je naprostou nutností, aby takováto zařízení na výrobu bioplynu byla z ekonomického hlediska udržitelná a aby výroba a následné využití byly co možná nejefektivnější a tím pádem i co možná nejziskovější. Na většině bioplynových zařízení na území České republiky je vyrobený bioplyn využíván při kogeneraci v pístových spalovacích motorech k výrobě el. energie a tepla. Není to však jediný způsob jak bioplyn využít. V posledních několika letech jsou intenzivně vyvíjeny technologie, jak bioplyn zušlechtit na kvalitu zemního plynu (obsah metanu $\leq 95\%$).

Takto upravený plyn je naprosto adekvátní náhradou zemního plynu a je možné jej vtlačet do plynárenské sítě nebo využívat jako palivo do dopravních prostředků.

K jedné z těchto technologií zušlechtní bioplynu (tzv. upgrading bioplynu) patří membránová separace. Tato technologie a její následná implementace v podobě výzkumného kontejneru na bioplynové stanici je tématem této práce. Je zde v několika částech postupně rozebrána výroba bioplynu jako takového, následně popsána technologie membránové separace a vliv její implementace na chod celé bioplynové stanice. Vliv implementované technologie je rozdělen na část čistě materiální a část ekonomickou.

Na konci je cena vyseparovaného biometanu porovnána s klasickým zemním plynem. Jako poslední část této práce je velice hrubá úvaha o tom, zda li by bylo možné v České republice implementací této technologie na každou bioplynovou stanici zajistit nezávislost na dovozu zemního plynu, nebo alespoň do jaké míry.

Diplomová práce vznikla v souvislosti s řešením projektu TE0200077 „Smart Regions – Buildings and Settlements. Information Modelling, Technology and Infrastructure for Sustainable Development“.

2 Bioplyn

Pod pojmem bioplyn se, v současné technické praxi, označuje směs plynů vzniklých jako produkt anaerobní methanové fermentace uváděné také pod pojmy vyhnívání, anaerobní digesce, biomethanizace, biogasifikace. V ideálním případě je pod pojmem bioplyn myšlena směs metanu CH_4 a oxidu uhličitýho CO_2 . [1]

2.1 Vznik bioplynu

Bioplyn je produktem látkové výměny metanových bakterií, ke které dochází, když metanové bakterie rozkládají organickou hmotu. K tomuto procesu dochází bez přístupu vzduchu při teplotách mezi $0\text{ }^\circ\text{C}$ až $70\text{ }^\circ\text{C}$. Na rozdíl od kompostování (tlení) nevzniká teplo, ale hořlavý plyn. [3]

S tímto procesem se můžeme setkat na mnoha místech. V přírodě např. v usazeninách moří a řek, v močálech a rašelinistích, neprovětrávaných vrstvách půdy, ale i v bahnitých plochách rýžových polí, dále na hnojištích nebo jímkách kejdy. Při technologických procesech např. u anaerobního čištění odpadních vod, anaerobní stabilizace kalů, skládkování tuhých odpadů a anaerobní stabilizace agroindustriálních odpadů. [3]

Podle místa výskytu mluvíme o plynu bahenním, kalovém, důlním, skládkovém nebo reaktorové plynu (BPS).[3]

2.1.1 Fáze vzniku

Proces vzniku bioplynu probíhá v podstatě ve čtyřech fázích (Obr. 2.1):

HYDROLÝZA

V této první fázi přeměňují přítomné anaerobní bakterie komplexní sloučeniny výchozího materiálu (např.: polysacharidy, bílkoviny, tuky) na jednodušší organické sloučeniny (např.: aminokyseliny, monosacharidy, mastné kyseliny, vodu) pomocí enzymů, které tento materiál rozloží biochemickou cestou. V této fázi ještě není vyžadována nepřítomnost vzduchu [3][4]

ACIDOGENEZE

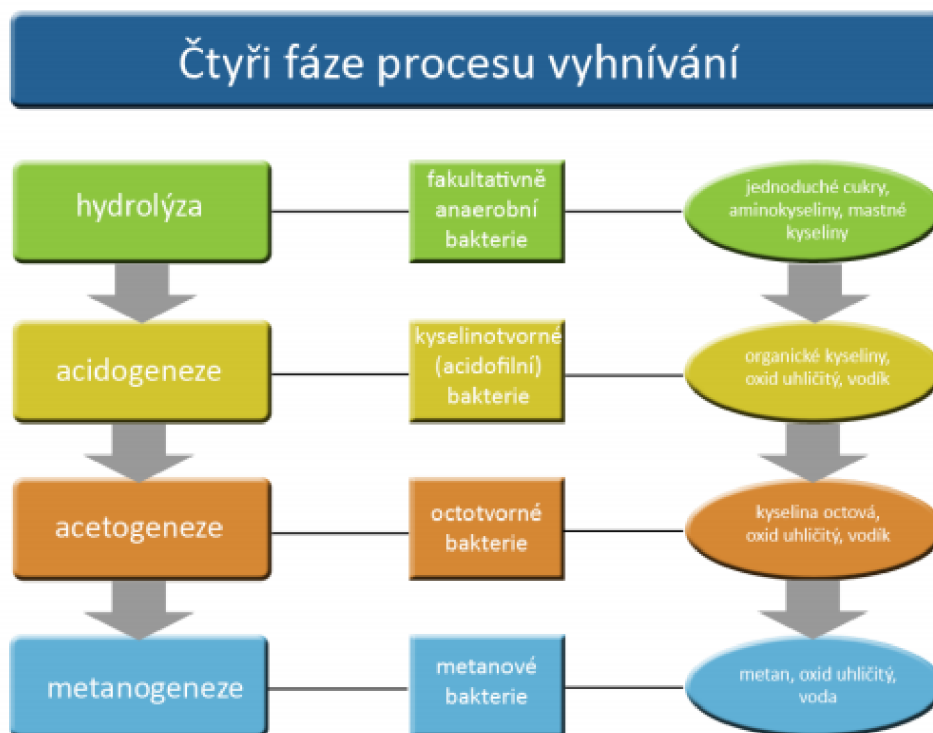
Ve druhé fázi, která je také nazývána fází kyselou, mohou acidofilní bakterie provést další rozklad na organické kyseliny (octová, mléčná, a vyšší), oxid uhličitý, sirovodík, čpavek, etanol. Tato fáze je uskutečňována bakteriemi, které jsou schopny činnosti i v prostředí zcela bez kyslíku a vytvářejí podmínky vhodné pro rozvoj metanových bakterií. [3][4]

ACETOGENEZE

Ve třetí fázi probíhá oxidace produktů acidogeneze na kyselinu octovou, vodík a oxid uhličitý. Acetogenní bakterie jsou v procesu velice důležité, protože rozkládají především kyselinu propionovou, alkoholy a aromatické sloučeniny na vodík. [4]

METHANOGENEZE

Teprve ve čtvrté fázi metanové bakterie rozkládají metanol, kyselinu mravenčí a octovou, metylaminy, oxid uhelnatý a vodík na metan a oxid uhličitý a vodu. [3][4]



Obr. 2.1 Čtyři fáze procesu vyhnívání [3]

2.1.2 Podmínky prostředí

Dnes je známo asi 10 druhů methanococcus a methanobacterium o velikosti asi 1/1000mm, které vyžadují různé typy péče, ale všechny potřebují obdobné podmínky k životu. [3]

VLHKÉ PROSTŘEDÍ

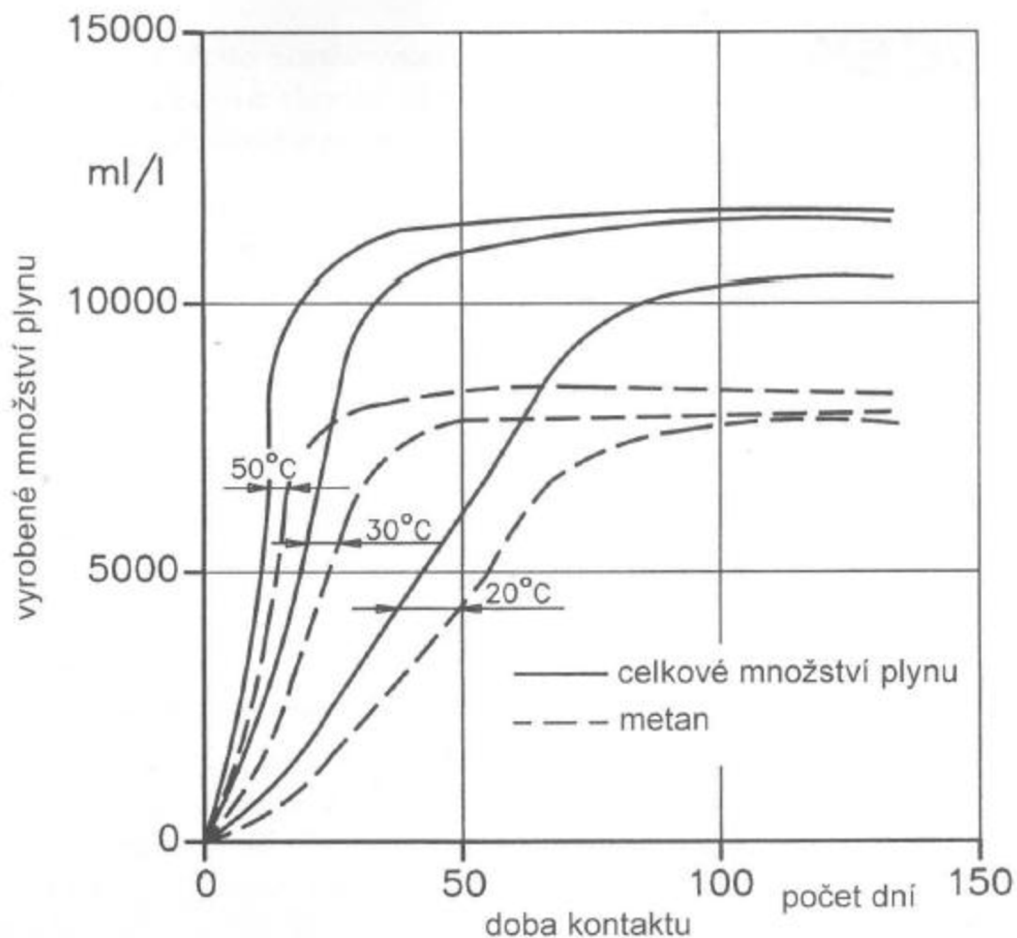
Metanové bakterie mohou pracovat a množit se jen tehdy, když jsou substráty dostatečně zalité vodou. Na rozdíl od aerobních bakterií, kvasinek a hub nemohou žít v pevném substrátu. [3]

ZABRÁNĚNÍ PŘÍSTUPU VZDUCHU

Metanové bakterie jsou striktně anaerobní. Některé druhy bakterií jsou zabity již při přítomnosti i nepatrného množství vzdušného kyslíku. Pokud je v substrátu přítomen kyslík, jako třeba v čerstvé kejdě, musejí ho aerobní bakterie nejprve spotřebovat. K tomu dochází v první fázi bioplynového procesu. [3][4]

TEPLOTA

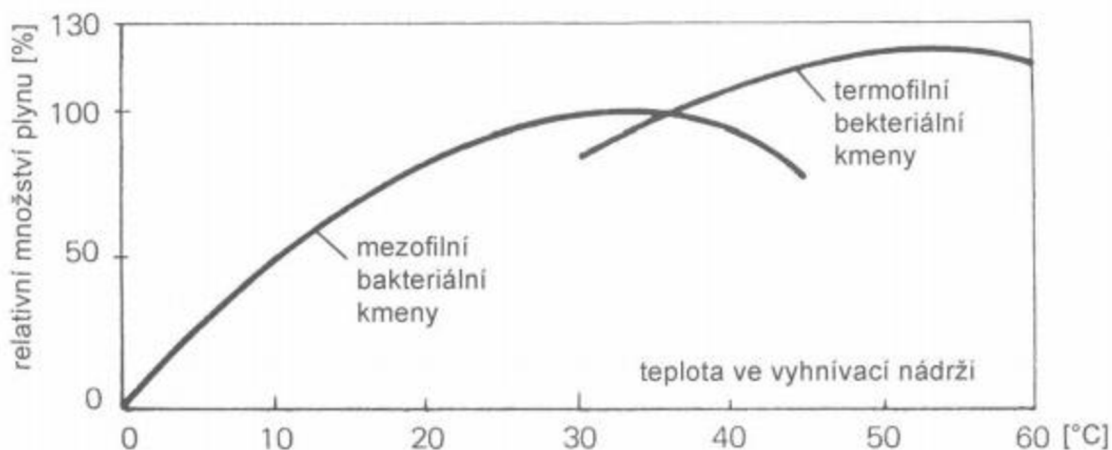
Metanové bakterie pracují při teplotě mezi 0 °C a 70°C. Kromě několika kmenů, které mohou žít, až při teplotách kolem 90 °C Při teplotách pod 0°C přežívají, ale nepracují. V literatuře se udává jako spodní hranice 3 – 4 °C. Rychlost procesu vyhnívání je na teplotě silně závislá. Zásadně platí, že čím vyšší je teplota, tím rychleji nastává rozklad a tím vyšší je produkce bioplynu, tím kratší je doba vyhnívání a tím nižší je obsah metanu v bioplynu (Obr. 2.2). [3]



Obr. 2.2 Závislost doby kontaktu a množství vyprodukovaného plynu [3]

V praxi lze rozdělit bakterie na základě jejich teplotního optima do 3 skupin (Obr. 2.3):

- **Psychrofilní** bakterie mají své optimum až do 25 °C. Při takových teplotách nemusí být substrát vyhříván, ale rychlost rozkladu a produkce bioplynu je nízká. [4]
- Největší část známých metanových bakterií má své růstové optimum v **mezofilní** teplotní oblasti mezi 32 °C a 42 °C. Nejvíce rozšířena jsou zařízení pracující v této teplotní oblasti, protože při těchto teplotách je dosahováno relativně vysokého výtěžku plynu i dobré procesní stability. [4]
- Pokud chceme a byly v substrátu zničeny zdraví škodlivé zárodky, jsou zde pro zfermentování **termofilní** bakterie, které mají své optimum mezi 50 °C a 57 °C. Zde je také díky vyšší procesní teplotě dosahováno většího výtěžku plynu. [4]



Obr. 2.3 Vliv teploty na dosažitelné množství plynu [3]

Další důležitý aspekt, je teplotní stabilita procesu, protože čím vyšší teplota, tím jsou bakterie citlivější na teplotní výkyvy, zejména jsou-li výkyvy krátkodobé a teplota klesne. Zatímco v mezofilní oblasti bakterie denní výkyvy v rozmezí 2 °C až 3 °C kolem střední teploty ještě zvládnou, v termofilní oblasti by výkyvy neměly být větší než 1 °C. Po delší době (cca 1 měsíc) se bakterie adaptují na novou teplotní úroveň. [3]

HODNOTA pH

Pro hodnotu pH platí podobné závislosti jako pro teplotu. Bakterie jednotlivých procesních stupňů mají rozdílné hodnoty pH, při nichž mohou optimálně růst. Optimální pH pro hydrolyzující a kyselotvorné bakterie je 4,5 až 6,3. Jsou ovšem schopné přežít malé zvýšení pH, ale jejich aktivita bude nepatrně zbrzděna. Oproti tomu bakterie, vytvářející kyselinu octovou a metan, potřebují hodnotu pH v neutrální až slabě alkalické oblasti 6,8 až 7,5. Koná-li se fermentační proces jen v jedné nádrži, musí být toto rozmezí dodržováno. [4]

U kejdy a hnoje tento stav nastává většinou samovolně ve 2. fázi vyhřívacího procesu vlivem tvorby amoniaku. U kyselých substrátů, jako jsou výpalky, syrovátka a siláž, bývá zapotřebí přidat vápno, aby se hodnota pH zvýšila. [3]

VHODNÝ PŘÍMĚS ŽIVIN

Pro stabilní průběh procesu je také důležitý vhodný poměr uhlíku v použitém substrátu. Pokud je nadbytek uhlíku a málo dusíku, nemůže být zbylý uhlík přeměněn úplně a tím není využit možný potenciál výroby bioplynu. V opačném případě může nadbytek dusíku způsobit vznik většího množství amoniaku (NH_3), který zabrzdí růst bakterií a může vést k naprostému zhroucení populace bakterií. Vhodný poměr uhlíku a dusíku je uváděn mezi 20:1 až 40:1. [4]

INHIBITORY

Jsou to látky, které mohou proces buď zpomalit, nebo při vyšších koncentracích úplně zastavit. Mezi tyto látky patří různá antibiotika, systematická chemoterapeutika nebo desinfekční prostředky. Toto nebezpečí hrozí, např. když jsou ošetřována naráz všechna zvířata nebo když se desinfikují stáje, apod. [3]

DALŠÍ DŮLEŽITÉ PODMÍNKY

Mezi další podmínky, které je potřeba při procesu dodržet patří takzvané **zatížení vyhřívacího prostoru**. Tato veličina nám udává jaké množství organické sušiny na m^3 a den

může být dodáno do fermentoru, aniž dojde k takzvanému **překrmení** bakterií a zastavení procesu. [3]

Dále je potřeba zajistit **rovnoměrný přísun substrátu** a to v co možná nejkratších intervalech. (1-2x denně). Tímto se také zabrání poklesu teploty ve fermentoru a přispěje k větší teplotní stabilitě procesu. [3]

Pro zajištění vysoké produkce bioplynu, je také zapotřebí zajistit aby mohl plyn průběžně odcházet ze substrátu. Pokud tomu tak není, může dojít k nárůstu tlaku v nádrži fermentoru a případným škodám. V praxi se osvědčilo substrát několikrát denně promíchat a tím je zajištěno dostatečné **odplynění substrátu**. [3]

V neposlední řadě by měl proces probíhat v temném prostředí, **světlo** sice bakterie neničí, ale brzdí proces. [3]

2.2 Složení plynu

Jak už bylo zmíněno na začátku kapitoly, bioplyn je primárně (majoritně) tvořen směsí metanu a oxidu uhličitého, kde poměr mezi těmito plyny je dán skladbou živin v substrátu, teplotě a průběhu metanizace. Jejich součet představuje **téměř** 100 %obj. a u dobře prosperujících methanogenních organismů vždy převažuje obsah metanu. Procentuální zastoupení obou hlavních složek můžeme v literatuře najít různé, ale většinou se pohybuje od 50 do 85 %obj. Také platí, že čím je vyšší obsah metanu v plynu, tím je plyn kvalitnější a celkově hodnotnější. [1]

V praxi se však nemusíme vždy setkat s takto ideálním bioplynem. Může obsahovat celou řadu dalších plynů např. zbytky vzdušných plynů (O_2 , Ar), neúplně spotřebované produkty acidogeneze (H_2 , přebytek CO_2) a další minoritní a stopové příměsi (H_2S , N_2O , HCN, uhlovodíky a jejich deriváty většinou kyslíkaté i sirné). Jejich skladba je velice pestrá a jejich počet se odhaduje na 400 – 500 doposud objevených v bioplynech. Procentuální zastoupení minoritních složek je velice malé, v řádu mg/m^3 , ale v některých případech jde o technicky významné příměsi v plynu. Technicky významné protože jejich přítomnost, může způsobovat problémy při provozu celé technologie. [1]

Velice problematický je např. sulfan. Jeho množství je v některých případech takové, že se uvádí jako majoritní složka bioplynu (až 5 %obj) a jde o velice toxickou látku a látku způsobující korozi. Také křemík je často zmiňován, jako problematická příměs bioplynu, protože tvoří tvrdé nánosy ve spalovacích kogeneračních jednotkách a působí abrazivně[1]

Orientační objemové zastoupení jednotlivých plynů znázorňuje tabulka 2.1.

Tab 2.1 Složení bioplynu [4]

Plyn	Koncentrace
Metan CH_4	50 – 85 %obj
Oxid uhličitý CO_2	25 – 45 %obj
Voda H_2O	2 – 0 %obj
Sulfan H_2S	20- 20000ppm
Dusík N_2	< 2 %obj
Kyslík O_2	< 2 %obj
Vodík H_2	2 %obj

2.3 Zdroje biomasy

Anaerobní fermentací lze rozkládat v zásadě jakékoliv organické látky nebo alespoň z části.

Prakticky platí, že pevné a členité látky jako např. klestí a ořezy stromů, keřů jsou vhodné spíše ke kompostování (aerobní způsob). Naproti tomu kapalný, mokřý materiál jako např. kejda, zbytky jídla, tuky apod. se skvěle hodí pro anaerobní fermentaci, resp. výrobu bioplynu. [3]

Zdroje biomasy dělíme z hlediska jejího získávání na dvě základní skupiny:

- Biomasy odpadní
- Biomasy záměrně pěstovanou

BIOMASA ODPADNÍ

- Odpady z živočišné výroby: exkrementy (kejda, hnůj) z chovů hospodářských zvířat, zbytky krmiv, odpady z mléčnic a přidružených zpracovatelských kapacit
- Biologicky rozložitelné komunální odpady (BRKO): separovaný sběrový papír, kuchyňské odpady, organické zbytky z úpravy zeleně apod.
- Rostlinné zbytky ze zemědělské výroby a údržby krajiny: sláma, kukuřice, obiloviny.
- Organické odpady z průmyslových a potravinářských výrob: jateční a mlékárenské odpady, odpady z lihovarů (výpalky) a konzerváren, odpady z vinařských a dřevařských provozoven, dále odpady z výroby piva, škrobu apod.

BIOMASA ZÁMĚRNĚ PĚSTOVANÁ

- Kukuřice, žitná siláž z celých rostlin (GPS), řepa cukrovka, travní siláž.

Výčet možných zdrojů biomasy použitelných jako substrát pro výrobu bioplynu je veliký. Prakticky je ale nutné, aby výsledný substrát, který může obsahovat v podstatě libovolnou směs výše uvedených komponent, splňoval podmínky vhodné pro život methanogenních bakterií (viz. kap. 2.1.2 Podmínky prostředí)

Užití hnoje a kejdy se v praxi ukázalo jako nejvhodnější základ substrátu, dále tráva, obsah bacheru přežvýkavců, kuchyňské odpady, zbytky jídla, mláto a výpalky vykazují také dostatečné množství potřebných živin. [4]

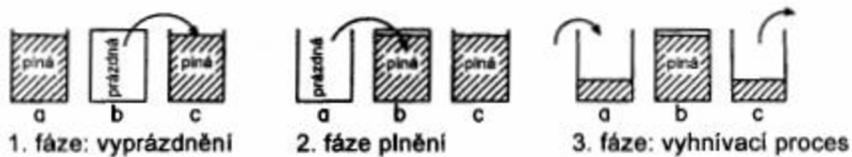
2.4 Bioplynové technologie

Jak bylo zmíněno v úvodu této práce, výroba a využití bioplynu je obor, ve kterém je stále prováděn intenzivní výzkum. Následkem toho existuje velké množství funkčních a osvědčených řešení výroby bioplynu resp. technologií zemědělských bioplynových stanic.

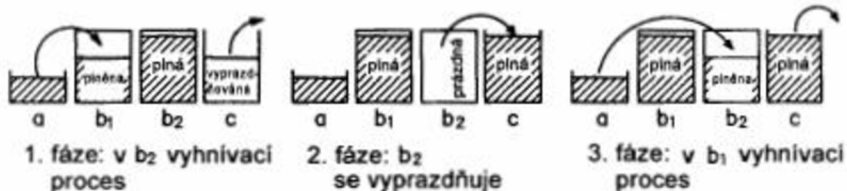
Jelikož rozebrat všechny doposud známé technologie výroby bioplynu není pro účely této práce nezbytné, bude tato kapitola pojednávat výhradně o technologiích výroby bioplynu na zemědělských bioplynových stanicích.

Pro přehled lze jednotlivé varianty bioplynových stanic zredukovat na několik technologických postupů (Obr. 2.4).

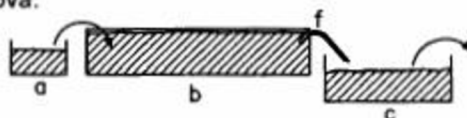
I Dávková metoda:



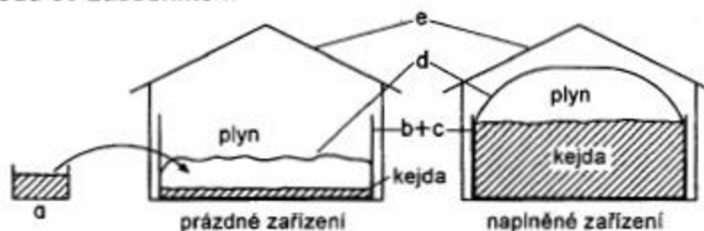
II Metoda střídání nádrží:



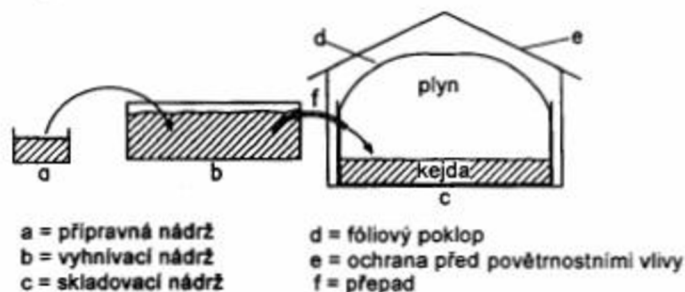
III Metoda průtoková:



IV Metoda se zásobníkem



V Metoda průtoková se zásobníkem na konci



Obr. 2.4 Typické bioplynové technologie [9]

V podstatě, lze postupy rozlišovat podle:

- Způsobu plnění: diskontinuální nebo kontinuální
- Počtu pracovních stupňů: jednostupňový, dvoustupňový nebo vícestupňový
- Konzistence substrátu: (obsah sušiny)
- Procesní teploty: psychofilní, mezofilní a termofilní

2.4.1 Způsob plnění

2.4.1.1 Diskontinuální

DÁVKOVÝ ZPŮSOB

U dávkového postupu (viz Obr. 2-4) se vyhnivací nádrž (fermentor) naplní najednou a dávka vyhnívá do konce doby kontaktu, aniž by se další substrát přidával nebo odčerpával. Produkce plynu po naplnění pomalu stoupá a po dosažení maxima začne klesat (viz Obr. 2-3). Na konci procesu se fermentor najednou vyprázdní. Nevyčerpá se úplně do prázdna, ale asi 5 – 10 % vyhnilého substrátu se ponechá pro naočkování další várky bakteriemi. [3]

Mezi hlavní výhody této technologie patří dobrá hygienizace substrátu, protože nedochází ke smíchání s čerstvým substrátem a často se používá při laboratorních testech. [3]

Avšak pro běžný provoz má tato technologie značné nedostatky. Aby bylo možné fermentor naplňovat a vyprazdňovat jedním rázem, musí být vedle něj postavena přípravná nádrž a skladovací nádrž o stejném objemu jako fermentor a to celý proces velice prodražuje. Dalším nedostatkem je nerovnoměrná výroba plynu. Řešením je fermentor rozdělit na dvě menší nádoby, to ale celou stavbu opět velice prodraží, protože postavit jednu velkou nádrž je levnější než stavět dvě menší. [3]

METODA STRÍDÁNÍ NÁDRŽÍ

Tato technologie pracuje se dvěma fermentory (viz Obr. 2-4), přípravnou a skladovací nádrží. Kde z přípravné, která pojme substrát získaný za jeden až dva dny, se prázdný první fermentor pomalu a rovnoměrně plní, zatímco druhý je plný a probíhá v něm vyhnivací proces. Když je první fermentor naplní, tak se obsah toho druhého najednou vyčerpá do skladovací nádrže. Ve chvíli, kdy je prázdný se začne opět pomalu plnit z přípravné nádrže čerstvým substrátem a celý cyklus se opakuje. Obsah skladovací nádrže je vyvážen např. jako hnojivo na pole. [3]

Výhodou tohoto postupu je rovnoměrná výroba plynu a dobrý hygienizační účinek, protože v době procesu vyhnívání se nedoplňuje čerstvý substrát, jako v případě dávkového způsobu. [3]

Nedostatky této technologie spočívají v použití dvou fermentorů, což je nákladnější než při použití jednoho fermentoru a také proto, že se musí nádrž při vyprazdňování zavzdušňovat, pokud není zásobník plynu dostatečně velký a naplněný tak aby zaplnil veškerý prostor místo odčerpaného vyhnilého substrátu. [3]

METODA SE ZÁSOBÍKEM

U této technologie (Obr. 2-4) jsou fermentor a skladovací nádrž spojené do jedné velké nádrže. Při vyvážení vyhnilého substrátu se zásobník vyprázdní až na malý zbytek (z důvodů naočkování čerstvého substrátu). Spojená vyhnivací a skladovací nádrž se poté začne pomalu plnit. [3]

Výhoda této technologie spočívá především v nízkých pořizovacích nákladech, protože stačí jedna velká nádrž. Dále je provoz této technologie jednoduchý. Navíc jde tato technologie použít při přebudování starých jímek na kejdu, což logicky celý proces dělá méně nákladným. [3]

Na druhou stranu má tato technologie nedostatky. Mezi ty nejdůležitější patří vysoké tepelné ztráty, protože se často používají foliové kryty fermentoru a samotná přebudovaná jímka na kejdu, také nevykazuje příliš dobré tepelně-

izolační vlastnosti. Proto jsou tato zařízení provozována v oblasti nižších teplot (20 až 25°C). [3]

2.4.1.2 Kontinuální

PRŮTOKOVÁ METODA

Na tomto principu pracuje většina BPS. Buď v čisté formě, nebo v kombinaci se zásobníkem (viz kombinovaná průtoková metoda se zásobníkem). Hlavní specifikum této technologie je, že fermentor je stále naplněn. Z přípravné nádrže je cca 1 až 2x denně přiváděn čerstvý substrát a zároveň je adekvátní množství vyhnílého substrátu odčerpáno do skladovací nádrže. Fermentor se vyprazdňuje pouze kvůli případným opravám nebo z důvodu odstranění sedimentů. [3]

Mezi hlavní přednosti této technologie patří rovnoměrná výroba plynu, dobré využití vyhnívajícího prostoru a tím i kompaktní a cenově příznivá konstrukce. Proces je také možno plně automatizovat, což vede ke snížení provozních nákladů na obsluhu. [3]

Nedostatkem této technologie je, že může dojít vlivem nesprávné technologie míchání substrátu ke smísení čerstvého a vyhnílého substrátu ve fermentoru a tím i ke ztrátě hygienizačního efektu. [3]

KOMBINOVANÁ PRŮTOKOVÁ METODA SE ZÁSOBNÍKEM

Jde o další vývojový stupeň průtokové metody (Obr. 2-4), kdy byla dříve otevřená skladovací nádrž dodatečně zaklopena foliovým krytem. Díky tomu lze získat dodatečný bioplyn. V praxi se ukázalo, že je takto možné získat další 20 až 40 % z celkové produkce bioplynu v zařízení. Jelikož není tato nádrž ani ohřívána a míchána, jsou celkové náklady na získání plynu minimální. [3]

2.4.2 Počet procesních stupňů

Proces vyhnívání substrátu a výrobu bioplynu lze provádět jednostupňově nebo vícestupňově. V jednostupňovém zařízení nedochází k rozdělení procesních fází vzniku bioplynu. Všechny fáze (hydrolýza, acidogeneze, acetogeneze, methanogeneze) probíhají zároveň v jedné nádrži. U plně promíchávaných zařízení souběžně ve stejném čase i prostoru a u zařízení ve směru toku nepromíchávaných v různých prostorech jedna za druhou. V případě použití dvoustupňového zařízení se rozdělí proces hydrolýzy a acidogeneze do jedné nádrže a acetogeneze a methanogeneze do druhé. Obě tyto metody mají hlavní zastoupení u zemědělských bioplynových stanic, přičemž jednostupňová více. [3][4]

Je možné se setkat i s vícestupňovými zařízeními, kdy jsou jednotlivé fáze vzniku bioplynu rozděleny do jednotlivých nádrží. Pořizovací cena takových zařízení je vyšší, protože je vždy levnější postavit jednu větší nádrž než několik menších. [3][4]

2.4.3 Konzistence substrátu

Podle konzistence substrátu, přesněji řečeno podle obsahu sušiny v substrátu můžeme technologii rozdělit na metodu mokré fermentace a metodu suché fermentace. Toto rozdělení je ve svém slovním pojetí zavádějící, protože z biologického hlediska bakterie podílející se na fermentačním procesu vyžadují kapalnou prostředí. [4]

Toto rozdělení vyplývá z praktických zkušeností, kdy za mokrou fermentaci využíváme substrát s maximálním obsahem sušiny mezi 12 – 15 %. Tato horní hranice je dána možností

čerpání substrátu. Při vyšším obsahu sušiny je substrát natolik tuhý, že je čerpání buď nemožné, nebo je zapotřebí enormní energie. [4]

Metoda mokré fermentace je doposud nejvíce rozšířená a vybraná řešení jsou rozebrána v kapitole **2.4.1 způsoby plnění**. Dnes už známo a používáno je nespočet různých řešení mokré fermentace a neustále se zlepšují, kombinují a zdokonalují. Výčet a hodnocení všech dostupných řešení ovšem není cílem této práce.

Metodu suché fermentace lze, jak bylo výše zmíněno, uvažovat při obsahu sušiny vyšším než 15 %. Tato metoda připadá v úvahu, pokud má provozovatel k dispozici stálý přísun např. nezkapalněného tuhého hnoje. Tato technologie ale není zatím příliš rozšířena a téměř vždy se jedná o vývojová a pilotní zařízení. Mezi hlavní problémy této technologie patří např. obtížná zpracovatelnost při dopravě do fermentoru a problémy při průchodu fermentorem. [3][4]

2.4.4 Procesní teplota

Podle procesní teploty lze technologie rozdělit na tři skupiny: psychrofilní, mezofilní, termofilní. Analogicky jde o druh použitých methanogenních bakterií. Jejich vlastnosti a specifika byly popsány v kapitole 2.1.2.

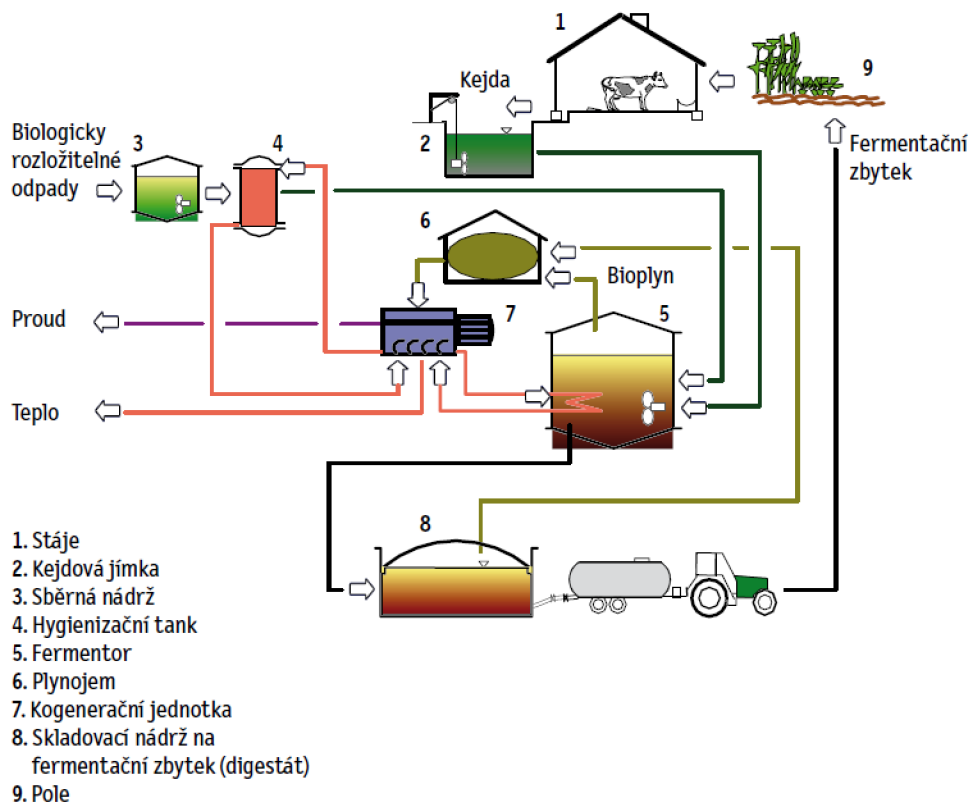
2.5 Schéma bioplynové stanice

Volba technologie výroby bioplynu je v první řadě závislá na substrátech, které jsou k dispozici. Množství zpracovaného substrátu je pak určujícím prvkem dimenzování veškerých komponent BPS (Velikost nádrží apod.). Při výběru technologie, hraje hlavní roli kvalita substrátu (obsah sušiny, struktura, původ). [4]

Podle složení dostupných substrátů, je často do procesu zařazena předúprava. V případě vysokého obsahu sušiny se substrát maceruje přidáním vody, nebo pokud je nezbytné zaručit hygienizační efekt, zařazuje se před samotnou fermentací hygienizační stupeň předúpravy. Po předpravě je substrát dopraven do fermentoru, kde je zfermentován.

Po ukončení fáze fermentace je fermentační zbytek uskladněn v zavřených dofermentorech nebo v otevřených nádržích fermentačních zbytků a zpravidla je vyvážen jako tekuté hnojivo na potřebné zemědělské plochy. [4]

Vzniklý bioplyn je následně upravován a uskladněn. U klasické bioplynové stanice (Obr. 2.5) je vyrobený bioplyn veden přímo na kogenerační jednotky, kde je spalován v pístových spalovacích motorech. Výstupem je elektrická energie a teplo. Generátory, které jsou poháněny spalovacími motory, dodávají proud přímo do sítě nebo mohou být v některých případech využity jako záložní zdroj el. energie v případě výpadku. Teplo je z části využito přímo k ohřevu fermentorů, a pokud to zvolená technologie vyžaduje, tak k účelům hygienizace substrátu. Další využití tepla už je silně závislé na lokalitě, kde je stanice, resp kogenerační jednotka umístěna a také na ročním období (více v kapitole 2.6).



Obr. 2.5 Schéma klasické bioplynové stanice [4]

2.6 Využití bioplynu

2.6.1 Kogenerace

Hlavním důvodem, proč je vyrobený bioplyn využíván výhradně jako palivo pro kogenerační jednotky, je zavedená podpora instalacím využívajícím obnovitelné zdroje energie pro výrobu el. energie. Tato podpora je ve formě garantovaných výkupních cen nebo tzv. zelené bonusu, což je příplatek k tržní ceně elektrické energie od distributora energie a vyrobenou elektrickou energii provozovatel sám prodává (spotřebovává) [8]

Hlavní nevýhodou kogenerace je problematické vyvedení tepla. Je to způsobeno tím, že bioplynové stanice jsou často lokalizovány daleko od větších obcí nebo měst, kde by bylo možné teplo využívat k vytápění nebo ohřevu užitkové vody. Mimo topnou sezónu a zejména pak v letních měsících je tento problém ještě větší, protože o teplo není zájem a také není téměř potřeba vyhřívat fermentory. Důsledkem toho je velká část energie obsažená v bioplynu bez užitku mařena.

Dalším aktuálním problémem je v některých lokalitách obsazení kapacity elektrických sítí provozovateli fotovoltaických elektráren. [8]

2.6.2 Upgrading bioplynu

V poslední době cena silové elektřiny klesá a zároveň dochází k velkému útlumu jednotlivých forem bonusů spojených s výrobou elektrické energie z bioplynu. Na základě těchto faktů a také ve snaze o co největší využití energie obsažené v bioplynu, jsou vyvíjeny metody tzv. upgradingu bioplynu. Jinak řečeno jde o čištění bioplynu na úroveň zemního

plynu, kdy je ze surového bioplynu snížen obsah oxidu uhličitého resp. zvýšen obsah metanu. A dále jsou z plynu odstraněny nežádoucí příměsi, jako je: voda, H₂S, kyslík, dusík, vyšší uhlovodíky, halogen deriváty uhlovodíků a organokřemičité sloučeniny. [8] [10]

Takto vyčištěný plyn, který obsahuje více jak 95 % obj. metanu, je pak dále možno využít jako náhrada klasického zemního plynu a nazýváme ho biometan. Vyčištěný biometan je buď rovnou vtlačěn do distribuční sítě zemního plynu (v ČR velice hustá síť), nebo pokud tato síť není v blízkosti BPS, je možné tento plyn vtlačet do trailerů, tzv virtuálních plynovodů a plyn tak dopravit nákladními vozy tam kde je ho potřeba. Pokud je plyn stlačen, tak aby vyhovoval normě pro bioCNG, je ho možné využívat přímo jako palivo pro osobní či nákladní dopravu. [10]

Tato úprava bioplynu má několik zásadních výhod:

- Jedná se o velice ušlechtilé palivo, které je možné využít stejně jako klasický zemní plyn.
- Obnovitelný, regulovatelný a skladovatelný zdroj energie
- V porovnání s ostatními biopalivy nejvyšší energetická účinnost

2.6.2.1 Biometan

Biometan je definován jako bioplyn upravený na kvalitu a čistotu potrubního zemního plynu. Jeho požadavky na kvalitu se pro jednotlivé státy mírně liší. V české republice byly tyto požadavky definovány změnou technických pravidel TPG 902 02 “Jakost a zkoušení plyných paliv s vysokým obsahem metanu“, které jsou uvedeny v tabulce 2.2.

Avšak v TPG 902 02 jsou definované parametry jen doporučení. Provozovatel distribuční sítě může požadovat i jiné (přísnější) parametry plynu v případě, že je biometan vtlačěn do distribuční sítě. [8]

Tab. 2.2 Požadavky na kvalitu plynu – výňatek z TPG 902 02 [8]

Parametr	Hodnota
Obsah metanu	Min. 95,0 % mol.
Obsah vody	Max. -10 °C
Vyjádřený jako teplota rosného bodu vody při předávacím tlaku	
Obsah kyslíku	Max. 0,5 % mol.
Obsah oxidu uhličitého	Max. 5,0 % mol.
Obsah dusíku	Max. 2,0 % mol.
Obsah síry (bez odorantů)	Max 30 mg · m ⁻³
Obsah merkptonové síry (bez odorantů)	Max 5 mg · m ⁻³
Obsah sulfanu	Max 7 mg · m ⁻³
Obsah amoniaku	nepřítomen
Halogenové sloučeniny	Max 1,5 mg (Cl+F) · m ⁻³
Organické sloučeniny křemíku	Max 6 mg (Si) · m ⁻³
Mlha, prach, kondenzáty	nepřítomny

V případě, že bude biometan sloužit jako palivo do motorových vozidel, jeho požadavky na kvalitu stanovuje norma ČSN 65 6514 (Tab. 2.3)

Tab. 2.3 Požadavky na kvalitu plynu - výňatek z normy ČSN 65 6514 [7]

Vlastnosti	Jednotka	Požadavky Typ LH		Požadavky Typ H	
		min.	max.	min.	max.
Výhřevnost vyjádřena jako Wobbeho číslo nebo obsah metanu	MJ/m ³ % (V/V)	44,7 96	46,4 98	43,9 95	47,3 99
Oktanové číslo motorovou metodou	-	130		130	
Rosný bod vody, kde t = nejnižší průměrná měsíční teplota	°C	t-5		t-5	
Obsah vody	Mg/m ³	32		32	
Suma obsahu oxidu uhličitého + kyslíku + dusíku Z toho kyslík	% (V/V)	4,0 1,0		5,0 1,0	
Celkový obsah síry	Mg/m ³	10		10	
Celkový obsah dusíkatých nečistot (kromě N ₂) jako NH ₃	Mg/kg	20		20	
alkoholy		nedetekovatelný		nedetekovatelný	

POZNÁMKA: Pro účely této normy vyjadřuje „% (V/V)“ objemový zlomek.

Mezi další důležité právní předpisy v oblasti biometanu patří:

- Technické doporučení GAS TPG 983 01 – „vtlačení bioplynu do plynárenských sítí, požadavky na kvalitu a měření“,
- ZÁKON č. 485/2000 Sb., o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon), v plném znění,
- VYHLÁŠKA č. 108/2011 Sb., o měření plynu a o způsobu stanovení náhrady škody při neoprávněném odběru, neoprávněné dodávce, neoprávněném uskladňování, neoprávněné přepravě nebo neoprávněné distribuci plynu,
- ZÁKON o metrologii č. 505/1990 Sb., v plném znění,
- VYHLÁŠKA č. 345/2002 Sb., kterou se stanoví měřidla k povinnému ověřování a měřidla podléhající schválení typu, v plném znění. [8]
- VYHLÁŠKA č. 459/2012 Sb., o požadavcích na biometan, způsob měření biometanu a kvality biometanu dodávaného do přepravní soustavy, distribuční soustavy

2.6.2.2 Podpora biometanu v ČR

Senát Parlamentu České republiky dne 13. září 2013 schválil novelu zákona o podporovaných zdrojích energie. Jedná se o návrh zákona, kterým se mění zákon č. 165/2012 Sb., zákon č. 407/2012 Sb., a další související zákony. Tímto krokem se fakticky **zastavuje možnost čerpat podporu** pro nově vybudované elektrárny využívající OZE, včetně bioplynových stanic a s tím spojená výroba biometanu. V současné době je výroba biometanu podporována jen formou nulové spotřební daně. [13]

2.6.2.3 Technologie úpravy bioplynu na biometan

Existuje celá řada technologií umožňující zvýšit podíl metanu v produkovaném bioplynu. Jednotlivé technologie se od sebe liší v principu separace, komplexnosti, kdy některé metody odstraňují jen některé nežádoucí složky plynu a robustnosti (kapacitních možnostech).

Tyto technologie lze rozdělit do čtyř hlavních skupin na základě principu separace jednotlivých složek. [8]

- Adsorbce:
 - Metoda střídání tlaků (PSA – Pressure Swing Adsorption)
- Absorbce
 - Fyzikální: tlaková vodní vypírka (PWA – Pressure Water Absorption, DWW – Water Scrubbing)
 - Chemická vypírka – Chemical Scrubbing
 - Nízkotlaká absorbce – Low Pressure Absorption
- Membránová separace (Membrane separation)
- Nízkoteplotní rektifikace – vymražování CO₂ (Cryogenic upgrading)

Zatím se v reálném provozu uplatňují nejvíce technologie PSA a tlaková vodní vypírka případně je místo vody použit jiný roztok. Velice slibnou technologií z pohledu energetických a prostorových nároků se jeví membránová separace, která bude rozebrána podrobněji v následujících kapitolách. [8]

Širšímu nasazení těchto technologií čištění bioplynu zatím brání několik překážek.

- Fakt, že tyto technologie, jsou často velice nákladné na provoz a také mají vysokou pořizovací cenu
- Nedostatečné znalosti a zkušenosti s technologiemi výroby biometanu.
- Nejistota investorů, v “nové“ oblasti využití bioplynu
- Neucelená a nedostatečná legislativa.

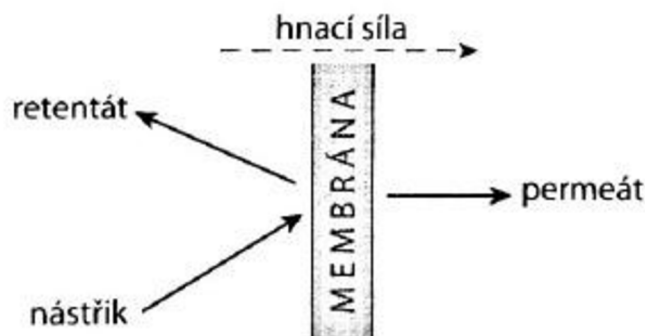
2.6.3 Ostatní možnosti využití

Mezi méně časté využití bioplynu patří např. trigenerace. Zde je vedle výroby el. energie a tepla vyráběn i chlad. Bioplyn je také možné přímo spalovat termicky nebo katalyticky, za účelem získání tepla. [8]

3 Membránová separace

3.1 Obecný popis membránové separace

Tato metoda je založena na selektivní polopropustné tenké membráně. Membrána zde plní roli základního separačního elementu. Princip separace spočívá v tom, že zpracovávaná surovina (nástřík), je přiváděna na aktivní vrstvu membrány, kde některé komponenty směsi membránou procházejí (permeát) a jiné jsou membránou zadržovány (retentát) viz Obr. 3.1.



Obr. 3.1 Princip membránové separace [6]

Výkon a efektivita dané membrány jsou určeny dvěma základními parametry. Selektivitou membrány a intenzitou toku permeátu membránou (propustnost membrány). Intenzitu toku lze definovat jako objem tekutiny, který projde membránou za určitý čas vztažený na jednotku plochy membrány. [5]

$$J = \frac{1}{A} \cdot \frac{dV_p}{d\tau} \quad (3.2)$$

J - intenzita toku permeátu

A - separační plocha membrány

V_p - objem permeátu

τ - čas

Selektivitu membrány vůči směsi látek vyjadřujeme pomocí součinitele retence, R. Při membránovém procesu je separovaná látka částečně nebo zcela zachycena, zatímco zbytek neseperovaných látek směsi procházejí volně membránou. Retence je dána rovnicí: [5]

$$R = \frac{c_F - c_P}{c_F} = 1 - \frac{c_P}{c_F} \quad (3.2)$$

c_F – koncentrace separované složky ve vstupním proudu (nástříku)

c_P – koncentrace látky v permeátu

Retence R je bezrozměrná veličina a mění se v rozmezí od 0 – 1. Kdy při nulové hodnotě retence celá směs látek prochází volně membránou a při hodnotě 1 dojde k úplné retenci látky, tedy všechna separovaná látka je zachycena membránou a zbytek směsi membránou

volně prochází jako retentát. V tomto případě se jedná o ideální polopropustnou membránu. [5]

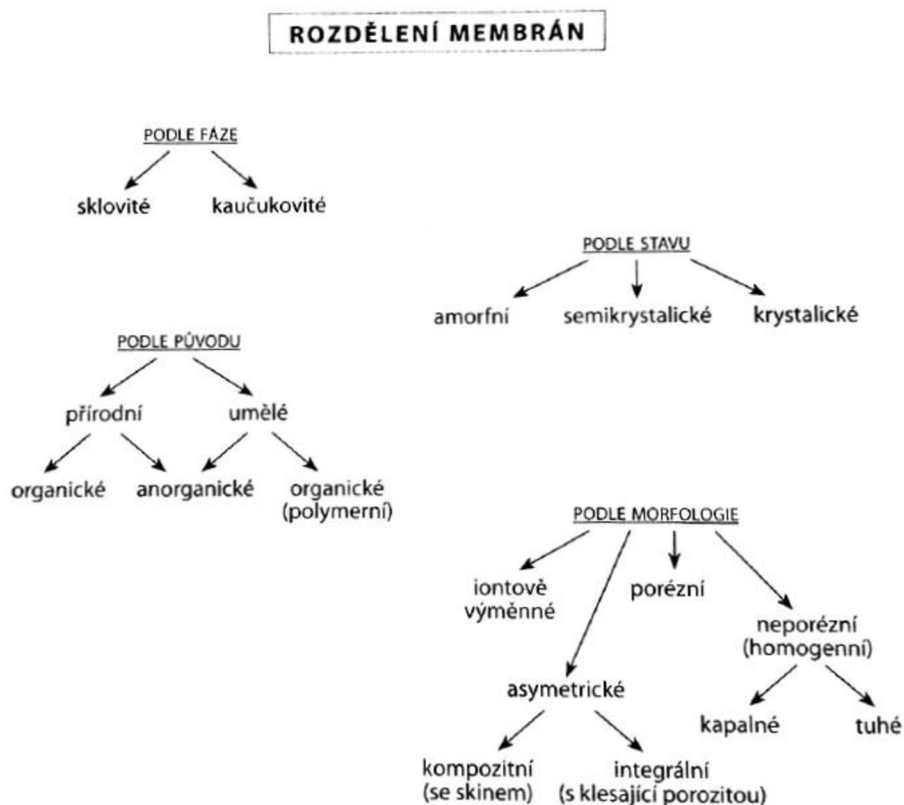
V praxi vždy hledáme membránu s optimálním poměrem selektivity a propustnosti. Většinou platí, že membrána s velkou selektivitou má malou propustnost a naopak. Mezi další vlastnosti, které membrány musí splňovat, jsou: dostatečná mechanická odolnost a chemická stálost. [2][6]

3.1.1 Typy membrán

V každém separačním procesu plní membrána funkci pasivní nebo aktivní bariéry. Separální membrány separují na základě několika mechanismů nebo jejich kombinací. [12]

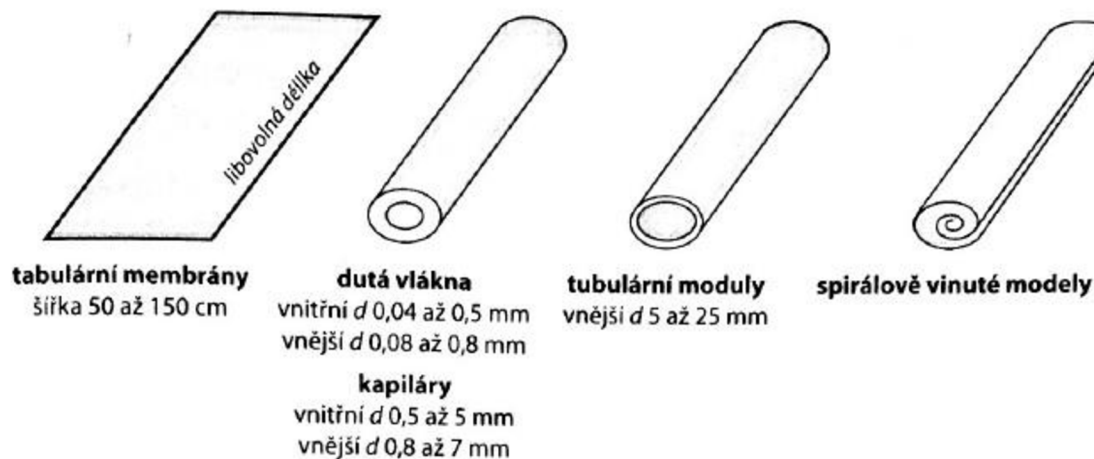
- Na základě různé velikosti částic (síťový mechanismus)
- Na základě různé afinity složek směsi k materiálu membrány a jejich různé rychlosti difuze membránou (mechanismus rozpouštění-difuze)
- Na základě elektrochemických interakcí mezi složkami směsi a materiálem membrány. [12]

Rychlost transportu membránou závisí na velikosti hnacích sil, pohyblivosti a koncentraci jednotlivých složek v membráně. Hnacími silami mohou být gradienty chemického potenciálu (tlaku a koncentrace), elektrického potenciálu, teploty a tíhového zrychlení. Separální membrány se klasifikují podle několika parametrů, tak jak je znázorněno na Obr. 3.2. [6]



Obr. 3.2 Rozdělení separačních membrán [5]

Separální membrány jsou vyráběny ve formě plochých listů (tabulární), trubic (tubulární), vinutých spirál nebo dutých vláken (Obr. 3.3). [sep. Plynu a par]



Obr. 3.3 Tvar separačních membrán [6]

3.1.2 Membránové materiály

Separční membrány mohou být vyrobeny z jakéhokoliv materiálu, ze kterého je možné vyrobit tenkou folii se separačními vlastnostmi pro určité látky a naopak propustnou pro jiné. Nejrozšířenějším materiálem pro přípravu membrán jsou polymery, ale stále více se uplatňují i membrány z keramiky. Do budoucna je perspektivním materiálem i mikroporézní uhlík, a to především ve formě dutých vláken získaných pyrolýzou polymerů. Dále je také možné vyrobit membrány ze skla či kovů. [12]

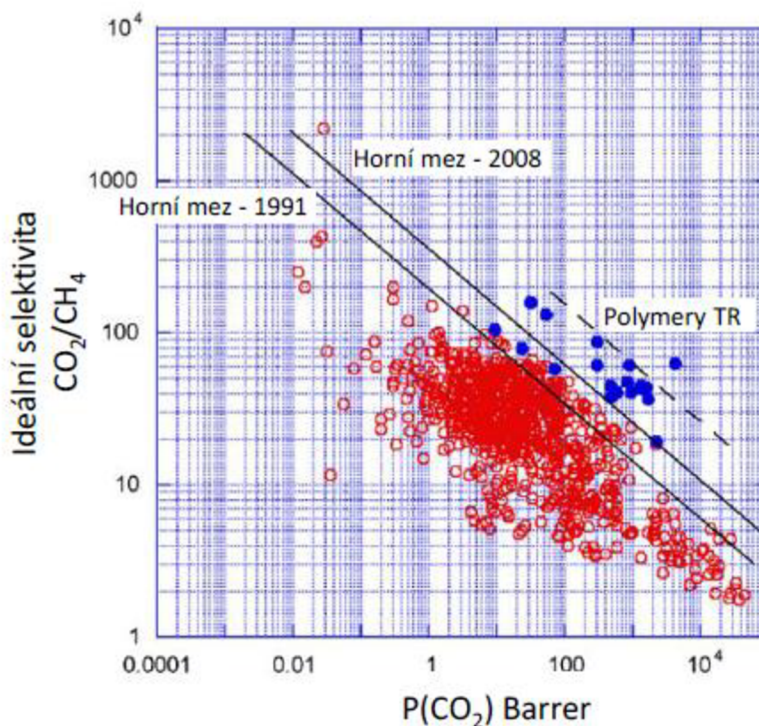
Protože se tato práce zabývá membránovou separací plynu resp. bioplynu, budou dále rozebrány některé komerčně úspěšné separační membrány pro separaci plynů.

Materiály pro separaci plynů lze rozdělit na tři základní typy dle povahy separační vrstvy:

- Polymerní materiály
- Anorganické materiály
- Heterogenní materiály (např. smíšené matrice nebo kompozity)

Účinnost separace plynů membránami se porovnává na základě tzv. Robesonova diagramu (Obr. 3-4). V tomto diagramu osa Y reprezentuje ideální selektivitu binárního systému (CO_2/CH_4) a osa X permeabilitu přednostně procházeného plynu. Hodnoty jsou uváděny většinou v jednotkách Barrer: [11]

Snahou je dostat se v tomto diagramu nad “horní mez“, která představuje membrány s největší selektivitou a zároveň i permeabilitou. Obr. 3.4 dále ukazuje, že od roku 1991 se podařilo výzkumem hranici posunout, ale doposud žádný významný průlom této hranice nenastal. Hlavním důvodem tohoto faktu je, že v podstatě všechny polymery, pro které tato hranice platí. Pracují na základě stejného separačního mechanismu a to rozpustně-difuzního. Nové polymerní membrány musejí být zásadně modifikovány, aby byly schopné separace i dalším mechanismem a byly tak schopné tuto hranice výrazněji překročit. [11]



Obr. 3.4 Robesonův diagram pro směs plynů CO₂/CH₄ [11]

Polymerní membrány tvoří naprostou většinu komerčně úspěšných membrán. Je to dáno faktem, že polymerní membrány mají řadu zásadních výhod. Jsou většinou levné a umožňují snadné zpracování do geometrické formy asymetrických dutých vláken i plochých kompozitních membrán. Velice výhodné je pro průmyslové aplikace jejich velký povrch v malém membránovém modulu. Na druhou stranu nevýhody polymerních materiálů spočívají ve fyzikálních vlastnostech a citlivost na chemicky agresivní prostředí. V Tab. 3.1 je uvedeno několik komerčně úspěšných polymerních materiálů.[6]

Tab. 3.1 Materiály polymerních membrán [6]

Kaučukové polymery	Sklovité polymery
Etylenoxid/propylenoxid – amid	Acetát celulosy – CA
Kopolymery – PEO/PO	polyperfluorodioxoly
Poly(dimethylsiloxan) – PDMS	Polykarbonáty – PC
	Polyamidy – PI
	Polyfenylenoxid – PPO
	Polysulfon – PSF
	Poly(trimethylsilylpropyn) – PTMSP

Anorganické membrány založené na oxidech, uhlíku nebo neporézních kovech na rozdíl od polymerních materiálů vykazují dobrou teplotní odolnost, stabilitu v rozpouštědlech a plastifikačních činidlech a vykazují lepší selektivitu a permeabilitu. Jejich širší nasazení brání omezená mechanická stabilita (jsou křehké) a problémy s teplotní roztažností, která významně komplikuje výrobu membránových modulů a činí tak vysoké náklady na výrobu.[6]

Heterogenní membránové materiály jsou tvořeny směsí polymerů s plnivem, jako je např. SiO₂, zeolity nebo uhlíková vlákna, často v podobě nanočástic. Výsledný materiál se pak

nazývá nanokompozit nebo smíšená matrice. Důvodem vzniku těchto materiálů je zlepšení vlastností materiálu a tím samotné membrány. Modifikace je zajištěna přidáním plniva, které přispívá k separaci dalším mechanismem. Dosud jsou tyto materiály ve fázi laboratorního výzkumu a na trhu není zatím dostupná žádná heterogenní membrána. Tyto membrány by měly ležet nad horní hranicí Robesonova diagramu.[6]

V oblasti separace bioplynu neustále probíhá intenzivní vývoj, díky tomu se vyvíjí další materiály vhodné pro jeho separaci. Mezi zástupce nejnovějších trendů separace bioplynu membránovými procesy patří např.:

- Tepelně modifikované polymery
- Kapalné membrány
- Zakotvené iontové membrány
- Vodní kondenzující membrány

3.1.3 Membránové moduly

Aby byla technologie membránová separace v praxi použitelná, je nezbytné umístit membránu do pouzdra, které je označováno jako membránový modul. Tento modul tvoří hlavní část celého zařízení. Pro zajištění technicky a ekonomicky přijatelného provozu je třeba, aby membránové moduly splňovali některé vlastnosti. [5]

- Co největší specifickou plochu membrán
- Takové hydraulické podmínky, aby byl co nejmenší vliv zvyšování koncentrace zadržované složky v blízkosti povrchu membrány
- Malou náchylnost na znečištění
- Možnost snadného čištění
- Nízkou cenu
- Schopnost jednoduché výměny membrán

Variant membránových modulů existuje mnoho, lze je však rozdělit na dva základní typy. Tubulární a plošné moduly. Deskové a spirálně vinuté moduly obsahují plošné membrány, moduly trubkové, kapilární a s dutými vlákny jsou tvořeny tubulárními membránami. Obecně platí, že separační technologie obsahuje několik modulů, které jsou uspořádány podle technických a ekonomických požadavků provozu. Jejich základní charakteristiky jsou uvedeny v tabulce 3.2. [5]

Tab. 3.2 Přehled vlastností membránových modulů [5]

Charakteristika	Typ modulu			
	Spirálně vinutý	Dutá vlákna	trubkový	deskový
Plocha připadající na jednotku objemu (m^2 na 1m^3)	600 – 1000	3000 – 6000	70 – 150	300 – 600
Typické rychlosti nástřiku ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	0,3 – 0,8	0,005 – 0,05	1 – 8	0,8 – 1,6
Tlaková ztráta na nástřikové straně (kPa)	300 – 600	10 – 30	50 – 300	100 – 500
Tendence k zanášení	Vyšší	Vyšší	Nízká	Střední
Snadnost čištění	Špatná až dobrá	Špatná	Výborná	Dobrá
Doporučená filtrační předprava nástřiku (filtr o velikosti pórů)	10 – 25 μm	5 – 10 μm	Není třeba	10 – 25 μm
Relativní náklady na získání jednotky objemu permeátu	Nízké	Nízké	Vysoké	Vysoké

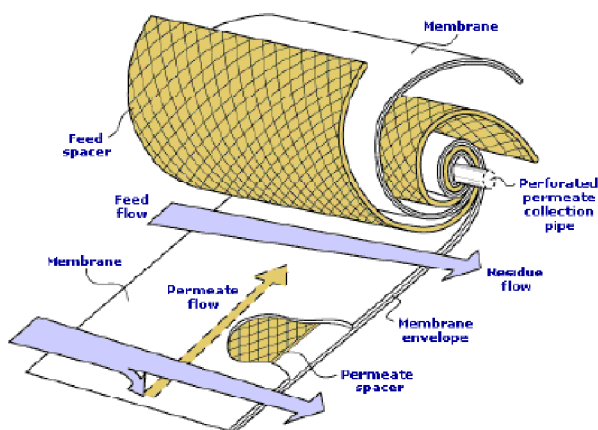
Pro průmyslovou separaci plynů se používají membránové moduly buď spirálně vinuté, nebo s dutými vlákny. [2]

SPIRÁLNĚ VINUTÉ MODULY

Spirálně vinuté membránové moduly (Obr. 3.5) jsou v podstatě membrány a rozdělovací sítky navinuté na centrální sběrnou trubici. Dvojice membrán je přiložena permeátovou stranou k sobě a po okraji slepena. Nástřik je do modulu přiváděn axiálně a permeát prochází membránou radiálně a je odváděn centrální trubkou.

Hlavní výhoda těchto modulů spočívá v dosažení dobrého poměru membránové plochy k objemu zařízení viz. Tab. 3.2.

Jako nedostatek tohoto modulu se jeví hlavně obtížné čištění. [5]



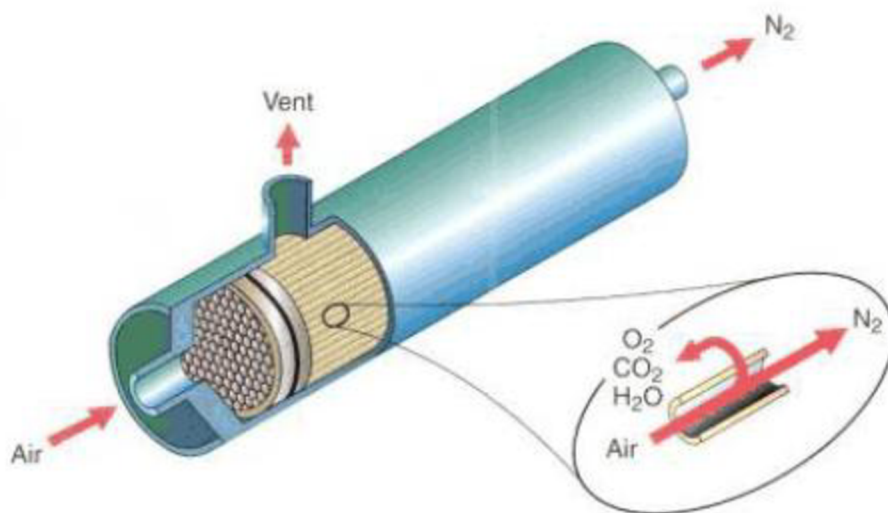
Obr. 3.5 Spirální membránový modul [2]

MODULY S DUTÝMI VLÁKNY

Membránové moduly s dutými vlákny (Obr. 3.6) jsou v mnohém podobné trubkovým výměníkům tepla. Vlákna jsou sdružena do svazku, ve kterém je několik tisíc vláken, které jsou na koncích utěsněné v pouzdře modulu. Mohou být požitý v různých konfiguracích. Např. s nástřikem do prostoru mezi dutými vlákny nebo přímo do dutých vláken. Dále lze nalézt konfiguraci s permeátem v protiproudu nebo souproudu s retentátem nebo i moduly umožňující promývání permeátové strany nosným plynem. [6]

Hlavní výhodou těchto modulů je velmi vysoká hodnota poměru membránové plochy na objem modulu. V některých literaturách je uváděno až $30\,000\text{ m}^2/\text{m}^3$. [6]

Nevýhoda těchto modulů spočívá obecně ve vyšší citlivosti na kvalitu separované směsi a její předpravy. Např. je zde kladen požadavek na nižší obsah pevných částic, zbytků oleje a dalších látek, které zanášejí membránu. Dále bývá požadován provoz za vyšších teplot, než je rosný bod přiváděné směsi. Případná kondenzace par může zapříčinit dočasnou nebo úplnou ztrátu separačních vlastností membrány. [6]



Obr. 3.6 Membránový modul s dutými vlákny [2]

3.2 Popis technologie MemBrain

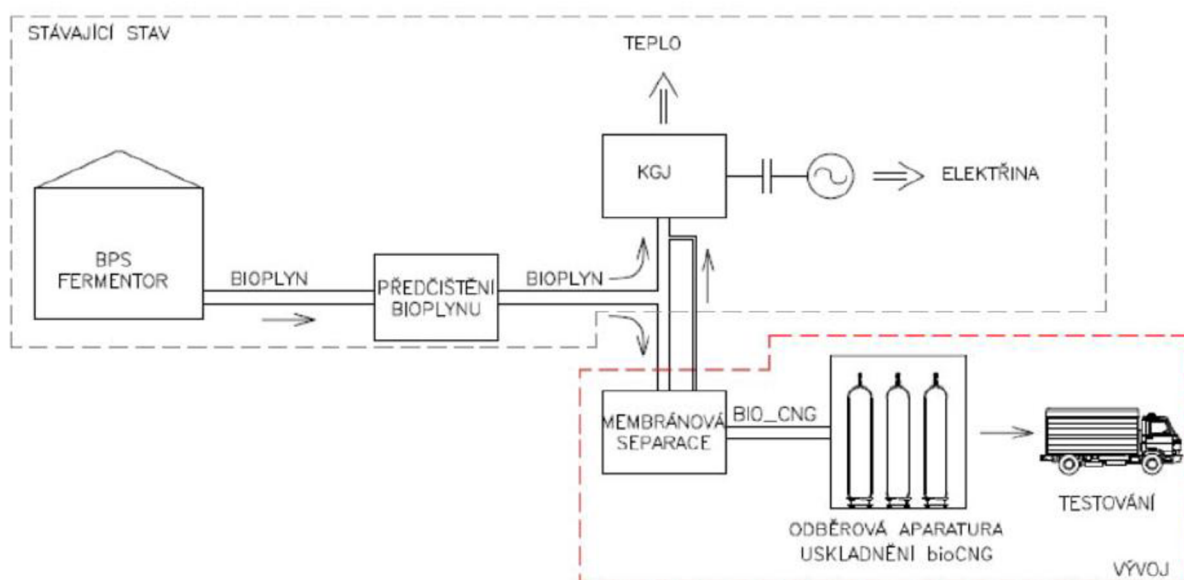
Doposud se práce zabývala teoretickými poznatky z oblasti bioplynové technologie a membránové separace. V následujících kapitolách se bude práce věnovat reálnému zařízení membránové separace, které je implementováno a provozováno na reálné bioplynové stanici, kde čistí surový bioplyn na úroveň zemního plynu resp. bioCNG. [10]

Toto zařízení vzniklo na základě spolupráce společností skupiny VÍTKOVICE MACHINERY GROUP, kteří jsou jak dodavateli BPS, plnicích stanic CNG a virtuálních plynovodů, tak i provozovateli automobilů a lokomotiv na CNG a společnosti MemBrain s.r.o., která vyvinula membránovou technologii. [10]

Jedná se o experimentální mobilní kontejnerovou jednotku, na které probíhá ověřování funkčnosti technologie membránové separace. Zařízení vzniklo v rámci projektu TE02000077 „Smart Regions – Buildings and Settlements. Information Modelling, Technology and Infrastructure for Sustainable Development“ v rámci programu Technologické agentury České republiky „Centra kompetence“. [10]

3.2.1 Zapojení zařízení membránové separace

Zapojení výzkumného kontejneru a celkové koncepční řešení je znázorněno na Obr. 3.7. Stávající stav je ohraničen černě, kde je vyrobený bioplyn využíván jen pro pohon kogeneračních jednotek. V červeném rámečku je pak znázorněna implementovaná technologie, kde dochází k čištění bioplynu na úroveň zemního plynu, včetně jeho uskladnění a následného testování. [10]



Obr. 3.7 Koncepční řešení zapojení membránové separace [10]

Technologie membránové separace (výzkumný kontejner) je propojena se stávající bioplynovou stanicí tak, že na výstupním potrubí z fermentorů, ve strojovně fermentorů BPS je zařazena odbočka, za kterou je instalováno dmyhadlo pro zvýšení tlaku bioplynu pro potřeby dopravy dostatečného množství bioplynu do membránové technologie. Bioplyn je dále veden potrubím ze strojovny fermentorů do zařízení membránové separace nacházející se uvnitř kontejneru mimo strojovnu fermentorů. Schéma propojení technologie membránové separace a bioplynové stanice je patrné z obrázku 3.8. [10]



Obr. 3.10 Detail vyvedení přívodního potrubí ze strojovny fermentorů

Na dalších obrázcích 3.11 a 3.12 je vidět napojení potrubí permeátu na stávající vedení bioplynu, kde se permeát mísí se surovým bioplynem a dále pokračuje do kogeneračních jednotek.



Obr. 3.11 Umístění výzkumného kontejneru a napojení permeátu na stávající potrubí bioplynu



Obr. 3.12 Detail napojení potrubí permeátu na stávající potrubí surového bioplynu

3.2.2 Technologie membránové separace

Samotná technologie se skládá z několika dílčích zařízení, které jsou schematicky znázorněny na obrázku 3.13.

Do technologie vstupuje bioplyn za mírného přetlaku cca 0,05 bar (5 kPa) díky dmychadlu umístěném ve strojovně fermentorů. Plyn putuje do STL rozvodu dle technických doporučení ČSN 38 6405, ČSN 75 6415 a TD 304 02 přes solenoidový ventil řízený centrálním řídicím systémem, za kterým následuje pojistný kohout pro případ výpadku proudu. Na vstupní větvi možnost mechanické regulace v určitém omezeném intervalu. Plyn poté vstupuje do prvního kondenzačního tepelného výměníku (sušička 1), který se skládá z rekuperační a kondenzační části, kde dojde k odstranění prvního definovaného množství vody ze surového bioplynu. Pak jde bioplyn do absorpční kolony, kde je zbaven sulfanu H_2S . [14]

Dále je zařazen středotlaký kompresor, kde je bioplyn stlačen na 10 – 12 bar (1,0 – 1,2 MPa) a veden do VTL rozvodu dle technických doporučení ČSN 38 6405, ČSN 75 6415 a TD 304 02 přes olejový filtr do druhého kondenzačního tepelného výměníku, kde dojde opět k odstranění vodního podílu z bioplynu, aby bioplyn splňoval normu na rosný bod. V tomto místě je bioplyn tlačěn do dvou sériově zapojených membránových modulů, kde dojde k separaci metanu od oxidu uhličitého na minimální čistotu 95%, která je požadována normou ČSN 65 6514, která je hlídána online analyzátozem. [14]

Takto vyseparovaný biometan jde dále na sání vysokotlakého kompresoru s maximálním výstupem 230 bar (23 MPa) a dále do VVTL plynovodu dle technických doporučení ČSN 38 6405, ČSN 75 6415 a TD 304 02, který jim plní zásobní tlakové láhve pro možnost výdeje přes tlakový rozdělovač a výdejní panel ve formě bioCNG. [14]

Druhý proud (permeát), se vrací do stávajícího potrubí bioplynu, kde se smísí a jde dále do kogeneračních jednotek.

Poslední výstup z kontejneru je kondenzát z technologie, který je jímám v plastovém kontejneru a zneškodňován ve stávajícím odpadovém hospodářství BPS. [14]

Tato konkrétní instalace potřebuje pro svůj provoz 11-13 m³/h bioplynu, což je zhruba 5% celkové produkce bioplynu v BPS.

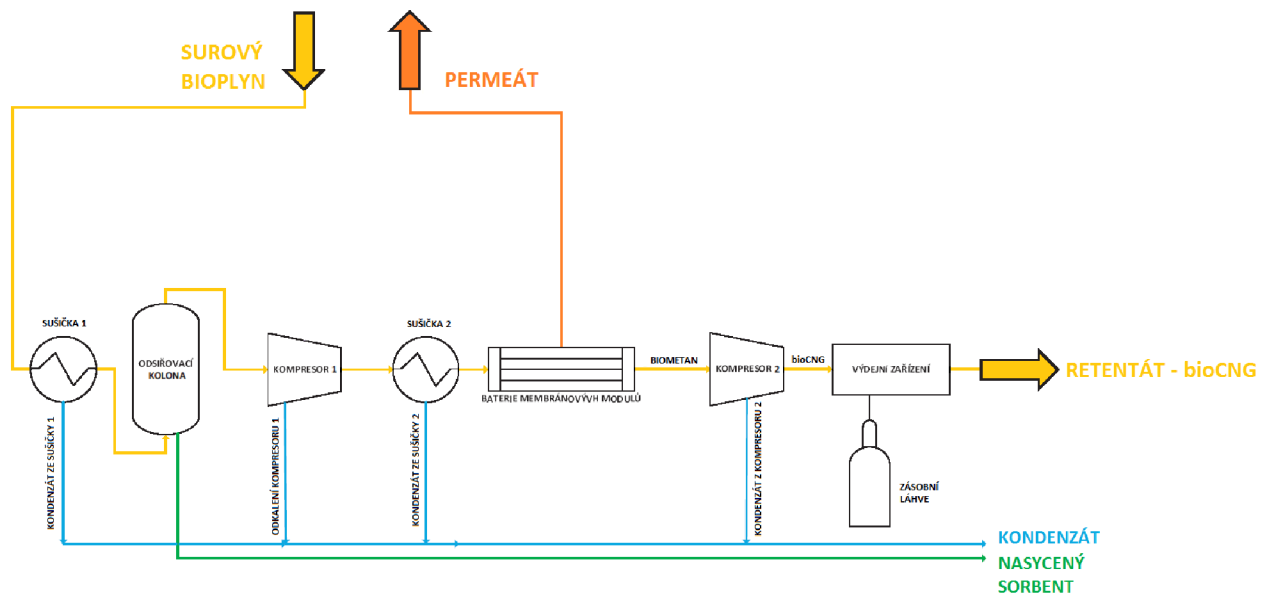
Jednotka je určena pouze pro separaci plynů případně i nekondenzujících par. Proto jakékoliv pevné částice, s charakteristickým rozměrem minimálně 5 μm, které by mohly zanechat membránový modul a velice citlivé měřicí a regulační prvky, musejí být odstraněny. [14]

V praxi se technologie vykazuje výborné výsledky separace. Požadovaných kapacit technologie dosahuje vždy, když BPS produkuje bioplyn bez většího množství dusíku. Limitní hodnota N₂ v surovém bioplynu je pro tuto technologii 4,5 obj%, které musí trvat omezenou dobu cca do 1 hodiny. [10]

V následující tabulce 3.3 jsou uvedeny základní parametry této technologie membránové separace.

Tab. 3.3 Parametry technologie membránové separace [10]

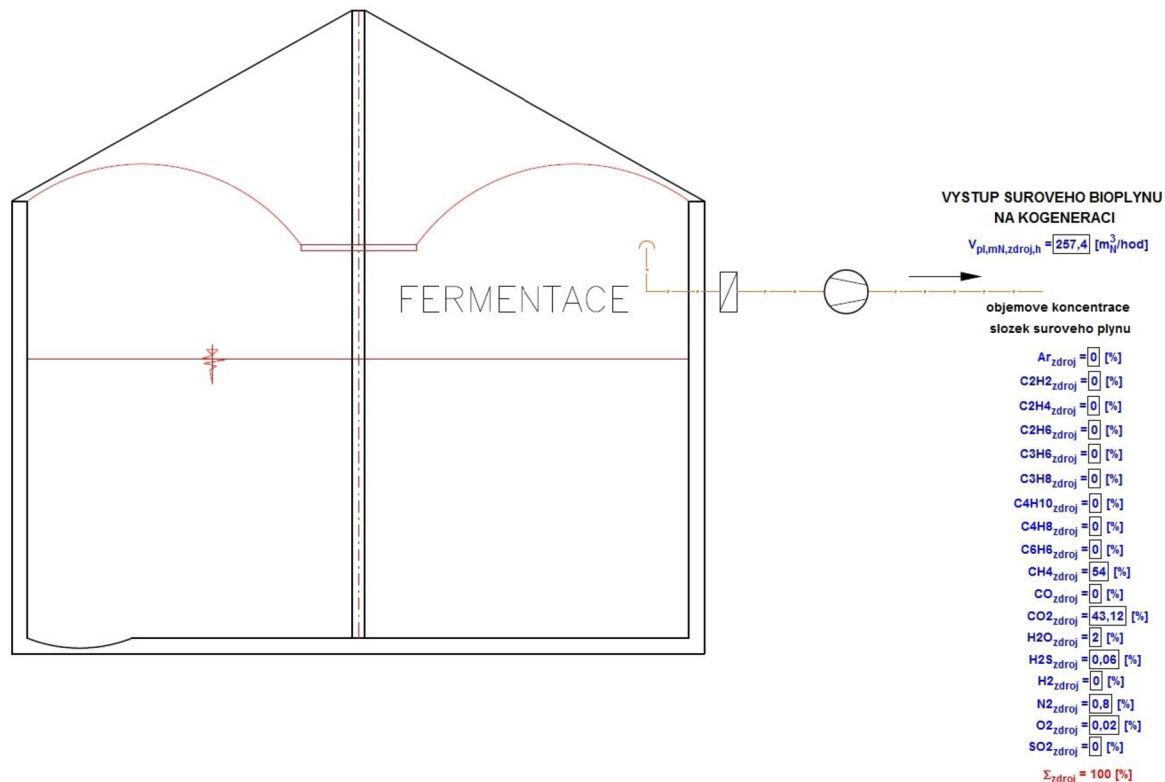
Veličina	Jednotka	Hodnota
Vstup bioplynu do technologie	Nm ³ /h	11-13
Tlak bioplynu do technologie	bar _g	Cca 0,2
Charakteristika bioplynu	%obj. CH ₄	50 – 65
Výstup bioCNG z technologie	Nm ³ /h	5,5-7
Charakteristika bioCNG (ČSN 65 6514)	%obj. CH ₄	>95
Kapacita zásobních láhví	kg	148
Rozměry technologie (š x v x d)	m	2,5 x 2,5 x 6
Elektrický příkon technologie	kW	10-12



Obr. 3.13 Blokové schéma technologie membránové separace MemBrain

4 Materiálová a energetická bilance

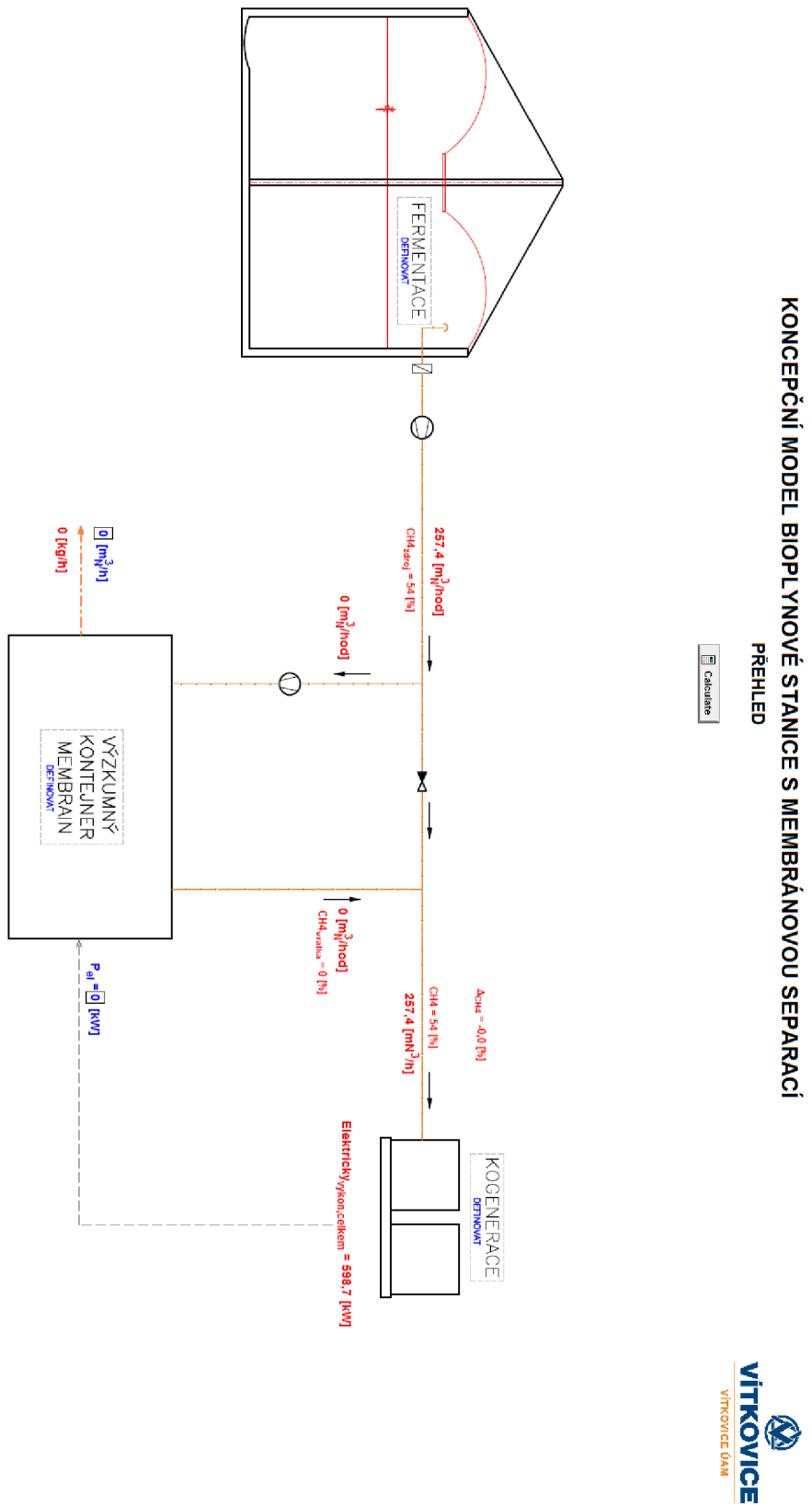
Bioplynová stanice produkuje surový bioplyn, který obsahuje složky: CH₄, CO₂, H₂O, N₂, H₂S a O₂. Jejich koncentrace a celkový tok je vyobrazen na Obr. 4.1. Tyto hodnoty jsou naměřeny přímo na BPS a tvoří vstup do bilančních výpočtů.



Obr. 4.1 Reálné složení bioplynu

4.1 Provoz BPS bez technologie membránové separace

Ke stanovení elektrického výkonu, který produkují kogenerační jednotky je využito výpočetního matematického modelu, který popisuje děje probíhající při spalování bioplynu v kogeneračních jednotkách. Do modelu vstupují data uvedená na Obr. 4.1, což jsou parametry bioplynu vystupujícího z fermentorů, které jsou přímo naměřené na BPS.



(c) VITKOVICE ÚAM 2015, Mláček, Konečná, Vilímec

Obr. 4.2 Provoz BPS bez membránové separace

V této konfiguraci produkují KJ 598,7 kW. Tato hodnota je dále použita jako retenční pro zjištění ovlivnění provozu implementací membránové technologie.

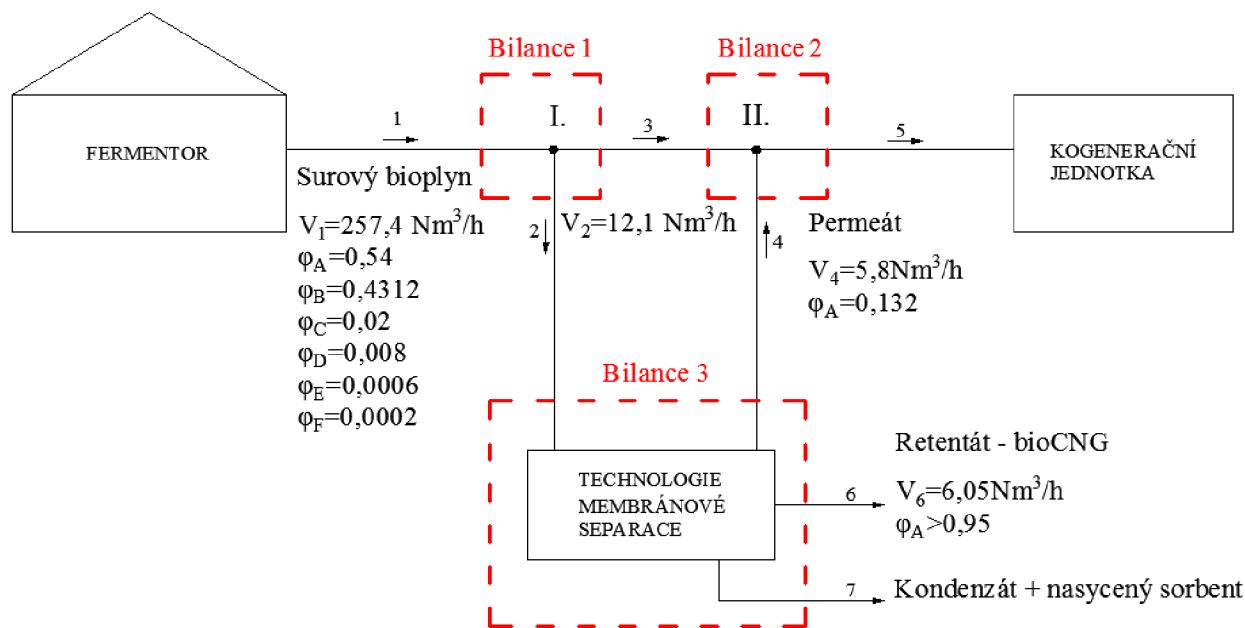
4.2 Provoz BPS s implementovanou technologií membránové separace

Bilanční výpočty ovlivnění provozu bioplynové stanice jsou založeny na datech naměřených přímo na výzkumném kontejneru. Jsou to data naměřená v jednom okamžiku a jejich hodnota (zejména obj. toky) je zaokrouhlena.

Toto prvotní zjednodušení je možné učinit hned z několika důvodů. Tím prvním je fakt, že je v technologii zpracováván jen zlomek (cca 5%) celkového vyprodukovaného bioplynu v BPS a proto se nepředpokládá významné ovlivnění provozu. Za další je třeba zmínit, že obsah jednotlivých složek v bioplynu není konstantní a v průběhu fermentace se v určitém rozsahu mění.

Bilance zahrnuje některá další zjednodušení a úpravy, které jsou v průběhu výpočtu popsány a odůvodněny.

Na obrázku 4.3 jsou vyobrazena veškerá vstupní data. Jednotlivé proudy jsou značeny číslicemi 1-7 a uzly velkými římskými číslicemi I a II. Dále jsou zde vyznačeny hranice jednotlivých bilančních systémů.



Obr. 4.3 Vstupy a hranice bilance

Za účelem přehlednosti výpočtů jsou jednotlivým složkám plynu přiřazeny indexy podle tabulky 4-1.

Tab 4.1 Indexy složek plynu

Složka	Index
CH ₄	A
CO ₂	B
H ₂ O	C
N ₂	D
H ₂ O	E
O ₂	F

4.2.1 Bilance uzlu I (bilance 1)

V této bilanci je neznámou pouze objemový tok V_3 , koncentrace složek plynu jsou ve všech proudech stejné, protože se jedná pouze o odbočku a nic se zde nemísí ani neseparuje.

Obj. tok proudu 3:

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_2 + \dot{V}_3 \quad (4.1)$$

$$\dot{V}_3 = \dot{V}_1 - \dot{V}_2 = 257,4 - 12,1 = 245,3 \frac{Nm^3}{h}$$

4.2.2 Bilance Technologie (bilance 2)

V bilanci technologie jsou zavedeny dvě další úpravy. Tou první je 100% účinnost separace vody a sulfanu v sušičkách resp. absorpční koloně. Proto vyseparovaná voda odchází společně se sulfanem pouze v odpadním proudu 7.

Obj. tok proudu 7:

$$\dot{V}_7 = \dot{V}_2 \cdot \varphi_{C_2} + \dot{V}_2 \cdot \varphi_{E_2} = \dot{V}_2 \cdot (\varphi_{C_2} + \varphi_{E_2}) \quad (4.2)$$

$$\dot{V}_7 = 12,1 \cdot (0,02 + 0,0006) = 0,249 \doteq 0,25 \frac{Nm^3}{h}$$

Koncentrace H₂O v proudu 7:

$$\dot{V}_2 \cdot \varphi_{C_2} = \dot{V}_7 \cdot \varphi_{C_7} \Rightarrow \varphi_{C_7} = \frac{\dot{V}_2 \cdot \varphi_{C_2}}{\dot{V}_7} \quad (4.3)$$

$$\varphi_{C_7} = \frac{12,1 \cdot 0,02}{0,249} = 0,971 \Rightarrow 97,1 \%$$

Koncentrace H₂S v proudu 7:

$$\dot{V}_2 \cdot \varphi_{E_2} = \dot{V}_7 \cdot \varphi_{E_7} \Rightarrow \varphi_{E_7} = \frac{\dot{V}_2 \cdot \varphi_{E_2}}{\dot{V}_7} \quad (4.4)$$

$$\varphi_{E_7} = \frac{12,1 \cdot 0,0006}{0,249} = 0,0292 \Rightarrow 2,9 \%$$

Druhou úpravou je zavedení účinnosti separace dusíku a kyslíku separační membránou. Kde, na stranu permeátu přechází 90 % kyslíku a 10 % dusíku a na stranu retentátu 90 % dusíku a 10% kyslíku. Jde spíše o doplnění, aby se výpočet bilance co možná nejvíce přiblížil skutečným dějům probíhajících při separaci.

Obj. tok N₂ a O₂ v proudu 2:

$$\dot{V}_{D_2} = \dot{V}_2 \cdot \varphi D_2 = 12,1 \cdot 0,008 = 0,097 \frac{Nm^3}{h} \quad (4.5)$$

$$\dot{V}_{F_2} = \dot{V}_2 \cdot \varphi F_2 = 12,1 \cdot 0,0002 = 0,0024 \frac{Nm^3}{h} \quad (4.6)$$

Obj. tok N₂ a O₂ v proudu 4:

$$\dot{V}_{D_4} = \dot{V}_{D_2} \cdot 0,1 = 0,097 \cdot 0,1 = 0,0097 \frac{Nm^3}{h} \quad (4.7)$$

$$\dot{V}_{F_4} = \dot{V}_{F_2} \cdot 0,9 = 0,0024 \cdot 0,9 = 0,0022 \frac{Nm^3}{h} \quad (4.8)$$

Koncentrace N₂ a O₂ v proudu 4:

$$\varphi D_4 = \frac{\dot{V}_{D_4}}{\dot{V}_4} = \frac{0,0097}{5,8} = 0,0017 \Rightarrow 0,17 \% \quad (4.9)$$

$$\varphi F_4 = \frac{\dot{V}_{F_4}}{\dot{V}_4} = \frac{0,0022}{5,8} = 0,0004 \Rightarrow 0,04 \% \quad (4.10)$$

Obj. tok N₂ a O₂ v proudu 6:

$$\dot{V}_{D_6} = \dot{V}_{D_2} \cdot 0,9 = 0,097 \cdot 0,9 = 0,087 \frac{Nm^3}{h} \quad (4.11)$$

$$\dot{V}_{F_6} = \dot{V}_{F_2} \cdot 0,1 = 0,0024 \cdot 0,1 = 0,00024 \frac{Nm^3}{h} \quad (4.12)$$

Koncentrace N₂ a O₂ v proudu 6:

$$\varphi D_6 = \frac{\dot{V}_{D_6}}{\dot{V}_6} = \frac{0,087}{6,05} = 0,014 \Rightarrow 1,4 \% \quad (4.13)$$

$$\varphi F_6 = \frac{\dot{V}_{F_6}}{\dot{V}_6} = \frac{0,00024}{6,05} = 0,00004 \Rightarrow 0,004 \% \quad (4.14)$$

Další etapou výpočtu je vyčíslení koncentrací hlavních sledovaných složek plynu a to metanu CH₄ a oxidu uhličitého CO₂.

Koncentrace CO₂ v proudu 4:

$$\varphi B_4 = 100 - \varphi A_4 - \varphi D_4 - \varphi F_4 \quad (4.15)$$

$$\varphi B_4 = 100 - 13,2 - 0,17 - 0,04 = 86,59 \%$$

Koncentrace CH₄ a CO₂ v proudu 6:

$$\dot{V}_2 \cdot \varphi A_2 = \dot{V}_4 \cdot \varphi A_4 + \dot{V}_6 \cdot \varphi A_6 \quad (4.15)$$

$$\varphi A_6 = \frac{\dot{V}_2 \cdot \varphi A_2 - \dot{V}_4 \cdot \varphi A_4}{\dot{V}_6} = \frac{12,1 \cdot 0,54 - 5,8 \cdot 0,132}{6,05} = 0,954 \Rightarrow 95,4 \%$$

$$\varphi B_6 = \frac{\dot{V}_2 \cdot \varphi B_2 - \dot{V}_4 \cdot \varphi B_4}{\dot{V}_6} = \frac{12,1 \cdot 0,4312 - 5,8 \cdot 0,866}{6,05} = 0,032 \Rightarrow 3,2 \% \quad (4.16)$$

4.2.3 Bilance uzlu II (bilance 3)

Obj. tok proudu 5:

$$\dot{V}_5 = \dot{V}_3 + \dot{V}_4 = 245,3 + 5,8 = 251,1 \frac{Nm^3}{h} \quad (4.1)$$

Koncentrace CH₄, CO₂, N₂, O₂ v proudu 6:

$$\dot{V}_5 \cdot \varphi A_5 = \dot{V}_3 \cdot \varphi A_3 + \dot{V}_4 \cdot \varphi A_4 \quad (4.17)$$

$$\varphi A_5 = \frac{\dot{V}_3 \cdot \varphi A_3 + \dot{V}_4 \cdot \varphi A_4}{\dot{V}_5} = \frac{245,3 \cdot 0,54 + 5,8 \cdot 0,132}{251,1} = 0,5306 \Rightarrow 53,06 \%$$

$$\varphi B_5 = \frac{\dot{V}_3 \cdot \varphi B_3 + \dot{V}_4 \cdot \varphi B_4}{\dot{V}_5} = \frac{245,3 \cdot 0,431 + 5,8 \cdot 0,866}{251,1} = 0,4412 \Rightarrow 44,12 \% \quad (4.18)$$

$$\varphi D_5 = \frac{\dot{V}_3 \cdot \varphi D_3 + \dot{V}_4 \cdot \varphi D_4}{\dot{V}_5} = \frac{245,3 \cdot 0,008 + 5,8 \cdot 0,0017}{251,1} = 0,0079 \Rightarrow 0,79 \% \quad (4.19)$$

$$\varphi F_5 = \frac{\dot{V}_3 \cdot \varphi F_3 + \dot{V}_4 \cdot \varphi F_4}{\dot{V}_5} = \frac{245,3 \cdot 0,0002 + 5,8 \cdot 0,0004}{251,1} = 0,0002 \Rightarrow 0,02 \% \quad (4.20)$$

Koncentrace H₂O a H₂S v proudu 6:

$$\dot{V}_5 \cdot \varphi C_5 = \dot{V}_3 \cdot \varphi C_3 \quad (4.21)$$

$$\varphi C_5 = \frac{\dot{V}_3 \cdot \varphi C_3}{\dot{V}_5} = \frac{245,3 \cdot 0,02}{251,1} = 0,0195 \Rightarrow 1,95 \%$$

$$\varphi E_5 = \frac{\dot{V}_3 \cdot \varphi E_3}{\dot{V}_5} = \frac{245,3 \cdot 0,006}{251,1} = 0,058 \Rightarrow 0,06 \% \quad (4.22)$$

4.2.4 Vyhodnocení ovlivnění provozu

Rozdíl koncentrace CH₄ a CO₂ v proudu 1 a 5:

$$\Delta\varphi A = \varphi A_1 - \varphi A_5 = 0,54 - 0,5306 = 0,0094 \Rightarrow 0,94 \% \quad (4.23)$$

$$\Delta\varphi B = \varphi B_5 - \varphi B_1 = 0,4412 - 0,4312 = 0,001 \Rightarrow 1,00 \% \quad (4.24)$$

Rozdíl obj. toku na vstupu do KJ

$$\Delta\dot{V} = \dot{V}_1 - \dot{V}_5 = 257,4 - 251,1 = 6,3 \frac{Nm^3}{h} \quad (4.25)$$

Pro přehlednost jsou veškeré hodnoty obj. toků a koncentrací ve všech proudech bilance znázorněny v tabulce 4.2.

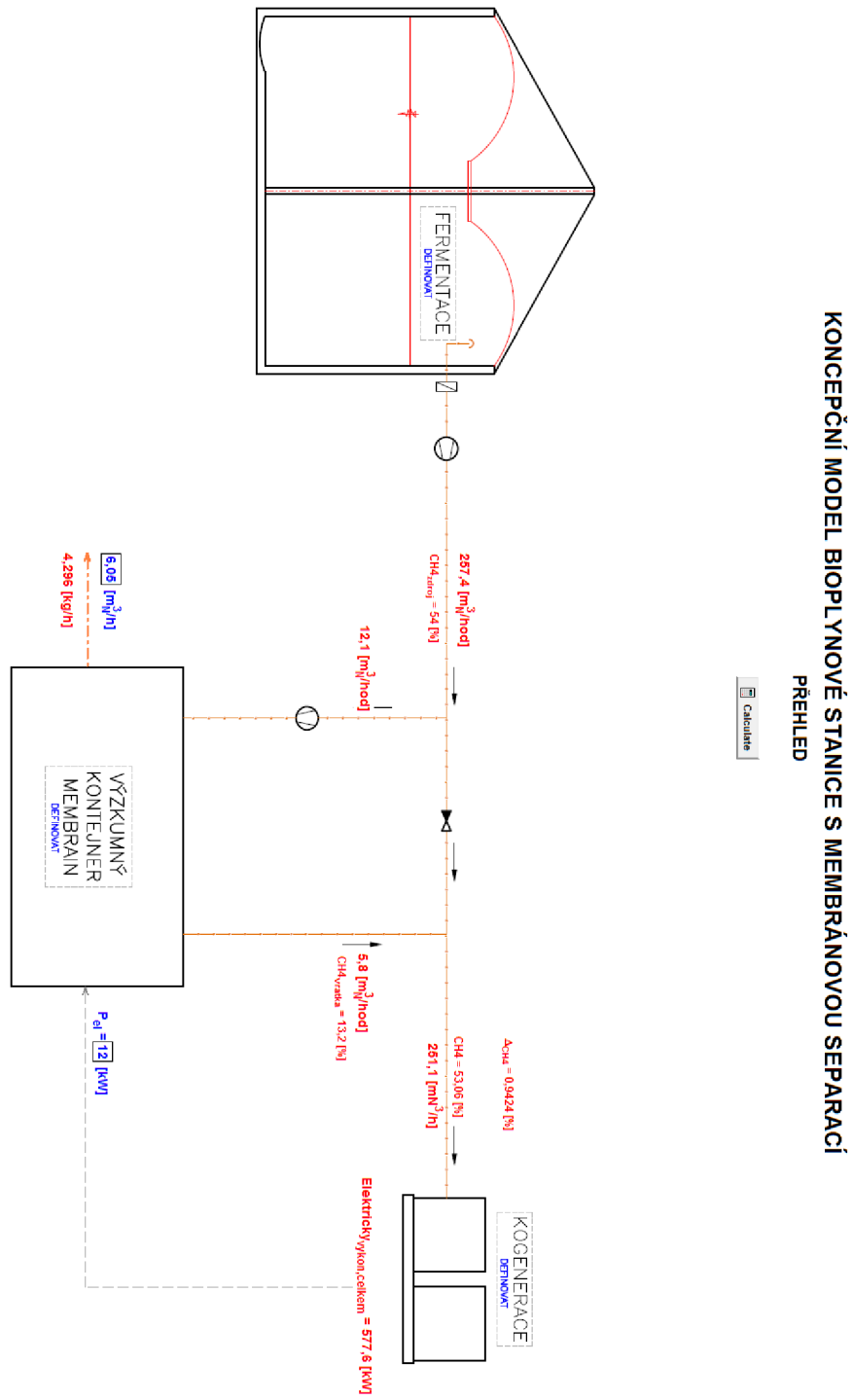
Tab 4.2 Výsledky bilance

	Proud 1	Proud 2	Proud 3	Proud 4	Proud 5	Proud 6	Proud 7
Obj. tok	257,40	12,10	245,30	5,80	251,10	6,05	0,25
CH ₄ [%]	54,00	54,00	54,00	13,20	53,06	95,40	-
CO ₂ [%]	43,12	43,12	43,12	86,59	44,12	3,20	-
H ₂ O [%]	2,00	2,00	2,00	-	1,95	-	97,1
N ₂ [%]	0,80	0,80	0,80	0,17	0,79	1,40	-
H ₂ S [%]	0,06	0,06	0,06	-	0,06	-	2,9
O ₂ [%]	0,02	0,02	0,02	0,04	0,02	0,00	-
∑ [%]	100	100	100	100	100	100	100

Z výsledků bilančních výpočtů je patrné, že vyčištěný biometan (proud 6) splňuje požadavky dané normou 65 6514 a může být použit jako palivo do motorových vozidel.

Za účelem zjištění ovlivnění provozu BPS resp. výkonu kogeneračních jednotek, je důležitý proud 5. Veškeré hodnoty tohoto proudu jsou opět zadány jako vstup do matematického výpočetního modelu kogeneračních jednotek.

(C) VITKOVICE ÚAM 2015, Mláček, Kováčik, Vilimec



Obr. 4.3 Provoz BPS s membránovou separací

Z obrázku 4.3 je patrná hodnota výkonu kogeneračních jednotek 577,6 kW. Rozdíl výkonu KJ s a bez membránové separace

$$\Delta P = P_{KJ1} - P_{KJ2} = 598,7 - 577,6 = 21,1 \text{ kW} \quad (4.26)$$

Výsledná hodnota elektrického výkonu kogeneračních jednotek s implementovanou technologií membránové separace je 565,6 kW. Technologie má za následek snížení produkce elektrické energie BPS o 21,1 kW.

5 Technicko – ekonomické vyhodnocení

5.1 Ovlivnění provozu BPS

Na začátek je třeba zmínit, že toto konkrétní zapojení membránové separace nese jisté specifikum. A to že jsou různí provozovatelé BPS a výzkumného kontejneru membránové separace. Plyn vstupující do kontejneru je nakupován od provozovatele BPS za dohodnutou fixní cenu 6,59 Kč/Nm³ surového bioplynu.

Při ekonomickém vyhodnocení ovlivnění provozu BPS je potřeba určit výchozí stav, tj. stav, kdy je veškerý produkovaný bioplyn využit jako palivo pro kogenerační jednotky, které produkují el. energii a teplo. Vyprodukované teplo není při vyhodnocení uvažováno, protože je využito pro interní účely a do této ekonomické bilance nezasahuje.

Naproti tomu el. energie je vykupována. Výkupní cena el. energie je stanovena na základě cenového rozhodnutí energetické regulačního úřadu č. 8/2015, kde tato bioplynová stanice spadá do kategorie AF2 a výkupní cena je stanovena na 3550 Kč/MWh. [18]

Zisk z prodeje el. energie bez membránové separace:

$$Zisk_{hod}^{bez\ mem.\ sep.} = P_{KJ1} \cdot \text{výkupní cena} = 598,7 \cdot 3,55 = 2125,4 \text{ Kč/hod} \quad (5.1)$$

Referenční hodnota zisku BPS prodejem el. energie je stanovena na 2125,4 Kč/hod. Při zapojení kontejneru s membránovou separací je výsledný výkon KJ snížen o 21,1 kW a proto je ovlivněn i výsledný zisk z prodeje el. energie.

$$Zisk_{hod}^{el.} = P_{KJ2} \cdot \text{výkupní cena} = 577,6 \cdot 3,55 = 2050,48 \text{ Kč/hod} \quad (5.2)$$

Další zisk BPS je generován prodejem surového bioplynu, k účelům membránové separace.

$$Zisk_{hod}^{sur.\ bioplyn} = \dot{V}_2 \cdot \text{Cena}_{sur.\ bioplyn} = 12,1 \cdot 6,59 = 79,74 \text{ Kč/hod} \quad (5.3)$$

Celkový zisk BPS s membránovou separací:

$$Zisk_{hod}^{s\ mem.\ sep.} = Zisk_{hod}^{el.} + Zisk_{hod}^{sur.\ bioplyn} \quad (5.4)$$

$$Zisk_{hod}^{s\ mem.\ sep.} = 2050,48 + 79,74 = 2130,22 \text{ Kč/hod}$$

$$Zisk_{hod}^{bez\ mem.\ sep.} \approx Zisk_{hod}^{s\ mem.\ sep.}$$

Jak je vidět, z ekonomického hlediska nebyl provoz BPS implementací technologie membránové separace téměř vůbec ovlivněn, protože celkový zisk se téměř nezměnil.

5.2 Stanovení ceny vyčištěného bioCNG

Při uvažování o nasazení této technologie do komerčního provozu je potřeba zajistit, aby výsledný produkt byl na trhu konkurenceschopný a byla tím zajištěna rentabilita celého zařízení.

V první řadě je potřeba znát cenu výsledného produktu (biometanu resp. bioCNG), který při prodeji bude generovat zisk.

Tato cena se skládá z několika dílčích částí, které jsou uvedeny v Tab. 5.1.

Tab 5.1 Provozní náklady

Položka	Cena
Surový bioplyn	6,59 [Kč/Nm ³]
El. energie	2,6 [Kč/kWh]
Obsluha	180 [Kč/den]
Servis	7,8 [Kč/den]

Nejpodstatnější položka při tvorbě výsledné ceny produktu (bioCNG) je cena vstupní suroviny (surový bioplyn). Jak bylo řečeno, tato cena je výsledkem dohody mezi provozovateli BPS a výzkumného kontejneru.

Další položky jsou servis a obsluha. Zde jsou zahrnuty náklady na údržbu kompresorů (servisní prohlídky a výměny olejů), náklady na údržbu separačních modulů (kontrola výkonu, těsnosti), dále náklady na sorbent pro odsíření a revize tlakových a jiných zařízení a náklady na mzdové ohodnocení technika, který chodí výzkumný kontejner 1x denně kontrolovat.

Poslední položkou je vlastní spotřeba elektrické energie celé technologie membránové separace.

Kalkulace ceny je provedena tak, že jsou sečteny hodinové náklady na provoz a poděleny hodinovou produkcí bioCNG.

$$Cena_{bioCNG}^{Nm^3} = \frac{Cena_{sur.bioplynu} \cdot \dot{V}_2 + Cena_{kWh} \cdot P_{MS} + \frac{cena_{obsluha}}{24} + \frac{cena_{servis}}{24}}{\dot{V}_6} \quad (5.1)$$

$$Cena_{bioCNG}^{Nm^3} = \frac{6,59 \cdot 12,1 + 2,6 \cdot 12 + \frac{180}{24} + \frac{7,8}{24}}{6,05} = 19,63 \text{ Kč bez DPH}$$

Protože cena za 1Nm³ není běžně uváděna, provedeme přepočítání na 1kg výsledku podělením hustotou. Hustota CNG se dá určit přímo ze složení plynu, ale pro účely toto jednoduchého výpočtu je zvolena $\rho_{bioCNG} = 0,71 \text{ kg/m}^3$, která odpovídá reálnému měření.

$$Cena_{bioCNG}^{kg} = \frac{Cena_{bioCNG}^{Nm^3}}{\rho_{bioCNG}} = \frac{19,63}{0,71} = 27,65 \text{ Kč bez DPH} \quad (5.2)$$

Koeficient daně:

$$koeficient\ daně = \frac{100}{21} = 0,21 \quad (5.3)$$

Výpočet DPH:

$$DPH = 27,65 \cdot 0,21 = 5,81 \text{ Kč} \quad (5.4)$$

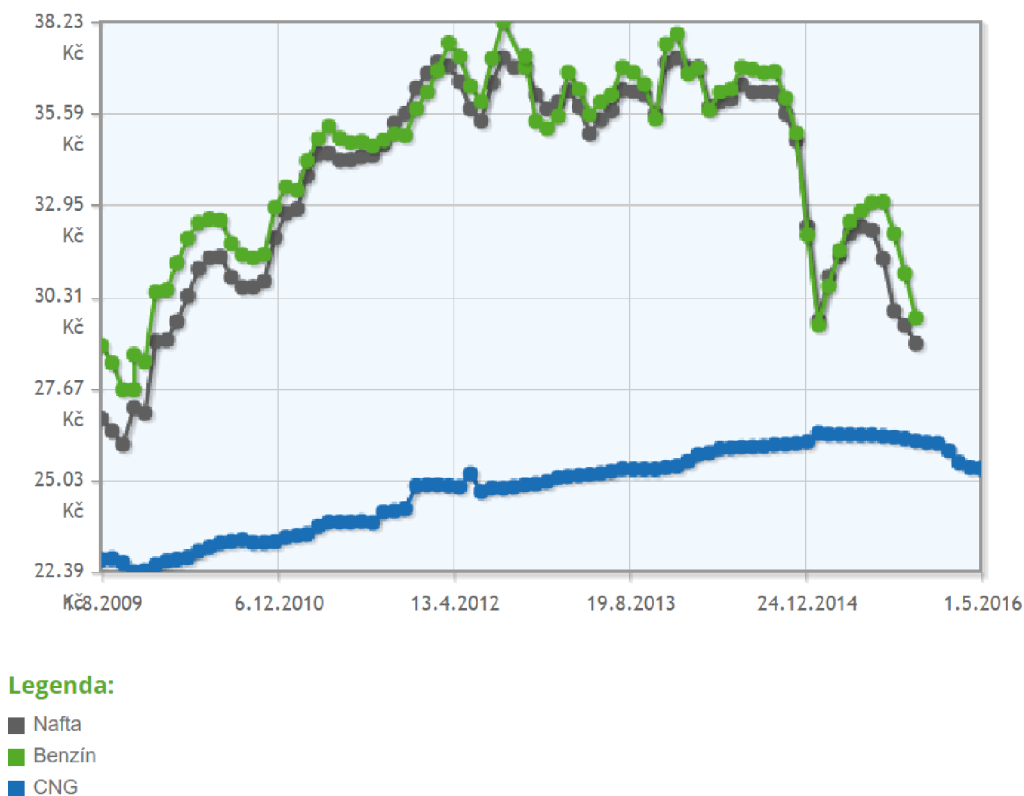
Výpočet ceny s DPH:

$$Cena_{bioCNG}^{kg} = 27,65 + 5,81 = 33,46 \text{ Kč s DPH} \quad (5.5)$$

Výsledná cena bioCNG je stanovena na 33,46 Kč s DPH. Tato cena zohledňuje pouze náklady na vstupní surovinu a provozní náklady technologie separace. Za účelem generování zisku by tato cena musela být ještě navýšena, aby bylo možné uvažovat o návratnosti celého zařízení.

5.3 Faktory ovlivňující cenu bioCNG

Největší vliv na cenu výsledného produktu má cena vstupní suroviny (surový bioplyn). Pokud má být produkované bioCNG konkurenceschopné musí se jeho cena alespoň rovnat ceně klasického CNG viz. Obr 5.1.



Obr. 5.1 Vývoj ceny pohonných hmot v ČR [17]

Z obrázku 5.1 vyplývá, že cena za 1kg CNG se na čerpacích stanicích dnes prodává za cca 25 Kč (ceny se mění v závislosti na lokalitě a provozovateli výdejního zařízení). Tato cena nám udává hranici, kdy začíná být zařízení konkurence schopné. Zpětným výpočtem z této ceny se stanoví maximální možná cena vstupní suroviny.

Koeficient daně:

$$koeficient\ daně = \frac{21}{121} = 0,1736 \quad (5.6)$$

Výpočet DPH:

$$DPH = 25 \cdot 0,1736 = 4,34\text{ Kč} \quad (5.7)$$

Ceny bez DPH:

$$Cena_{bioCNG}^{kg} = 25 - 4,34 = 20,66\text{ Kč s DPH} \quad (5.8)$$

Výpočet ceny surového bioplynu:

$$Cena_{bioCNG}^{Nm^3} = Cena_{bioCNG}^{kg} \cdot \rho_{bioCNG} = 20,66 \cdot 0,71 = 14,67\text{ Kč bez DPH} \quad (5.9)$$

$$Cena_{sur.bioplynu} = \frac{Cena_{bioCNG}^{Nm^3} \cdot \dot{V}_6 - (Cena_{kWh} \cdot P_{MS} + \frac{cena_{obsluha}}{24} + \frac{cena_{servis}}{24})}{\dot{V}_2} \quad (5.10)$$

$$Cena_{sur.bioplynu} = \frac{14,67 \cdot 6,05 - (2,6 \cdot 12 + \frac{180}{24} + \frac{7,8}{24})}{12,1} = 4,11\text{ Kč}$$

Z pohledu provozovatele membránové separace je maximální přípustná cena za surový bioplyn 4,11 Kč. V praxi to znamená, že pokud by se povedlo s vlastníkem bioplynové stanice dohodnout na této ceně, provoz membránové separace by přestal být prodělečným. Výsledný produkt by mohl sloužit alespoň jako palivo pro podnikovou flotilu automobilů, kdy můžeme uvažovat cenu 1 kg bioCNG 20,66 Kč bez DPH, kdy je tímto dosaženo snížení nákladů na provoz těchto vozidel, nebo plyn prodávat za cenu 25 Kč a tím hradit provoz celého kontejneru.

Žádného zisku tímto dosaženo nebude, ale jedná se o výzkumné zařízení, kde je primárním úkolem zjistit především účinnost, stabilitu a provozní specifika separace.

V reálném světě lze takové dohody dosáhnout jen velice obtížně. Cena za surový bioplyn (6,59 Kč) je výsledkem pečlivé rozvahy a pod tuto cenu se provozovateli BPS nevyplatí bioplyn prodávat a tím si nechat ovlivňovat provoz kogeneračních jednotek, které implementací membránové separace nevyprodukují takový zisk jako při provozu bez membránové separace (viz kapitola 5.1).

Z tohoto faktu vyplývá, že v současné době není možné v této konfiguraci, výzkumný kontejner s membránovou separací komerčně provozovat, protože výsledná cena produktu (bioCNG) je příliš vysoká a tím pádem naprosto konkurence neschopná v porovnání s klasickým CNG.

5.4 Modelové příklady provozu bioplynové stanice s membránovou separací

Při úvahách o nasazení technologie membránové separace bioplynu na BPS se jeví dvě možná řešení zapojení.

5.4.1 Kombinace s kogenerační jednotkou

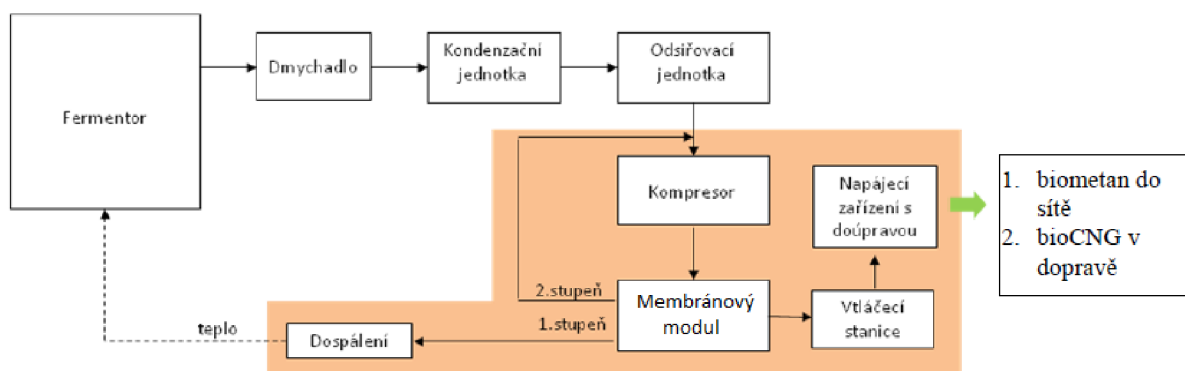
Tím prvním je výše popsané, tj. kdy je technologie separace zapojena paralelně s kogeneračními jednotkami. Zpracováván je jen určitý podíl (v řádu jednotek %, až 50 %) bioplynu, který produkuje BPS, zbytek je spalován v KJ.

Toto řešení je vhodné zejména pro stávající BPS, kdy je možno využít stávající předúpravy bioplynu a tím snížit nároky (náklady) na dodatečnou předúpravu.

Využit biometanu je možné jako palivo pro zemědělskou techniku a tím docílit snížení nákladů na provoz této techniky v rámci podniku, nebo jako palivo pro veřejnou dopravu (automobily, autobusy, nákladní automobily). [15]

5.4.2 Výroba biometanu

Druhé řešení je vhodné spíše pro nové BPS, kdy je veškerý vyprodukovaný bioplyn využíván na výrobu biometanu. Schéma zapojení technologie je na obrázku 5.2.



Obr. 5.2 Schéma zapojení mem. sep. kompletní produkce bioplynu [16]

Postup plynu technologií je v zásadě stejný. Surový bioplyn je nejprve vhodně předupraven, kde je zbaven většiny problematických příměsí (H_2O , H_2S , apod.). Dále je stlačen na tlak vhodný pro samotnou separaci.

Zásadní rozdíl oproti první variantě je ten, že určitá, malá část vyseparovaného bioplynu (retentát) je pod vhodným poměrem smíšena s permeátem a směs je vedena na dospálení, kde je generováno teplo pro samotný ohřev fermentoru. Tento poměr musí být zvolen tak, aby bylo dosaženo maximální produkce ušlechtilého biometanu (retentát) a zároveň bylo možné ochuzený plyn vhodně spálit a dosáhnout požadovaného tepelného výkonu pro ohřev fermentorů.

Výsledný produkt (biometan) je pak vhodné vtlačet do VTL nebo STL sítě zemního plynu, nebo, využít jako palivo v dopravě. [15]

Tímto způsobem je možné získat 75 % - 80% biometanu z celkové produkce bioplynu BPS. [15]

Jak bylo dokázáno v kapitole 5.3. při posuzování rentabilnosti celého zařízení hraje hlavní roli cena vstupní suroviny (bioplynu). Tato cena je závislá na ceně použitého substrátu ve fermentoru a podle typu BPS se může zásadně lišit a určuje celkovou ekonomiku bioplynové stanice. Je pečlivě zvažována již před samotnou výstavbou celé bioplynové stanice.

V České republice navíc neexistuje žádná podpora výroby biometanu ve formě dotovaných výkupních cen nebo „zelených bonusů“. Pouze na vyrobený biometan není vztažena spotřební daň.

Díky těmto faktům se investice do velice nákladné technologie čištění bioiplynu nevyplácí a proto na našem území neexistuje žádná bioplynová stanice, která by veškerý vyrobený bioplyn využívala k výrobě biometanu. V provozu jsou pouze malá výzkumná zařízení.

O tom jestli se vyplatí alespoň malé zařízení na čištění bioplynu paralelně s KJ rozhodne až detailní ekonomická analýza provozu celé bioplynové stanice, kdy jsou porovnávány veškeré vstupy a výstupy.

Jiná situace panuje v zahraničí. Např.: V Německu, Rakousku, Švýcarsku, Švédsku, Španělsku jsou zavedeny různé dotační programy a tato zařízení zde fungují a biometan se používá pro pohon dopravních prostředků nebo je vtlačěn do rozvodů zemního plynu. [8]

5.5 Podíl bioplynových stanic s čištěním bioplynu na energetické soběstačnosti ČR

Podle České bioplynové asociace je dnes v České republice provozováno 7 komunálních BPS, 11 průmyslových BPS, 56 BPS na skládkový plyn, 98 BPS na ČOV a 382 zemědělských BPS. Celkem 554 zařízení na výrobu bioplynu, u kterých lze předpokládat, že vyrobí zhruba 2,6 TWh el. Energie. [19]

Pokud bychom uvažovali účinnost přeměny v kogeneračních jednotkách 37% a výhřevnost bioplynu 24 MJ/m³, vypočteme celkové vyprodukované množství bioplynu ve všech BPS.

$$\dot{V}_{bioplyn} = \frac{3,6 \cdot E_{el. celkem}}{Q_i^r \cdot \eta_{el. KJ}} = \frac{3,6 \cdot 2600000}{0,37 \cdot 24} = 1054 \frac{mil. m^3}{rok} \quad (5.11)$$

Zavedeme předpoklad 75% přeměny bioplynu na biometan (kap. 5.4.2)

$$\dot{V}_{biometan} = \dot{V}_{bioplyn} \cdot 0,75 = 1054 \cdot 0,75 = 790,5 \frac{mil. m^3}{rok} \quad (5.12)$$

Tímto způsobem by bylo možné vyrobit cca 790,5 mil. m³/rok biometanu. Spotřeba zemního plynu je v České republice podle ERÚ cca 7 300 mil. m³/rok. Z toho vyplývá, že by tímto způsobem bylo možné pokrývat zhruba 11% spotřebovaného zemního plynu v České republice.

6 Závěr

Cílem této diplomové práce je posouzení vlivu implementované technologie membránové separace bioplynu, ve formě nízkokapacitního výzkumného zařízení, na provoz stávajících kogeneračních jednotek na bioplynové stanici. Problematika ovlivnění provozu je rozebrána ve dvou hladinách, a to z pohledu technického a z pohledu ekonomického.

Technologie membránové separace, která odebírá 12,1 Nm³/h bioplynu (cca 5% celkové produkce bioplynu), má za následek snížení obj. toku bioplynu do kogeneračních jednotek o 6,3 Nm³/h, snížení koncentrace metanu o 0,94 %obj. a zvýšení koncentrace oxidu uhličitého o 1 %obj. To má za následek snížení výkonu kogeneračních jednotek o 21,1 kW. Samotná technologie navíc disponuje příkonem 12 kW.

Co se týče ekonomického posouzení provozu, je uvažován pohled ze strany BPS a ze strany produkce biometanu. Je to dáno tím, že jsou různí provozovatelé BPS a technologie membránové separace a jedná se tak z pohledu ekonomického posouzení o dva samostatné objekty. Úbytek výkonu KJ a tím i snížení celkového zisku za prodej el. energie je kompenzován prodejem surového bioplynu pro účely membránové technologie. Proto **není ovlivněn** celkový výnos BPS. Membránová separace produkuje 6,05 Nm³/h biometanu (bioCNG) a při započtení všech vstupních nákladů je jeho cena stanovena na 27,65 Kč bez DPH a 33,46 Kč s DPH. Při porovnání s cenou klasického CNG není zatím tato konkrétní aplikace membránové technologie konkurence schopná.

Toto zařízení je ve fázi vývoje, kdy je ověřována především správná funkce celého zařízení. Při úvahách o komerčním nasazení této technologie buď ve formě nízkokapacitního zařízení, nebo ve formě zařízení, které zpracovává veškerý vyrobený bioplyn, je v první řadě potřeba stanovit cenu vstupní suroviny, bioplynu. Stanovení této ceny by bylo vhodné téma pro další výzkum o možnostech konkurenceschopnosti membránové separace bioplynu.

Výrobou biometanu je možné smysluplně zpracovávat téměř veškerý biologicky rozložitelný odpad, kal z čističek odpadních vod nebo skládkový plyn. Využívání odpadů všeobecně je dlouhodobě obrovským problémem lidské společnosti a touto cestou lze z části těchto odpadů získat velice ušlechtilé palivo, které nachází uplatnění všude tam kde, je využíván zemní plyn. Pokud je využíváno k výrobě biometanu cíleně pěstované biomasy, je možné tímto způsobem dosáhnout nejlepšího poměru využitelné energie na hektar půdy. Další výhodou výroby biometanu je možnost částečné soběstačnosti, co se týče spotřeby zemního plynu. V České republice je potenciál zhruba 11 %.

Ze zkušeností z řady okolních států Evropy lze usoudit, že velkoobjemová komerční výroba biometanu je možná, ale pouze s dostatečnou státní podporou. Je to dáno všeobecně známým faktem, že prozatím získávání téměř jakékoli formy energie z obnovitelných zdrojů je vždy ve výsledku nákladnější než z neobnovitelných zdrojů a je na posouzení jednotlivých rozhodčích orgánů daných států, zda li chtějí jít touto cestou snižování podílu neobnovitelných zdrojů energie.

7 Seznam použitých zdrojů

- [1] STRAKA, František a Michal DOHÁNYOS. *Bioplyn: [příručka pro výuku, projekci a provoz bioplynových systémů]*. 2., rozš. a dopl. vyd. Praha [i.e. Říčany u Prahy]: GAS, 2006. ISBN 80-732-8090-6.
- [2] *Energie z biomasy XIII: sborník příspěvků z konference*. Vydání první. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. ISBN 978-80-214-4685-4.
- [3] SCHULZ, Heinz a Barbara EDER. *Bioplyn v praxi: teorie - projektování - stavba zařízení - příklady*. Ostrava: HEL, 2004. ISBN 80-861-6721-6.
- [4] *Průvodce výrobou a využitím bioplynu*. Praha: CZ Biom, 2009. ISBN 978-80-903777-5-2.
- [5] MIKULÁŠEK, Petr. *Tlakové membránové procesy: English-Czech and Czech-English explanatory dictionary of membranology*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2013. ISBN 978-80-7080-862-7.
- [6] ŠÍPEK, Milan (ed.). *Membránové dělení plynů a par*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2014. ISBN 978-80-7080-864-1.
- [7] ČSN 65 6514. *Motorová paliva - Bioplyn pro zážehové motory - Technické požadavky a metody zkoušení*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [8] ŽÁKOVEC, Jan. *Biometan: hospodárné užití obnovitelných zdrojů energie*. Praha: GAS, c2012. GAS. ISBN 978-80-7328-276-9.
- [9] MICHAL, Petr. *Bioplyn - Energie ze zemědělství*. Praha, 2005.
- [10] *Energie z biomasy XVI: sborník příspěvků z konference*. Vydání první. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. ISBN 978-80-214-5286-2.
- [11] IZÁK, Pavel. Separace bioplynu pomocí membránových separačních procesů, přehled. *Paliva* 6 [online]. 2014(2), 51-54 [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <http://paliva.vscht.cz/download.php?id=117>
- [12] PALATÝ, Zdeněk a Bohumil BERNAUER. *Membránové procesy*. V Praze: Vysoká škola chemicko-technologická, 2012. ISBN 978-80-7080-808-5.
- [13] STUPAVSKÝ, Vladimír. Senát posvětil ukončení podpory obnovitelných zdrojů. In: *TZB-info: stavebnictví, úspory energií: technická zařízení budov* [online]. 2013 [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/normy-a-pravni-predpisy-obnovitelna-energie/10336-senat-posvetil-ukonceni-podpory-obnovitelnych-zdroju>
- [14] VÍTKOVICE ÚAM A.S. *Dispoziční a technologické řešení úpravy bioplynu na biometan na BPS: Zpráva k pracovnímu balíčku WP4*. Brno, 2014, 20 s.
-

- [15] BOBÁK, Marek. Úprava bioplynu na biometan membránovou separací. In: *Česká membránová platforma* [online]. 2012 [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <http://www.czemp.cz/sites/default/files/clanek/146/prilohy/2012-05-10-bobakseminargms.pdf>
- [16] MEMBRAIN. *Membránová technologie pro výrobu bioplynu*. 2 s. Dostupné také z: <http://www.membrain.cz/files/procesy/membranova-technologie-pro-vyrobu-biometanu-z-biop.pdf>
- [17] Srovnání cen paliv. *CNG plus* [online]. 2016 [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <http://www.cngplus.cz/srovnani-cen.html>
- [18] ČESKÁ REPUBLIKA. *Energetický regulační věstník: Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu*. In: . Jihlava: Energetický regulační úřad, 2015, ročník 15, 10/2015, 9/2015. Dostupné také z: http://www.eru.cz/documents/10540/462898/151229_CR_POZE_9_2015.pdf/e8c97a46-2870-47c6-9f11-8f4a97145ab1
- [19] Statistiky výroby bioplynu. *Česká bioplynová asociace* [online]. 2013 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.czba.cz/statistiky-vyroby-bioplynu.html>

8 Seznam použitých zkratk a symbolů

Veličina	Popis
J	Intenzita toku permeátu
A	Separáčnı plocha membrány
V_p	Objem permeátu
τ	Čas
R	Součinitel retence
c_F	Koncentrace separované složky ve vstupnım proudu
c_P	Koncentrace látky v permeátu
%obj.	Objemová procenta
φ_x	Objemový zlomek (x – proměnná)
Δx	Rozdíl (x – proměnná)
\dot{V}_x	Objemový tok (x – proměnná)
P	výkon
$Zisk_{hod}^{bez\ mem.\ sep.}$	Hodinový zisk bioplynové stanice bez membránové separace
$Zisk_{hod}^{s\ mem.\ sep.}$	Hodinový zisk bioplynové stanice s membránové separace
$Zisk_{hod}^{el.}$	Zisk z prodeje el. energie
$Zisk_{hod}^{sur.\ bioplyn}$	Zisk z prodeje bioplynu
$Cena_{sur.\ bioplynu}$	Cena Nm ³ bioplynu
$Cena_{kWh}$	Cena za kWh el. energie
$cena_{obsluha}$	Cena obsluhy zařízení
$cena_{servis}$	Cena servisu zařízení
$Cena_{bioCNG}^{Nm^3}$	Cena Nm ³ bioCNG
$Cena_{bioCNG}^{kg}$	Cena kg bioCNG
$E_{el. celkem}$	Množství vyrobené el. energie
Q_i^r	Výhřevnost
$\eta_{el. KJ}$	El. účinnost kogenerační jednotky
Zkratka	popis
CNG	Compressed Natural Gas – Stlačený zemní plyn
bioCNG	Náhrada stlačeného zemního plynu – obnovitelné palivo
el. energie	Elektrická energie
BPS	Bioplynová stanice
BRKO	Biologicky rozložitelný komunální odpad
GPS	Silážovaná drť z celých rostlin

KJ	Kogenerační jednotka
OZE	Obnovitelné zdroje energie
TD	Technické doporučení
ČSN	Česká technická norma
STL	Středotlaké
VTL	Vysokotlaké
DPH	Daň z přidané hodnoty