



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**NÁVRH TECHNOLOGIE ČIŠTĚNÍ BIOPLYNU PRO POHON
VOZIDEL POMOCÍ MEMBRÁNOVÉ SEPARACE**

DESIGN OF BIOGAS CLEANING TECHNOLOGY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Zbyněk Šrámek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Lisý, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Bc. Zbyněk Šrámek**
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:

Návrh technologie čištění bioplynu pro pohon vozidel pomocí membránové separace

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úvod bude zaměřen na stávající stav technologií k čištění bioplynu, zejména se zaměřením na membránovou separaci. Dále bude proveden koncepční a technologický návrh připojení membránového separačního zařízení na vybrané bioplynové stanici se zakreslením dispozičního uspořádání.

Závěr práce bude zaměřen na návrh dmychadla bioplynu a na celkové technické posouzení navržené technologie a legislativní podmínky provozu.

Cíle diplomové práce:

Cílem diplomové práce je návrh technologie čištění bioplynu pro pohon vozidel pomocí membránové separace. Vyčištěný bioCNG bude využíván buď přímo na bioplynové stanici, nebo bude plněn do trajlerových zásobníků a transportován na plničky CNG.

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 1. 12. 2015



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

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

ABSTRAKT

Tato práce má za úkol navrhnout vhodnou technologii čištění bioplynu tak, aby jejím výstupem bylo ekvivalentní a plnohodnotné palivo pro pohon vozidel. První část má za cíl seznámit čtenáře s problematikou čištění bioplynu a uvádí čtenáře do probírané tematiky. Ve druhé části je podrobně popsána konkrétní technologie čištění bioplynu, metoda membránové separace. Třetí část práce je zaměřena na možnosti využití bioplynu v podmínkách České republiky. Čtvrtá kapitola řeší aplikaci technologie membránové separace bioplynu do stávající bioplynové stanice. Poslední část práce je zaměřena na zvolení a návrh vhodného dmyhadla, které dopraví surový bioplyn ze společné strojovny fermentorů do výzkumného kontejneru.

KLÍČOVÁ SLOVA

Membránová separace, technologie Membrain, bioplyn, bioCNG, bioplynová stanice, výzkumný kontejner, návrh dmyhadla.

ABSTRACT

Thesis aims to design suitable technology for biogas treatment so that its output can be used as a fully equivalent fuel for vehicles. First part introduces reader into an area of biogas treatment. Second part describes in detail chosen method, technology of membrain separation. In third part, current conditions in Czech republic were discussed. Fourth part adresses the aplication of membrane technology into existing biogas station via side-standing reaserch container. The end of the thesis is focused on selection and proper desing of blower, which will be transporting raw biogas from biogas fermenters into research container.

KEY WORDS

Membrane separation, Membrain technology, biogas, bioCNG, biogas station, research container, blower design.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠRÁMEK, Z. Návrh technologie čištění bioplynu pro pohon vozidel pomocí membránové separace. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 72 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Lisý, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým vlastním dílem a zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Martina Lisého, Ph.D. za použití literatury, uvedené v seznamu.

V Brně, dne 23. května 2016

.....

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji rodině, která mi umožnila studovat a v průběhu studia poskytovala duševní a finanční podporu. Děkuji spolužákům a pedagogické sféře za utvoření čínorodého a přátelského kolektivu, který mi pomohl získat neocenitelné znalosti a zkušenosti. Děkuji Vedoucímu diplomové práce, především za jeho rady, připomínky a poskytnuté materiály v průběhu vypracovávání práce.

OBSAH

Úvod	15
1 Úvod do problematiky čištění bioplynu	16
1.1 Možnosti separace a čištění bioplynu	19
1.2 Technologie tlakové adsorpce (PSA)	21
1.3 Technologie fyzikální absorpce - Vodní tlaková vypírka	23
1.4 Technologie chemické absorpce	23
1.5 Technologie membránové separace	24
1.6 Technologie nízkoteplotní rektifikace (mnohonásobná destilace)	24
2 Technologie membránové separace bioplynu	27
2.1 Princip membránové technologie	27
2.2 Materiály separačních membrán	28
2.2.1 Typy membrán podle použitých materiálů	28
2.2.2 Volba materiálu membrán	29
2.3 Membránový modul	30
2.4 Aplikace separačních membrán	31
3 Využití bioplynu v podmínkách České republiky	33
3.1 Aktuální situace bioplynu v ČR	33
3.2 Legislativa v oblasti biometanu	35
3.3 Vtláčení biometanu do plynárenských sítí	36
3.4 Využití bioCNG v dopravě	38
4 Implementace technologie membránové separace do stávající bioplynové stanice	42
4.1 Popis bioplynové stanice	42
4.2 Koncepční řešení	44
4.2.1 Popis technologie Membrain	45
4.2.2 Požadavky a implementace technologie Membrain	46
4.2.3 Jednotka pro separaci plynů	47
4.2.4 Uskladnění bioCNG	48
4.3 Technologické řešení	49
4.3.1 Výzkumný kontejner s technologií Membrain	50
4.3.2 Napojení na elektrickou energii	51
4.3.3 Napojení na bioplyn	52
4.4 Dispoziční řešení	53
5 Výpočet a návrh dmyhadla bioplynu	54
5.1 Zvolení vhodných parametrů potrubí	54
5.2 Zjištění charakteru proudění	55
5.3 Výpočet tlakové ztráty třením tekutiny	57
5.4 Výpočet tlakové ztráty místními odpory	59

5.5	Výpočet celkové tlakové ztráty a výběr vhodného dmyhadla	61
5.6	Přepočet charakteristiky a stanovení pracovního bodu dmyhadla	62
Závěr	65
Seznam použitých zdrojů	66
Seznam použitých zkratek a symbolů	69
Seznam příloh	72

ÚVOD

S rostoucí snahou o maximální využití obnovitelných zdrojů energie roste i snaha o maximální využití bioplynu. Bioplyn může vznikat aerobním (za přístupu vzduchu) či anaerobním (bez přístupu vzduchu) rozkladem organických látek. Proces jeho vzniku může být přirozený, např. v mokřadech či na skládkách odpadů i cílený - ve fermentorech bioplynových stanic či čistírnách odpadních vod (dále jen ČOV). V běžné technické praxi se však bioplynem rozumí plyn, který vzniká cíleně - anaerobní fermentací organických látek, tj. za procesu bez přístupu vzduchu. Kromě dalších minoritních složek tvoří vznikající bioplyn hlavně směs metanu (CH_4) a oxidu uhličitého (CO_2). Zejména kvůli methanu a vodíku (H_2) disponuje značným množstvím energie, což vzbuzuje snahu ji efektivně využívat.

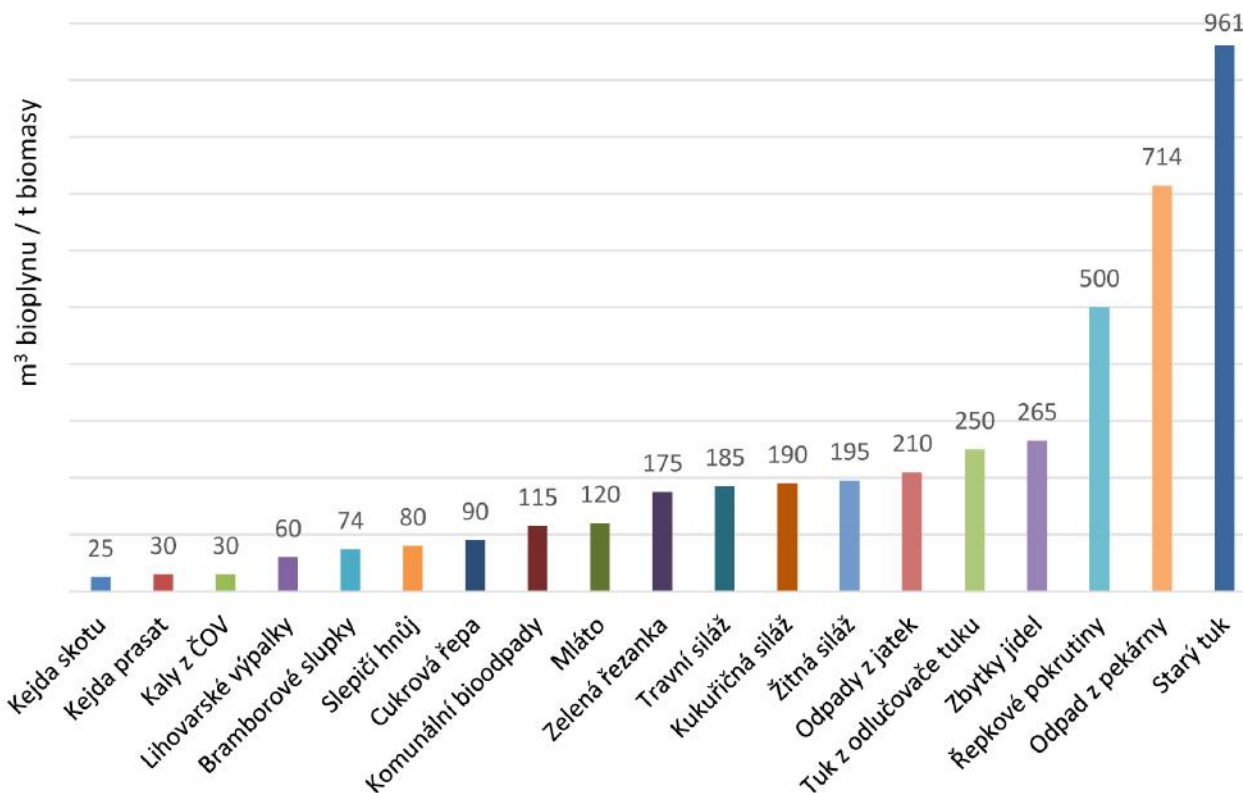
V současné době se bioplyn v České republice, zejména díky legislativní podpoře, využívá nejvíce jako biopalivo pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla (tj. kogenerace). Postupně však dochází k útlumu forem státních bonusů a vzhledem k tomu, že má cena silové elektřiny dlouhodobě klesající trend, hledají se nové směry využití bioplynu a nové směry uplatnění pro bioplynové stanice. Jedním ze směrů je čištění bioplynu na úroveň zemního plynu a jeho následné využití v dopravě jako paliva pro motorové vozidla či jeho vtlačení do plynárenských sítí se zemním plynem. Pokud v dané lokalitě či daném regionu není zajištěn jeho dostatečný odbyt a není ani k dispozici distribuční síť zemního plynu, pořád je možné tento biometan vtlačet do tzv. virtuálních plynovodů, tj. vlečných vozů (trailerů) s plynovými zásobníky. Výroba biometanu tedy disponuje velmi příjemnou vlastností tento biometan, a tím i jeho využitelnou energii, akumulovat.

Kogenerační jednotky (dále jen KGJ) přeměňují energii bioplynu na teplo a elektrickou energii. Aby byla zajištěna dostatečná výhřevnost, nebyly narušovány zařízení (koroze), nevznikaly nežádoucí plyny a škodlivé emise, musí být surový bioplyn předčištěn. Metod, které ze surového bioplynu odstraňují nežádoucí látky/složky, existuje mnoho a těm nejvíce rozšířeným se věnuje první kapitola. Jak už bylo zmíněno, kromě odstraňování nežádoucích látek je také vhodné v bioplynu zvyšovat podíl metanu. Říkáme, že se bioplyn obohacuje, stává se energeticky hodnotnějším zdrojem, tzn. disponuje vyšší výhřevností. Postupným zvyšováním obsahu metanu v bioplynu lze získat tzv. biometan. Zjednodušeně řečeno jde o bioplyn ochuzený o oxid uhličitý, obsahující přibližně 95 a více procent metanu. Takovýto plyn již odpovídá kvalitě běžně a široce používaného zemního plynu a lze jej substituovat v jeho aplikacích.

Diplomová práce vznikla v souvislosti s řešením projektu TE02000077 „Smart Regions - Buildings and Settlements, Information Modelling, Technology and Infrastructure for Sustainable Development.“ Nastiňuje, jakých metod se při čištění bioplynu používá, navrhuje technologii čištění bioplynu pro pohon vozidel a podává stručný a ucelený přehled o tom, jakým způsobem je možné tuto technologii aplikovat ve stávající bioplynové stanici.

1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY ČIŠTĚNÍ BIOPLYNU

Bioplyn vzniká při rozkladu organické hmoty bez přístupu kyslíku, díky působení bakterií, kvasinek či hub. Může obsahovat až 70 % metanu, který je také hlavní složkou zemního plynu. V přírodě podobné procesy probíhají např. v rašeliništích, na dně jezer či v trávicím systému přežvýkavců. Mokrý biomasa jako hnůj, kejda, potravinářské odpady a zemědělské plodiny se nehodí ke spalování pro svůj vysoký obsah vody. Lze je však efektivně využívat v bioplynových stanicích. Na Obr. 1.1 je znázorněn vliv používaných surovin na celkovou výtěžnost bioplynu ¹.



Obrázek 1.1: Výtěžnost bioplynu z jedné tuny dané biomasy. Převzato a upraveno z [2].

Hlavní část bioplynové stanice tvoří fermentor, resp. reaktor. Jde o velkou nádrž, ve které se zředěná a rozmělněná organická hmota (naředěná na cca 10 % sušiny) promíchává a zahřívá na cca 37 °C (tzv. mezofilní režim) či 55 °C (tzv. termofilní režim). Teplota uvnitř musí být stálá, protože kolísání či nedodržení ideální teploty (dávkování příliš studeného substrátu, chybně dimenzované či umístěné topení, nedostatečné promísení apod.) brzdí fermentační proces [1]. Dochází k rozkladným procesům a uvolňovaný bioplyn je následně odváděn do plynoměru, kde se dále upravuje a čistí.

Ve většině bioplynových stanic je upravený bioplyn následně spalován v kogenerační jednotce (nezávisle na okolním počasí). Doba provozu bývá mnohdy vyšší, než 8000 hodin

¹Výtěžnost bioplynu významně závisí jednak na vlastnostech a kvalitě vstupního materiálu, a jednak musí být vždy vyhodnocena podle konkrétních podmínek - způsob provozu zařízení, výše a stabilita teploty v reaktoru, doba zdržení apod. Z tohoto důvodu dochází i u stejných substrátů ke značným rozptylům hodnot ve výtěžnosti bioplynu.

ročně[2]. Kogenerační jednotku tvoří spalovací motor, přizpůsobený ke spalování bioplynu, na který je napojen elektrický generátor. Ekonomická životaschopnost bioplynové stanice je z velké míry závislá na maximalizaci produkce elektrické energie. Po výrobě elektřiny a tepla se ze zbytku po fermentačním procesu (tzv. digestátu) často vyrábí certifikovaná organická hnojiva, která svou aplikaci nacházejí v zemědělství.

Technologie bioplynových stanic jdou rozlišit podle množství sušiny ve vstupním substrátu. Suchá fermentace je vývojově mladší než mokrá fermentace. Lze ji dále rozdělit na suchý proces (25-45 % sušiny) a vysokosušinový proces (nad 40 % sušiny). Při suché fermentaci se lze setkat s plynotěsnými fermentory garážového typu (jde o anaerobní procesy, tj bez přístupu vzduchu), které jsou schopny zpracovat vysokosušinové substráty až 60 % obsahu sušiny. Plnění zde probíhá vsázkovým způsobem pomocí čelního nakladače. Tyto zařízení se však nerozšířily natolik, aby byly dostatečně provozně odzkoušeny, a dosavadní zkušenosti nabádají k obezřetnosti [2]. Hlavními přednostmi jsou nízké investiční náklady a nízký požadavek na plochu (efektivní využití prostoru s ohledem na vysoký obsah sušiny) [1]. Při použití této metody je nemožné promíchávat substrát během fermentačního procesu. To způsobuje nižší výtěžnost bioplynu kvůli nepropustnosti některých partií. Také zde hrozí nebezpečí vzniku rozdílně vlhkých partií, a tím nepravidelné tvorbě bioplynu [1].

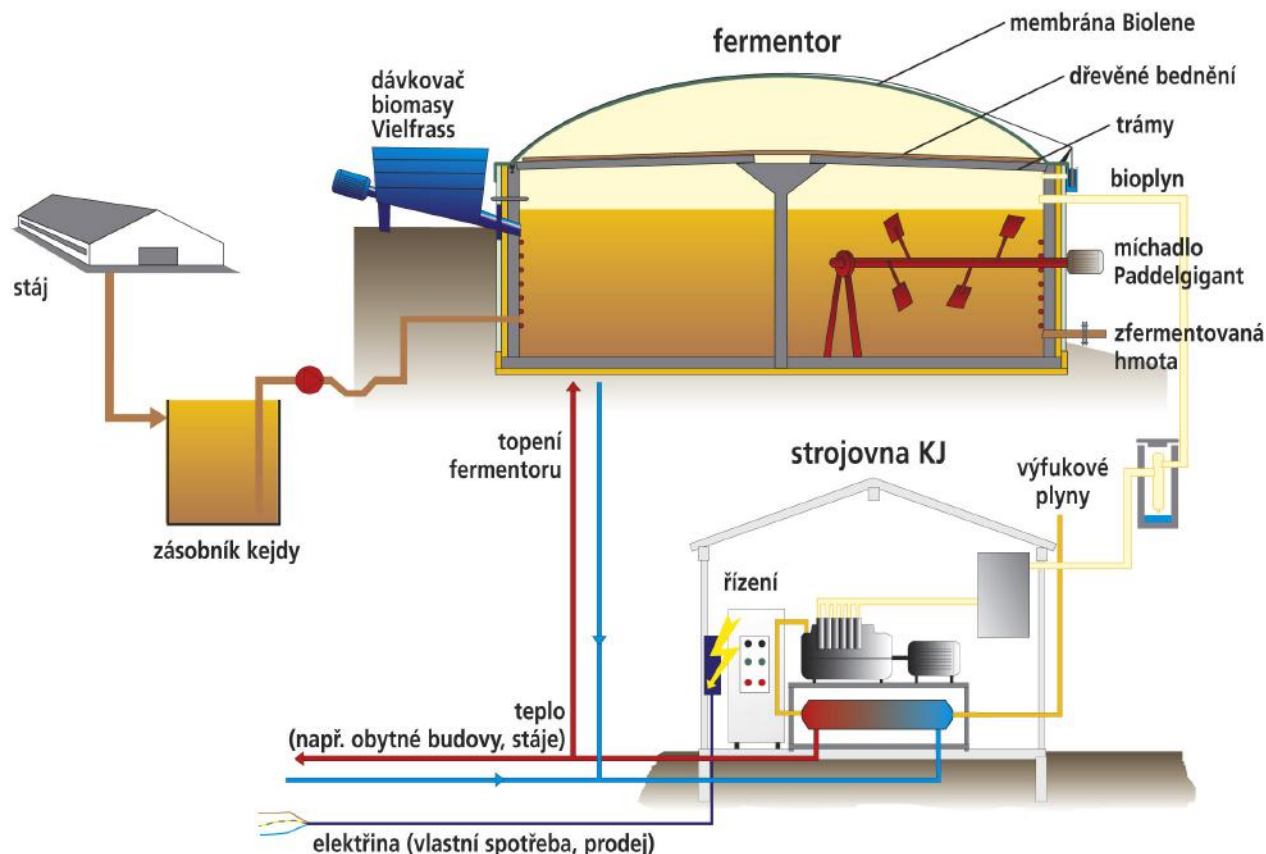
Organická látka	Vyprodukovaný BP	Podíl CH ₄	Adekvátní průměrná výhřevnost
	[m ³ /kg sušiny]	[% obj.]	[MJ.m _N ⁻³]
Tuky	1,12 ÷ 1,58	71 ÷ 84	24,9
Proteiny	0,56 ÷ 0,78	62 ÷ 67	23,4
Sacharidy	0,76 ÷ 0,89	50 ÷ 54	17,8

Tabulka 1.1: Výtěžnost metanu podle typu organické látky; pozn: Množství vyprodukovaného bioplynu je vztaženo na kg rozložené sušiny. Převzato a upraveno z [9].

U mokré fermentace se můžeme nejčastěji setkat s válcovými plynotěsnými fermentory, s vertikální osou (viz Obr. 1.2). Jde také o anaerobní procesy. Fermentory mají kapacitu většinou do 6000 m³. Možná kapacita je až do 30000 m³ - limitem je zde nutnost dostatečně promíchávat substrát [1]. Obsah sušiny se zde požaduje do cca 12%. Materiály, které obsahují vyšší podíl sušiny (podestýlka a hnůj, různé druhy siláží a senáží) se proto před vstupem do fermentoru ředí kejdou či procesní vodou. Větší obsahy slámy nebo pilinové podestýlky může v případě překročení požadované úrovně sušiny způsobit vážné provozní problémy [2]. Je proto nutné zvážit použitou technologii, systém míchání a přípravy surovin tak, aby mohl celý proces bezproblémově fungovat.

Nejčastějším způsobem využití bioplynu z bioplynové stanice je kombinovaná výroba elektřiny a tepla v kogenerační jednotce. V ČR jsou zatím jako kogenerační jednotky využívány především spalovací motory. Při používání kogeneračních jednotek se zážehovým plynovým motorem (Otto) je palivem pouze bioplyn. Moderní motory s vyšším elektrickým výkonem pracují s elektrickou účinností v rozpětí 37 – 42% [7] a mají garantovanou dlouhou životnost zařízení. Používají se také vznětové motory se vstřikem zapalovacího oleje – dieselův motor se zápalným paprskem, u kterého je základním palivem bioplyn a doplňkovým palivem zpra-

vidla kapalné fosilní palivo (nejčastěji motorová nafta, LTO, popř. rostlinný olej či bionafta) [2]. Doplnkové palivo slouží jako iniciační médium spalovacího procesu a jeho spotřeba se pohybuje v rozmezí cca 4-10 % celkového příkonu v palivu [7]. Elektrická účinnost těchto kogeneračních jednotek bývá v rozmezí cca 40-43 % (nejúčinnější kogenerační jednotky dosahují až 45 %) a to platí i v případě jednotek s nižším výkonem [7].



Obrázek 1.2: Funkční schéma BPS s mokrou fermentací. Převzato a upraveno z [9].

Ve srovnání se spalovací turbínou jsou spalovací motory technicky složitější a větší. Vzhledem k vyšší sériovosti jsou ale levnější a dosahují vyšších elektrických účinností (běžná mikroturbína má elektrickou účinnost cca 28 % [1]). Hlavní nevýhodou spalovacích motorů oproti spalovacím turbínám jsou však jejich vysoké servisní náklady během jejich životnosti. Spalovací turbína disponuje malými rozměry a minimálním počtem pohyblivých dílů (jenom rotor). To způsobuje minimální provozní a údržbovou péči.

Spalovací (plynové) turbíny, konstruovány pro malé výkony, s vysokými otáčkami (cca 80000 min^{-1}), nízkými tlaky a teplotami spalovacích komor (oproti běžným spalovacím turbínám), jsou označovány jako mikroturbíny. Jejich výkony dosahují do cca 200 kW a investiční náklady jsou v porovnání s ekvivalenty výkonu na spalovacích motorech bioplynu o cca 15 až 20 % vyšší. Mikroturbíny mají podstatně nižší emise, než plynové motory [8]. Je to dáno stabilním spalovacím procesem, který může trvat nepřetržitě několik měsíců. Jsou výborně ovladatelné po připojení na modem a dokáží pracovat, i pokud je obsah metanu velmi nízký (až 35 %) či pokud jeho obsah kolísá [8].

Zásadní nedostatek u většiny bioplynových stanic, využívajících přečištěný bioplyn v kogeneračních zařízeních, je ten, že nemají zajištěný odbyt tepla po celý rok. Tepelná energie je však spolu s elektrickou vyráběna neustále a tak je často značná část tepelné energie mařena a nevyužita. Úpravy bioplynu odstraňují zejména oxid uhličitý (CO_2) a přečištěný bioplyn na úroveň zemního plynu bývá komprimován. Alternativou k jeho spalování v lokální kogenerační jednotce může být jeho využití k pohonu motorových vozidel. Může být také vtlačěn do sítě zemního plynu či skladován ve vysokotlakých nádobách.

Aby se však mohl bioplyn používat jako pohonná látka pro motorové vozidla a aby mohl být vháněn do plynárenské sítě se zemním plynem, musí být upraven na velmi vysokou kvalitu a výhřevnost, tj. na tzv. biometan. Aplikace ve stacionárních kogeneračních jednotkách poblíž bioplynové stanice však toto nevyžaduje. Takováto úprava bioplynu je sice komplexnější a nákladnější, než při jeho jednoduché filtraci a odvodnění, ale předností takto získaného biometanu je, že se může distribuovat až k místům jeho využití, např. k plnicím stanicím na CNG. Monitorování složení a jakosti prodáváných pohonných hmot, jejich prodej a výdej a evidenci čerpacích stanic zajišťuje Zákon o pohonných hmotách a čerpacích stanicích pohonných hmot č. 311/2006 Sb. Požadovanou kvalitu zemního plynu stanovuje ČSN 38 6110 a technická pravidla na zkoušení plyných paliv s vysokým obsahem metanu stanovuje předpis TPG 902 02.

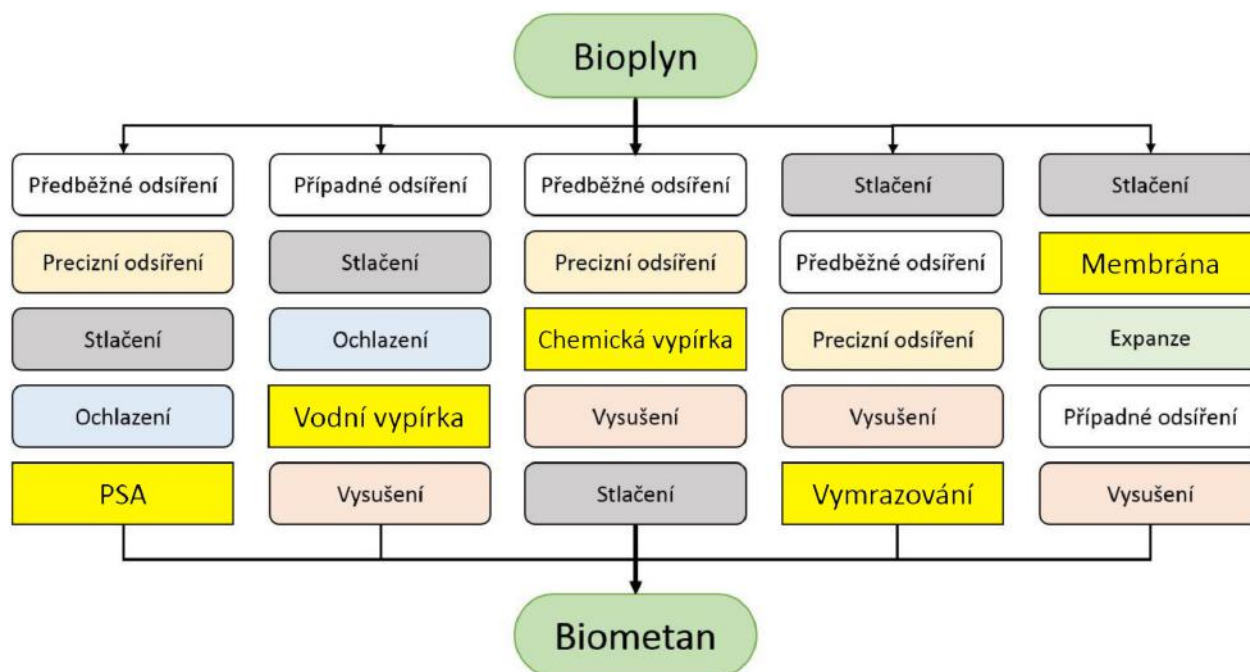
1.1 Možnosti separace a čištění bioplynu

Pro zvýšení obsahu metanu v bioplynu na tak vysokou úroveň, kterou disponuje zemní plyn, se používají různé metody, které se liší technologickým uspořádáním, pracovními podmínkami čištěného bioplynu i kvalitou produkovaného biometanu. Nežádoucími složkami, které je třeba odstranit, jsou hlavně oxid uhličitý (CO_2), sulfan (H_2S) a voda (H_2O). Co se týká provozních podmínek, doposud největšího uplatnění zaujímají zejména technologie PSA tlakové adsorpce (z angl. Pressure swing adsorption) a chemická či fyzikální adsorpce pracím roztokem (např. vodou). Velmi slibnou technologií je také membránová separace, které má za sebou již několik prvních komerčních nasazení a bude podrobně popsána ve druhé kapitole. Ve stádiu vývoje a tedy nízkého praktického uplatnění je také tzv. kryogenní metoda separace oxidu uhličitého. Procesy, kterých je využíváno jsou mnohdy podobné. Na Obr. 1.3 jsou znázorněny nejrozšířenější sledy procesů pro zušlechťování bioplynu (zejména odstraňování oxidu uhličitého) na biometan s vysokým obsahem metanu (CH_4)².

Odstranění síry

V mnoha procesech je třeba odstranit z bioplynu síru, která v něm bývá vázaná ve formě merkaptanů, organických sulfidů či jako anorganická sloučenina (sulfan). Odsiřování je důležité zejména při použití bioplynu v kogeneračních jednotkách. Pokud by nebyl bioplyn zbaven sirnatých složek, při jeho spalování by jejich oxidací vznikl oxid siřičitý (SO_2), z něhož by se následně tvořil oxid sírový (SO_3) a ten dále podporoval vznik kyseliny sírové (H_2SO_4), která by korozi namáhala strojní součásti. U motorů by nejtypičtěji korodovaly zapalovací svíčky, olejové těsnění, ložiska klikové hřídele, ale i součásti mimo motor jakým je např. výfukové potrubí [11]. Výrobci kogeneračních jednotek požadují maximální obsah

²Žlutý obdélníček charakterizuje danou technologii.



Obrázek 1.3: Procesy využívané při zušlechťování bioplynu. Převzato a upraveno z [10].

sulfanu v bioplynu do 500 mg.m^{-3} [11].

Existuje mnoho technologií odstraňování síry z bioplynu. Mezi nejpoužívanější patří adsorpce na aktivním uhlí, chemická adsorpce, srážení ve vyhnívajících nádržích atp. Rozmezí koncentrací sulfanu v bioplynu je však velmi široké a je dáno zejména množstvím siřných látek v substrátu a také zvolenou technologií fermentace.

Odstranění vlhkosti

Při čištění bioplynu je nutné nejdříve odstranit jeho vlhkost. Surový bioplyn je totiž obvykle nasycen vodou a její množství je závislé na jeho teplotě. Čím je nižší jeho teplota, tím je nižší jeho obsah vody. Jenom pro představu, při teplotě 35°C je obsah vody v surovém bioplynu cca 5 % obj. [11]. Nejčastěji se používá kondenzace plynu jeho podchlazením na teplotu rosného bodu při daném tlaku. Vzniklý kondenzát se postupně odvádí. Kromě kondenzace se používá také adsorpční způsob. Molekuly vody se zachytávají na adsorpčních materiálech - silikagely, zeolity, hygroskopické soli atp. Regenerace nasyceného adsorpčního materiálu je prováděna zvýšením teploty a takto zregenerovaný adsorbent se používá pro další cyklus sušení plynu.

Odstranění organokřemičitých a dalších nežádoucích látek

Spalováním organokřemičitých sloučenin vzniká oxid křemičitý, který se usazuje uvnitř spalovacích motorů, v zapalovacích svíčkách, ventilech, i hlavách válců a tím může dojít až k zadření motoru [11]. Problémy s organokřemičitými sloučeninami jsou zejména u tzv. kalového plynu, který vzniká na ČOV. Velmi rozšířeným způsobem odstraňování organických sloučenin křemíku z bioplynu je jejich adsorpce na vybraných adsorpčních materiálech. Je

vhodné použít některé druhy aktivního uhlí, které odstraňují také sulfany. Používá se také klasická absorpce či kryogenní separace.

Mezi další nežádoucí látky v bioplynu patří také amoniak (NO_3), který se nejčastěji odstraňuje za pomoci zředěné kyseliny dusičné (HNO_3) či kyseliny sírové (H_2SO_4). Vzhledem k tomu, že musí být materiál zařízení z ušlechtilé oceli, investiční nároky jsou relativně vysoké. Amoniak lze odstraňovat také adsorpcí na aktivním uhlí či jeho absorpcí vodou. Často je také třeba odstranit halogenové sloučeniny. Pro jejich separaci se nejčastěji používá dvou paralelně zapojených adsorbérů, z nichž v jednom probíhá proces adsorpce a ve druhém proces regenerace (zahřívání na teplotu cca 200 °C, čímž dojde k odpaření adsorbovaných složek, které dále odchází s proudem inertního plynu)[11]. V případě vyšších koncentrací kyslíku (nad 4 %) či dusíku se tyto musí odstraňovat také [11]. Obojí úspěšně odstraňuje velmi rozšířená technologie tlakové adsorpce PSA.

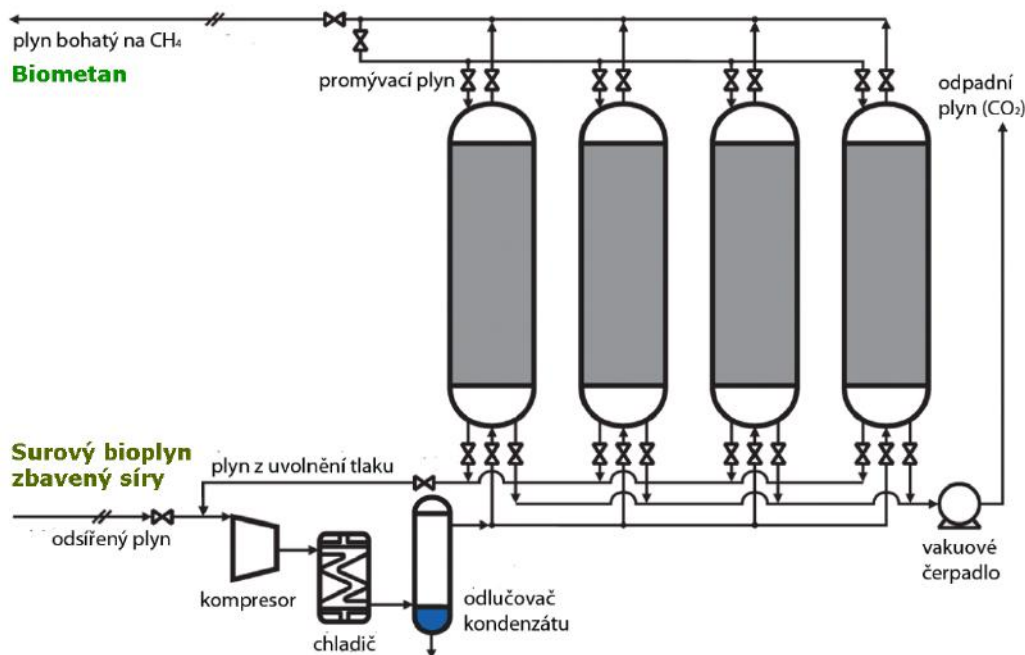
1.2 Technologie tlakové adsorpce (PSA)

Touto metodou lze dělit i velké množství plynu a vzhledem k tomu, že jde o jednu z nejstarších technologií, zušlechťování bioplynu zdaleka není jedinou průmyslovou aplikací, kde se technologie PSA využívá. Své uplatnění nachází také v oblastech vysoušení vzduchu, výrobě čistého kyslíku, separaci uhlovodíku či dělení směsi plynu při parním reformingu zemního plynu na vodík. Jak jde vidět na Obr. 1.3, je nutno předem plyn precizně odsířit, vysušit a stlačit jej na požadovaný tlak, jinak může dojít k trvalému poškození absorberu. Jde o osvědčenou technologii která se využívá pro nízké investiční náklady a nízké energetické potřeby ve srovnání s ostatními separačními metodami, jako je např. absorpce.

K odsíření bioplynu se nejčastěji používá dávkování vzduchu a chloridu železnatého ($FeCl_2$), přímo do fermentované organické hmoty. Pro vysoké obsahy sulfanu je to velmi účinná metoda, ale ačkoliv snižuje množství sulfanu relativně velmi hodně, nedokáže jej snížit až na jeho velmi nízké koncentrace a používá se proto jen pro hrubé odsíření bioplynu, tzn. jako první desulfurační stupeň. Pro dosažení velmi nízkých koncentrací složek síry se jako druhý desulfurační stupeň velmi často používá aktivní uhlí impregnované jodidem draselným (KI).

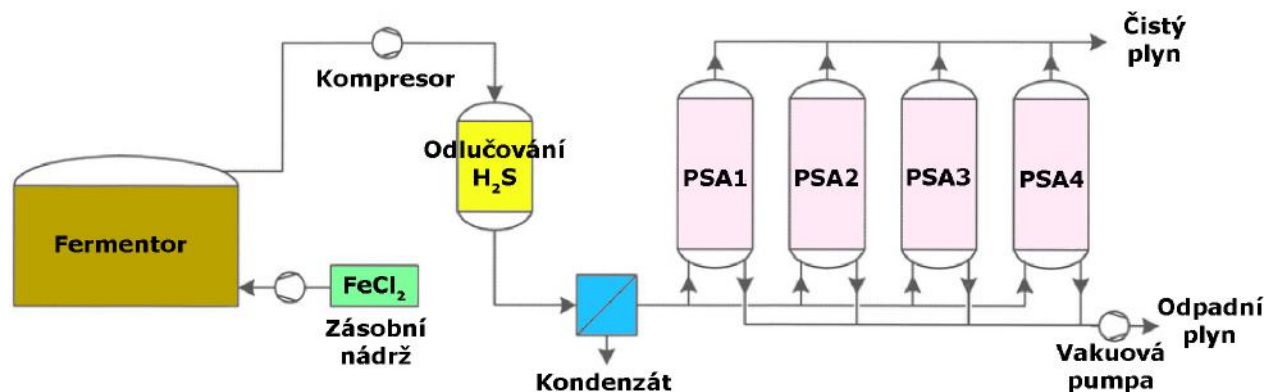
Při používání technologie se jedna či více složek směsi plynu zachytává na vrstvě adsorbentu - molekuly směsi plynu se při zvýšeném tlaku vážou na povrchu vysoce porézní pevné látky za pomoci Van der Waalsových sil - např. silikagel, aktivní uhlí, uhlíkatá molekulová síta, zeolit. Při sníženém tlaku je desorpcí sorbent regenerován a používán v dalším cyklu. Požadovaná selektivita adsorpce je dosahována velikostí pórů a také použitím různých velikostí tlaků, při kterých separace probíhá. Oproti absorpci, kondenzaci a membránové separaci, které slouží především k odstranění oxidu uhličitého (CO_2), tato metoda dokáže současně odstraňovat vodu, sulfan i sloučeniny křemíku. Dokáže z bioplynu kromě oxidu uhličitého separovat také kyslík (O_2) a dusík (N_2). Principem metody je tedy využití daných sorbentů, které při zvýšeném tlaku adsorbují oxid uhličitý, který je pak následně uvolňován snížením tlaku.

Schématické uspořádání technologie tlakové adsorpce je znázorněno na Obr. 1.4. Plyn, který je zbaven síry se bezolejovým kompresorem stlačuje na 4 až 7 barů a jeho stlačením dojde k jeho ohřátí na teplotu cca 170 °C [11]. Při takovém tlaku jeho podchlazením na 10 až 20 °C dochází k oddělení kondenzátu, který je separován v odlučovači. Po tom, co je bioplyn zbaven vody, proudí spodem adsorbéru, který je naplněn molekulovým sítem, na



Obrázek 1.4: Technologické uspořádání PSA technologie tlakové desorpce.
Převzato a upraveno z [11].

kterém se zachytávají zejména složky oxidu uhličitého (CO_2), vody (H_2O) a čpavku (NH_3). V horní části adsorbéru již odchází přečištěný bioplyn s obsahem více jak 95 % metanu, tj. biometan. Pokud chceme ještě více zvýšit obsah metanu v biometanu, provádí se kromě separace surového bioplynu také separace získávaného produktu a tím se můžeme dostat až na biometan s 98% obsahem metanu (CH_4) [11]. Prouděním bioplynu molekulovým sítím dochází také k zachycování malého množství metanu (CH_4). Tlak v plně nasyceném adsorbéru pak klesá až na hodnotu tlaku atmosférického (zajištěn podtlak až 10 kPa). Snížením tlaku se sníží schopnost adsorbentu separované látky na svém povrchu vázat. Dochází k desorpci tohoto zachyceného metanu a tak odpadní plyn kromě velkého množství oxidu uhličitého (CO_2) obsahuje také malé množství metanu. Ztráty metanu jsou běžně menší než 2 % [12].



Obrázek 1.5: Schéma úpravy bioplynu metodou PSA. Převzato a upraveno z [12].

Doba provozu adsorpčního zařízení je dána jeho velikostí. Separace probíhá až do úplného

nasyčení adsorbentu. Po nasycení je proude surového plynu přepnut do čerstvě zregenerovaného adsorbéru. Po tom, co je adsorbér plně zregenerován, tlak se v něm opět zvýšen pomocí tlaku plynu z jiného adsorbéru. Z Obr. 1.4 jde vidět, že ke kontinuálnímu provozu technologie je nutná instalace více adsorpčních jednotek. Při zušlechťování bioplynu se většinou používají čtyři adsorbéry, které jsou naplněny vrstvami adsorbentu. Ve starších provedeních se však používali především systémy se dvěma adsorbéry a třeba při výrobě kyslíku ze vzduchu se používají systémy s mnohem větším počtem adsorbérů. Celé uspořádání pak kromě adsorbérů tvoří také kompresor, vývěva a systém ventilů s potrubím.

1.3 Technologie fyzikální absorpce - Vodní tlaková vypírka

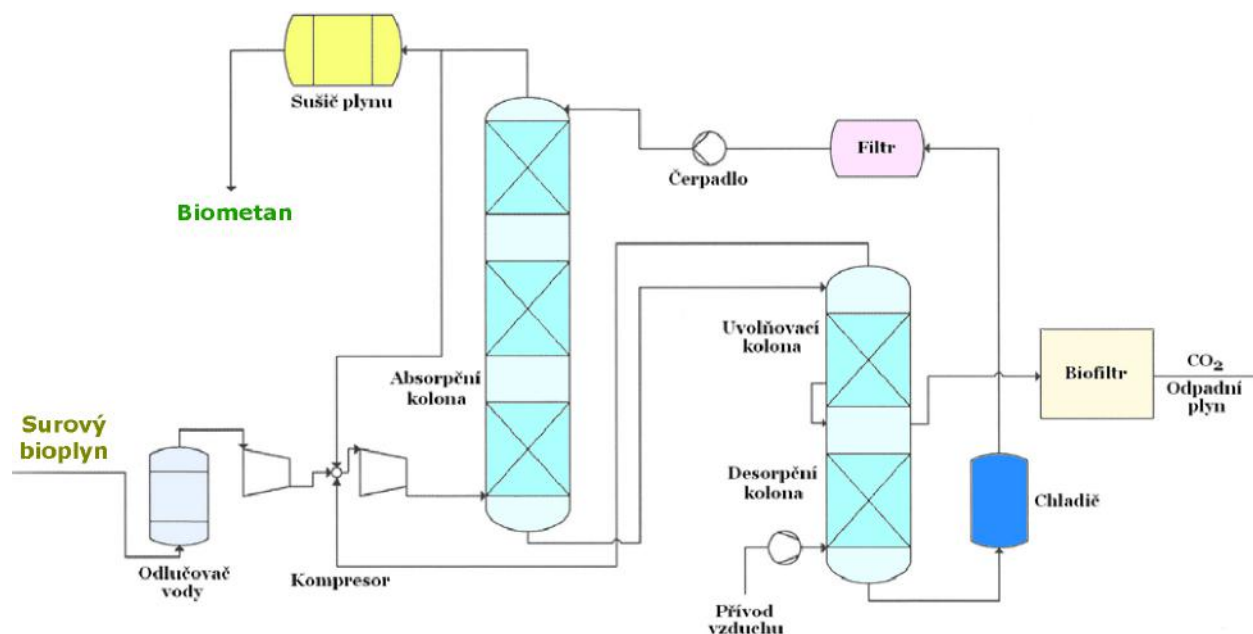
Jde o jednu z nejpoužívanějších technologií k úpravě bioplynu. Je velmi vhodná k odstraňování oxidu uhličitého (CO_2). Velkou předností je zde schopnost čistit velké množství bioplynu, kontinuální a plně zautomatizovaný provoz a lehká údržba. Trpí však relativně vysokou spotřebou energie kvůli uvádění velkého množství vody do oběhu. Na konci procesu může vyčištěný plyn obsahovat až 96 % metanu, k tomu cca 2 % oxidu uhličitého a zbytek tvoří hlavně kyslík a dusík [12]. Před použitím musí být bioplyn ještě vysušen, protože je pořád nasycen vodní párou. V případě vyšších koncentrací kyslíku či dusíku se tyto odstraní na aktivním uhlí či pomocí membránových procesů.

Princip technologie spočívá v rozdílné rozpustnosti metanu a oxidu uhličitého. Na Obr. 1.6 je znázorněno schéma této metody. Bioplyn nejprve prochází filtrem a následně je stlačován v prvním kompresním stupni na cca 3 bar, čímž se ohřeje na cca 100 °C [12]. Po jeho zchlazení a odloučení vlhkosti ve formě kondenzátu je plyn stlačen až na tlak cca 9 bar a odchází na dno absorpční kolony [12]. Uvnitř absorpční kolony je plyn protiproudě skrápňován vodou o teplotě cca 5 či cca 25 °C [12]. Kyselé a zásadité složky v bioplynu se rozpouští do vody (při nižší teplotě a zvýšeném tlaku je jich pohlcováno více).

Odpadní voda z absorpční kolony je přiváděna do uvolňovací kolony, kde se uvolňuje zbytkové množství metanu, které voda pohltila a toto se přimíchává k surovému bioplynu před druhých kompresním stupněm. Díky tomu klesají ztráty metanu až na 2 % [12]. Zbylá odpadní voda je pak z uvolňovací kolony přiváděna do desorpční kolony, do které je přiváděn vzduch, který po průchodu kolonou obsahuje cca 30 % oxidu uhličitého a cca desetinu procenta sulfanu (H_2S) [12]. Tento odpadní plyn je pak před vstupem do atmosféry odsiřován v biofiltru.

1.4 Technologie chemické absorpce

Principiálně jde o odstraňování látek jako sulfan (H_2S), amoniak (NH_3) a oxid uhličitý (CO_2), ve vhodných pracích roztocích. Metoda chemické absorpce je vskutku univerzální a vhodná pro všechny velikosti bioplynových stanic a rozhodujícím faktorem je jen vybrat správnou prací kapalinu (činidlo). Jako činidla se používají často např. 8% roztok hydroxidu sodného ($NaOH$) či methyldiethanolamin ($C_5H_{13}NO_2$) [12]. Na Obr. 1.7 je zobrazeno technologické schéma chemické absorpce. Z bioplynu se nejprve vypírá amoniak, pak sulfan a poté se za pomoci roztoku hydroxidu sodného ($NaOH$) vypírá oxid uhličitý - to za vzniku uhličitanu sodného (Na_2CO_3), tj. sody. Poté je bioplyn stlačen na požadovaný tlak, přičemž po prvním stupni je zařazeno jeho sušení. Soda se navíc jako odpadní produkt uplatňuje ve sklářském průmyslu.



Obrázek 1.6: Schéma úpravy bioplynu metodou PSA. Převzato a upraveno z [12].

Tato technologie disponuje velice levným provozem a dosahuje velmi malých ztrát metanu. Účinnost odstraňování oxidu uhličitého (CO_2) mnohdy přesahuje 99 % [12]. Její největší nevýhodou je stále vysoká investiční zátěž. Koroze a usazování solí jsou často také problematické oblasti.

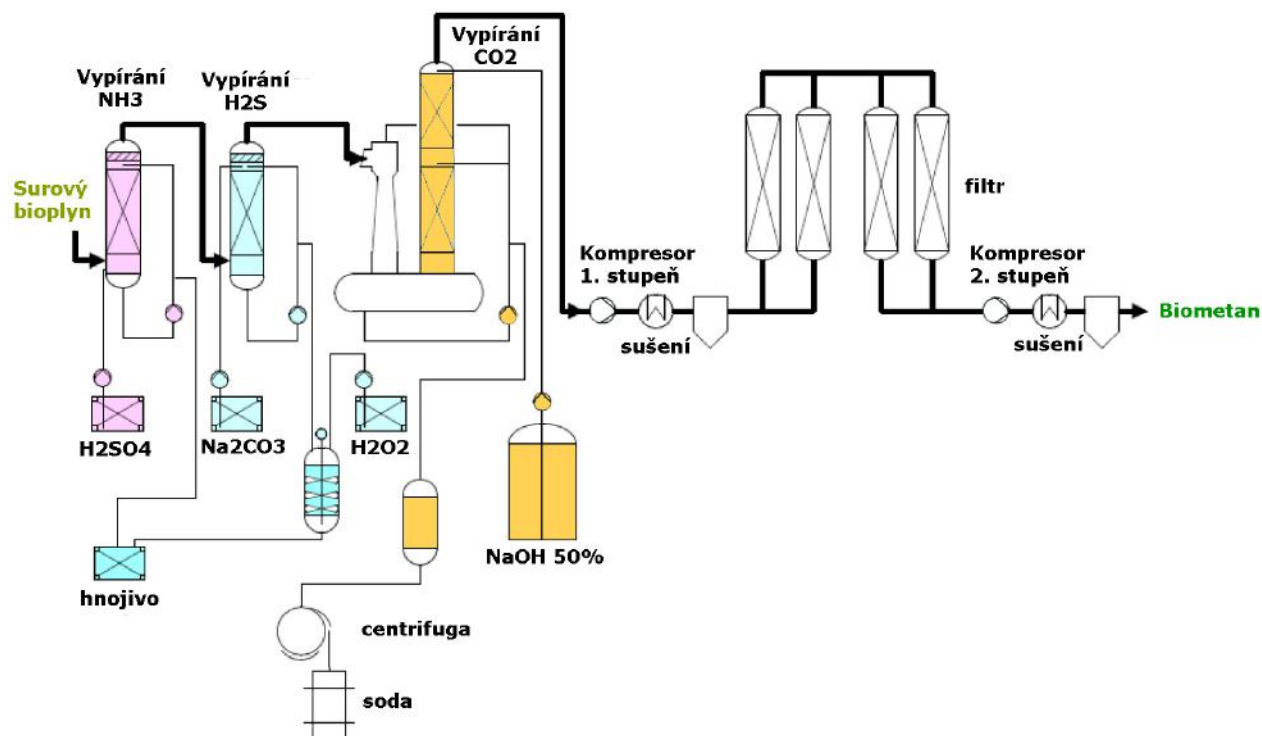
1.5 Technologie membránové separace

Membránové technologie, které se používají k čištění bioplynu jsou relativně mladé. Jde o novou a progresivní technologii s velkým potenciálem. Pozitivní vlastností je jednoduchá výstavba a bezobslužný provoz (minimální provozní nároky) a tím i jeho vyšší bezpečnost. Při srovnání s konvenčními technologiemi disponuje relativně nízkou energetickou náročností (nízká tlaková ztráta) a malou zastavěnou plochou. Velkou výhodou je možnost zavedení membránové technologie do stávajících řešení bioplynových stanic. Samotný princip membránové separace nevyžaduje žádné přídavné chemikálie a nevytváří žádné další odpady. Membránová technologie pracuje v kontinuálním režimu (kontinuální separace) a je možné její technologické kapacity kdykoliv rozšířit.

Nevýhodou membránových procesů je kromě malých provozních zkušeností hlavně krátká životnost membrán, která se pohybuje okolo tří let [12]. Technologie má také vyšší počáteční investiční náklady a jistou nevýhodou je také potřeba předčištění plynu (odsíření, sušení a zbavení částic) [15]. Tato technologie je podrobně popsána v kapitole 2.

1.6 Technologie nízkoteplotní rektifikace (mnohonásobná destilace)

Tato metoda se zdá být perspektivní, její praktické využití je však stále ve stádiu vývoje a ověřování. Někdy se nazývá kryogenní metoda či metoda vymrazování oxidu uhličitého (CO_2). Výhodou této metody je především velmi vysoká čistota výsledného plynu, která je



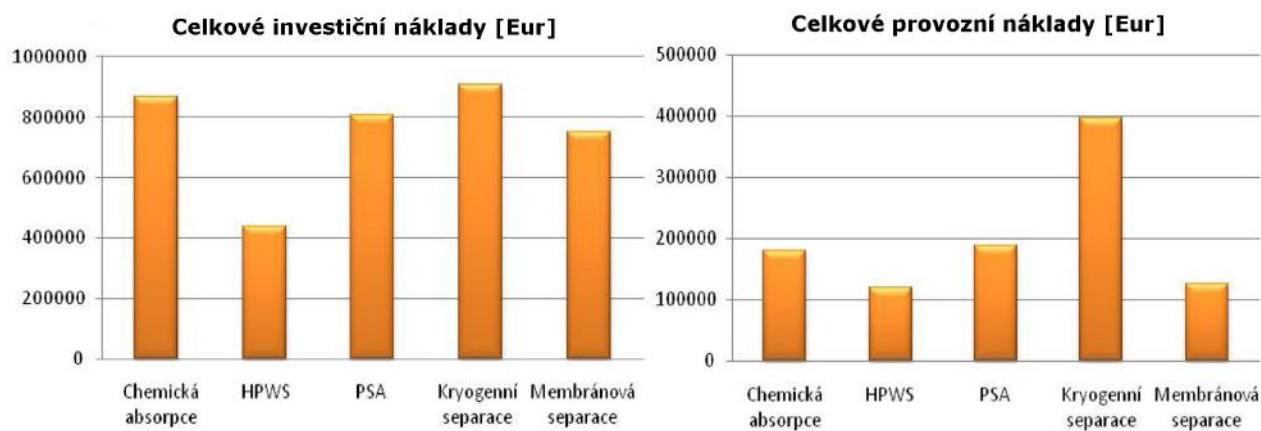
Obrázek 1.7: Schéma úpravy bioplynu metodou PSA. Převzato a upraveno z [12].

mnohdy vyšší než 99 %, a také možnost dále využít zkapalněný oxid uhličitý.

Principiálně je založena na rozdílných bodech varu oxidu uhličitého, jehož bod varu je cca $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$ a metanu (CH_4), jehož bod varu je cca $-161\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pokud dokážeme směs bioplynu vychladit na velmi nízkou teplotu pod $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$, dokážeme díky jeho zkapalnění oxid uhličitý oddělit. Podobně je to i s ostatními nežádoucími látkami ve směsi plynu, které se kromě jejich zkapalnění mohou odstranit také jejich desublimací. Při velmi nízkých teplotách se také můžeme dostat až ke zkapalnění biometanu, který by mohl být v tomto případě náhradou LNG. Uplatnění této technologie však stále naráží na vysokou energetickou a tím i finanční náročnost.

Parametr	PSA (Tlaková adsorpce)	Fyzikální absorpce (Vodní tlaková vypírka)	Chemická absorpce (Aminová vypírka)
Spotřeba energie [KWh.m ⁻³]	0,23	0,3 - 0,6	0,67
Výstupní koncentrace metanu (CH ₄) [%]	97 - 99	98,5	99
Provozní teplota [°C]	-	-	160
Provozní tlak [MPa]	0,4 - 0,7	0,4 - 0,7	Atmosférický
Částečné odstranění sulfanu (H ₂ S)	Ne	Možné	Ano
Odstranění kapalné vody (H ₂ O)	Kontaminant	Ano	Kontaminant
Odstranění vodní páry (H ₂ O)	Ano	Ne	Ano
Odstranění dusíku (N ₂) a kyslíku (O ₂)	Částečně	Ne	Ne

Tabulka 1.2: Přehled parametrů metod pro zušlechťov. bioplynu. Převzato a upraveno z [18].



Obrázek 1.8: Srovnání investičních a provozních nákladů metod zušl. bioplynu (HPWS - High Pressure Water Scrubbing, tj. vodní tlaková vypírka). Převzato a upraveno z [18].

2 TECHNOLOGIE MEMBRÁNOVÉ SEPARACE BIOPLYNU

Zavedením technologie membránové separace bioplynu je možné získat výsledný produkt v podobě biometanu, resp. stlačeného biometanu (bioCNG s podílem metanu (CH_4) větším než 95 %). Tento biometan je možné využívat jako náhradu konvenčních pohonných hmot či pro plynové kotle díky jeho plnohodnotné náhradě zemního plynu.

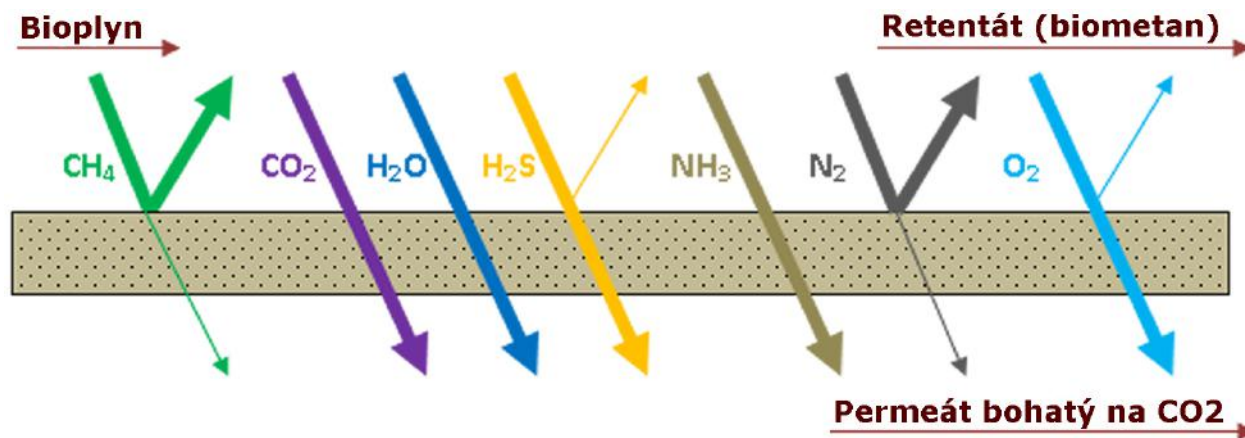
Pro proces dělení je stěžejní tlakový či koncentrační spád mezi oběma stranami membrány. Podstatným kritériem pro permeaci (prostup) dané plynné složky je její difuze přes membránu a její rozpouštěcí vlastnosti. Propustnost oxidu uhličitého je cca 20 krát větší ve srovnání s metanem. Propustnost sulfanu je oproti metanu dokonce 60 krát větší. Jejich vstup skrze membránu je proto rychlejší. V případě bioplynu je tedy permeát tvořen hlavně oxidem uhličitým (CO_2), neodseparovaným metanem (CH_4), zbytkovým sulfanem (H_2S). Složení retentátu je pak dáno normou ČSN 656514, která jeho kvalitu stanovuje na minimální množství metanu 95 %. V praxi je třeba hledat kompromis mezi výtěžností a čistotou získávaného plynu. Pokud se totiž plocha membrány zvyšuje, roste výtěžnost plynného produktu, ale klesá jeho čistota.

2.1 Princip membránové technologie

Její princip vychází ze skutečnosti, že molekuly různých látek mají různé velikosti a je tedy založen na různé průchodnosti molekul plynu membránou. Jednotlivé složky bioplynu se separují především na základě klasického *sítového efektu* - procházejí jenom takové molekuly bioplynu, které mají menší velikost než daná pórovitost membrány. Dále dochází k *mechanismu rozpouštění-difúze*. Molekuly bioplynu se separují podle jejich různé afinity (schopnost chemické látky se slučovat s jinou) k materiálu membrány a jejich různé rychlosti difuze membránou. Dále dochází k dělení složek na základě *elektrochemických interakcí mezi složkami plynu a materiálem membrány*. Ztrátám metanu (CH_4) je často zabraňováno cirkulací bioplynu přes membránu či použitím více separačních stupňů zapojených v sérii [15].

Při řešení problematiky membránových procesů se zavádějí termíny permeát a retentát. Látky, které membránou prochází, tvoří tzv. permeát - jde tedy o plyn, který prochází membránou. Látky, které zůstávají na nástříkové straně, tvoří tzv. retentát (viz Obr. 2.2). Některé molekuly, jako oxid uhličitý (CO_2), prochází membránou a dostávají se na permeátovou stranu membrány. Metan (CH_4) neprochází membránou a zůstává na retentátové straně. Tím vzniká proud bohatý na metan.

Nejdůležitějším stupněm úpravy bioplynu na biometan je odstranění oxidu uhličitého (CO_2). Ten je v surovém bioplynu zastoupen v rozmezí 25 až 55 obj.% [15]. Membrány tedy disponují co nejvyšší propustností oxidu uhličitého a vysokou selektivitou metanu (CH_4). Je třeba vybírat membránu s optimální kombinací selektivity a propustnosti, protože membrána s velkou selektivitou má obvykle malou propustnost, a naopak. Kromě separace oxidu uhličitého dochází i k oddělování dalších složek bioplynu, hlavně vodní páry (H_2O), sulfanu (H_2S), amoniaku (NH_3), kyslíku (O_2) a organokřemičitých sloučenin (viz Obr. 2.2).



Obrázek 2.1: Princip membránové separace plynu. Převzato a upraveno z [14].

2.2 Materiály separačních membrán

Membrány pro separační procesy jsou nejčastěji používány v pevném skupenství v podobě tenkých listů či tenkostěnných trubek. Pevné membrány mají dobré mechanické i dělicí vlastnosti, které lze poměrně snadno měnit změnou vnitřní struktury materiálu. Podle povahy materiálu může jít o membránu z organického či anorganického materiálu.

2.2.1 Typy membrán podle použitých materiálů

Anorganické membrány se vyrábějí z kovových materiálů či různých křemičitých (keramic-kých) materiálů. Díky tomu přirozeně odolávají velkým teplotám a tlakovým rozdílům. Vyrábějí se typicky extruzí (ohřívaný šnek vytlačuje roztavený materiál do požadované formy). *Organické membrány* jsou vyráběny z přírodních či syntetických organických polymerů. Nově se při čištění bioplynu používají také membrány ze silikonového kaučuku, acetátu celulózy či polyimidu [15]. Jejich chemické složení, a tím i jejich mechanické a separační vlastnosti, lze tedy měnit poměrně snadno a ve velkém rozmezí. Lze je také snadno tvarovat. Nejčastěji jsou však vyráběny v podobě plochých listů či dutých vláken (kapiláry s velmi malým průměrem), které jsou uspořádány do svazků [16]. Oproti anorganickým membránám však nejsou tak odolné vůči vysokým teplotám a tlakovým rozdílům [16].

Slibnou metodou se jeví i tzv. zakotvené kapalné fáze s iontovými kapalinami do pórů membrány (tzv. kapalné membrány). Takováto membrána je tvořena vrstvou kapaliny, která je umístěna (zakotvena) mezi fázemi, mezi kterými dochází k transportu dělených složek. Typicky bývá kapalina zakotvena v pórech pevné přepážky. Selektivita je v tomto případě relativně vysoká, také díky tomu, že některé složky dělené směsi se rozpouštějí v kapalné fázi membrány a difundují přes membránu až k permeátu. Selektivitu transportu složek, které mají být odstraněny (např. kyselé či alkalické složky, elektroneutrální či iontové složky) pak lze ovlivňovat složením kapalné fáze membrány [16]. Díky jejich nízké chemické reaktivitě nejsou problémy se zanášením membrány nežádoucími látkami z bioplynu [15]. Pro směs metanu (CH_4) a oxidu uhličitého (CO_2) jsou zvláště výhodné iontové kapaliny, ale jsou v současné době pořád příliš drahé pro průmyslové využití [15]. Jejich hygroskopické vlastnosti (měknutí při pohlcování vzdušné vlhkosti) navíc způsobují ztrátu jejich vlastností ve vlhkém

prostředí [15].

Typy membrán lze dále rozdělit na symetrické, asymetrické a kompozitní. *Symetrické (homogenní) membrány* jsou tvořeny jedním materiálem po celé jejich tloušťce, která se pohybuje od několika desetin milimetru až po jednotky milimetru. *Asymetrickou (nehomogenní) membránu* tvoří aktivní vrstva ze stejného materiálu o tloušťce několika desetin až desítek mikrometru. K separaci bioplynu dochází pouze na aktivní vrstvě a ta je umístěna na silnější podpůrné, porézní vrstvě, která slouží především k vylepšení mechanických vlastností membrány. Podpůrná vrstva je ze stejného materiálu a její tloušťka se pohybuje od několika desetin milimetru až po jednotky milimetru. *Kompozitní membrána* je složená z více vrstev různých materiálů s rozdílnými funkcemi. Separace probíhá pouze na vrchní aktivní vrstvě. Vrchní aktivní vrstva je ukotvena na porézní vrstvě, která plní zejména funkci drenáže (odvodu permeátu). Vše je fixováno na nosné makroporézní podložce (většinou jde o netkanou textilii), která zajišťuje dobré mechanické vlastnosti (pevnost a manipulovatelnost) membrány. Mezi aktivní a podpůrnou vrstvou se někdy vkládají i další mezivrstvy.



Obrázek 2.2: Typy membrán podle použitých materiálů[27].

2.2.2 Volba materiálu membrán

Při výběru materiálu pro membránu separující oxid uhličitý (CO_2) z bioplynu je potřeba brát v úvahu nejen přítomnost oxidu uhličitého a metanu (CH_4), ale také přítomnost sulfanu (H_2S) a vodní páry (např. acetát celulózy je na ni citlivý nemůže být tedy použit bez předúpravy/předsušení bioplynu) [15]. Odstraňování oxidu siřičitého (SO_2), sulfanu, oxidů dusíku (NO_x) a podobných látek je jak u zemního plynu, tak u bioplynu často problematické. Tyto agresivní látky působí na materiál membrány a postupně zhoršují její chemickou stabilitu a separační vlastnosti. Vybraný materiál musí být vůči těmto látkám chemicky stabilní a obvykle musí z fyzikálního hlediska vydržet tlaky vyšší než 2,5 MPa (separace probíhá na retentátové straně a tlak může dosahovat až 10 MPa) a teploty nad 50 °C [17]. U polymerních membrán je třeba si navíc dávat pozor na vyšší teplotu plynu, která by mohla nenávratně poškodit strukturu membrány.

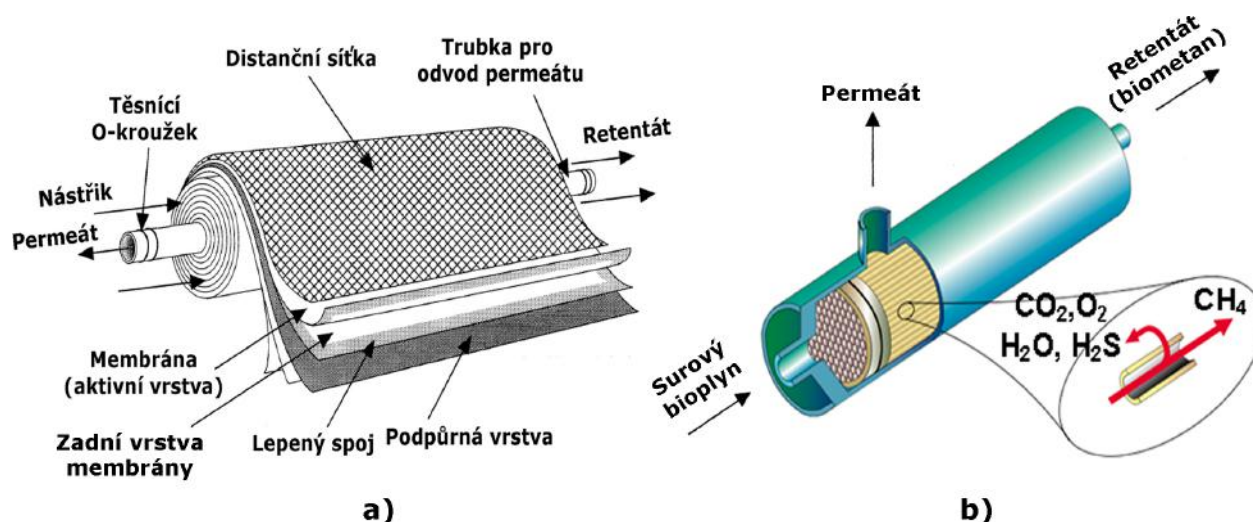
Materiálů, které se pro přípravu membrán používají, není ani v současné době mnoho. Na materiály jsou totiž kladeny řady požadavků. Kromě již zmíněné chemické a mechanické stability musí mít také vhodnou propustnost a dostatečnou selektivitu pro danou plynnou směs. Kromě separačních vlastností materiálu musí být membrána také vhodně zpracovatelná pro výsledné uspořádání v membránovém modulu s dostatečně velkou membránovou plochou. Modul musí mít odpovídající složitost výroby tak, aby výrobní proces nepřesahoval únosnou ekonomickou mez.

Pro separaci plynů a par jsou nejvíce používány polymery a ve stádiu testování jsou i membrány anorganické [17]. Zkouší se již také kombinace polymerních matic a anorganických aditiv. Polymery jsou levné a dobře zpracovatelné do formy spirálově vinutých modulů i do formy dutých vláken [17]. Nejsou však příliš chemicky odolné a snesou poměrně omezené teplotní zatížení [17]. Problémem je také dlouhodobé působení vyšších uhlovodíků a oxidu uhličitého (CO_2), které vede k bobtnání separační vrstvy a nevratnému poškození separačních vlastností membrány [17].

Používané polymerní membrány jsou nejčastěji asymetrické či kompozitní a hlavním procesem separace je *rozpuštěně-difuzní mechanismus*. Ať už jsou membrány ploché či ve formě dutých vláken, mají tenkou a neporézní separační vrstvu umístěnou na porézní podložce, která zajišťuje mechanickou stabilitu, avšak transport částic významně neovlivňuje. Mezi vůbec nejpoužívanější materiály pro separaci plynů a par patří *acetát celulózy a polyimidy*.

2.3 Membránový modul

Při provozu jsou membrány vkládány do pouzdra a tvoří tak membránový modul. Nejčastěji používané moduly jsou plošné a tubulární. *Plošné moduly* mohou být deskové či spirálově vinuté. Spirálově vinutý modul (viz Obr. 2.3 a)) má ve svém středu sběrnou trubku pro odvod permeátu. Na ni jsou navinuty membrány s rozdělovací distanční sítkou. Nástřik do modulu přichází ve směru osy středové trubky a permeát prochází membránou kolmo ke středové trubce, která jej následně odvádí. Efektivita membránové technologie závisí kromě materiálu také na membránové ploše. Z toho důvodu se v posledních letech začaly využívat moduly s dutými vlákny. *Tubulární moduly* jsou moduly s různými průměry trubek, resp. trubiček - trubkové (průměr 4 až 20 mm), kapilární (průměr 1,5 až 4 mm) a s dutými vlákny (průměr menší než 1,5 mm) [15].



Obrázek 2.3: Typy membránových modulů: a) plošný, spirálově vinutý modul; b) tubulární s dutými vlákny. Převzato a upraveno z [15].

Kromě klasických plochých membrán jsou široce využívaným druhem také membrány ve formě dutých vláken. Výroba dutých vláken je však složitější a v porovnání s plochými mem-

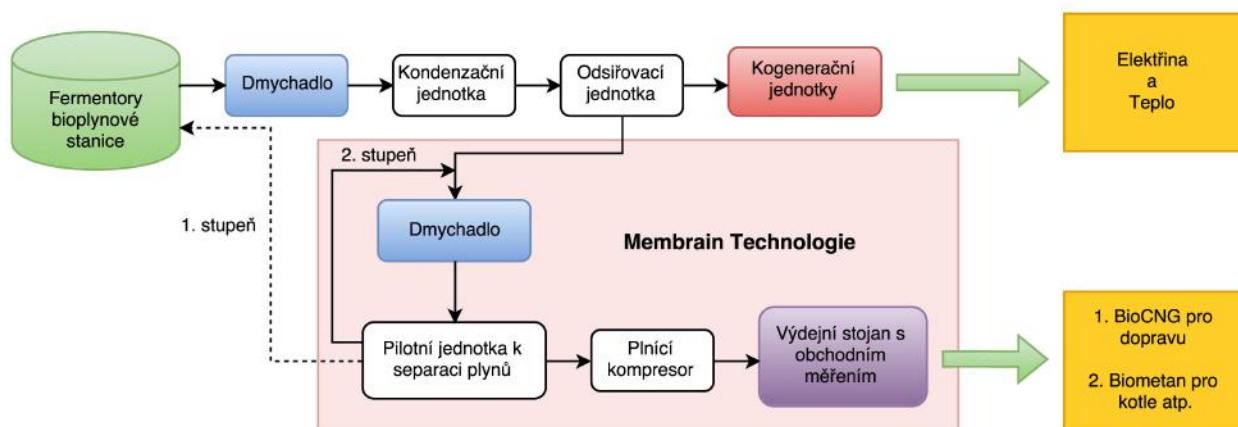
bránami je separační (aktivní) vrstva obvykle tlustší [17]. Modul s dutými vlákny je podobný trubkovému výměníku tepla, vlákna jsou v modulu umístěna jako svazek s utěsněnými konci (viz Obr. 2.3 b)). Vstupující plyn bývá nastříkáván buď z vnitřní či vnější strany vláken. Tyto moduly jsou však náchylnější k poškození a proto vyžadují vyšší kvalitu vstupního plynu (resp. jeho předúpravu) [17]. Provozním požadavkem může být i separace za vyšších teplot než rosného bodu plynné směsi, aby nežádoucí látky nekondenzovaly na membráně (možné poškození její separační schopnosti).

2.4 Aplikace separačních membrán

Společnost *MemBrain s.r.o.* je výzkumná, inženýrsko-technologická společnost, která svou činnost zaměřuje především na výzkum a inovační aktivity v oblasti membránových procesů, zejména pak na přenos výsledků výzkumu do komerční praxe. Hlavním oborem její činnosti jsou membránové separační procesy – separace kapalin a plynů. Dodává integrované řešení v podobě kontejnerového provedení, bez nutnosti vyřizování stavebního povolení. Technologie je upravená na míru, podle požadované kapacity a kvality výsledného produktu (biometanu). Je také nabízena demonstrační pilotáž technologie před její realizací, stejně tak jako garanční a post-garanční servis a zpracování technicko-ekonomické studie. V oblasti BPS se nabízejí pro uplatnění membránové technologie *Membrain*[®] především tyto dvě varianty:

A) Výroba biometanu v kombinaci s kogenerační jednotkou

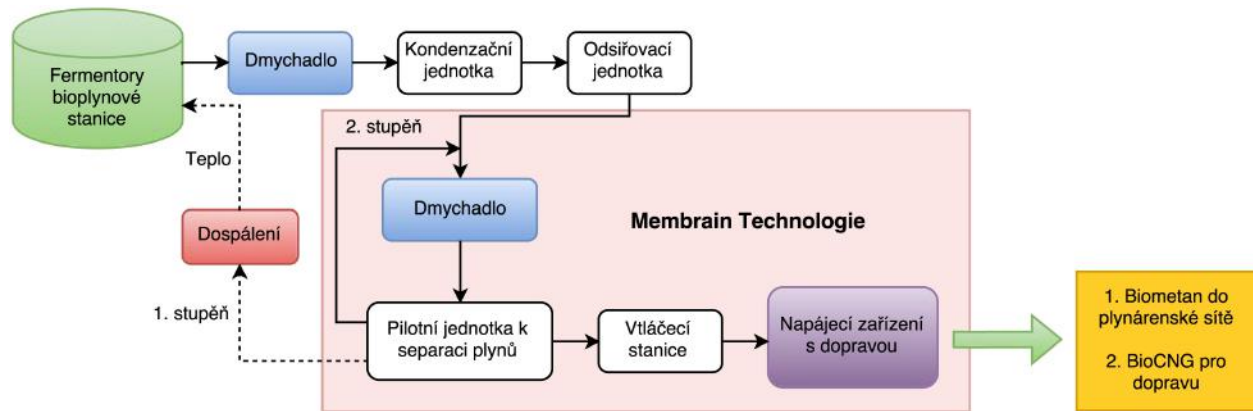
Tato varianta je návrhem řešení pro stávající bioplynové stanice, které jsou již v provozu. Technologické schéma a oblast aplikace membránové technologie je zobrazeno na Obr. 2.4. Při této variantě lze membránovou technologií využívat až 50 % celkové produkce bioplynu. Z toho důvodu, že je bioplyn kvůli kogeneračním jednotkám upravován, jeho dodatečná předúprava je oproti druhé variantě méně náročná. Výstup z technologie *Membrain*[®] lze vhodně využít pro zemědělskou techniku.



Obrázek 2.4: Konceptní schéma aplikace membránové technologie *Membrain*[®] do stávající bioplynové stanice - varianta 1. Převzato a upraveno z [13].

B) Výroba biometanu s jeho využitím mimo bioplynovou stanici

Varianta je řešením pro nové bioplynové stanice, které budou využívat celou produkci bioplynu na výrobu biometanu. Technologické schéma a oblast aplikace membránové tech-



Obrázek 2.5: Konceptní schéma aplikace membránové technologie *Membrain*[®] do stávající bioplynové stanice - varianta 2. Převzato a upraveno z [13].

nologie je zobrazeno na Obr. 2.5. Možná kapacita je zde cca $125 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ biometanu s podílem obsahu metanu vyšším jak 95 % [13]. Výsledný produkt může být vtlačován do vysokotlaké/středotlaké sítě zemního plynu nebo je využíván jako pohonná hmota v dopravě (bioCNG).

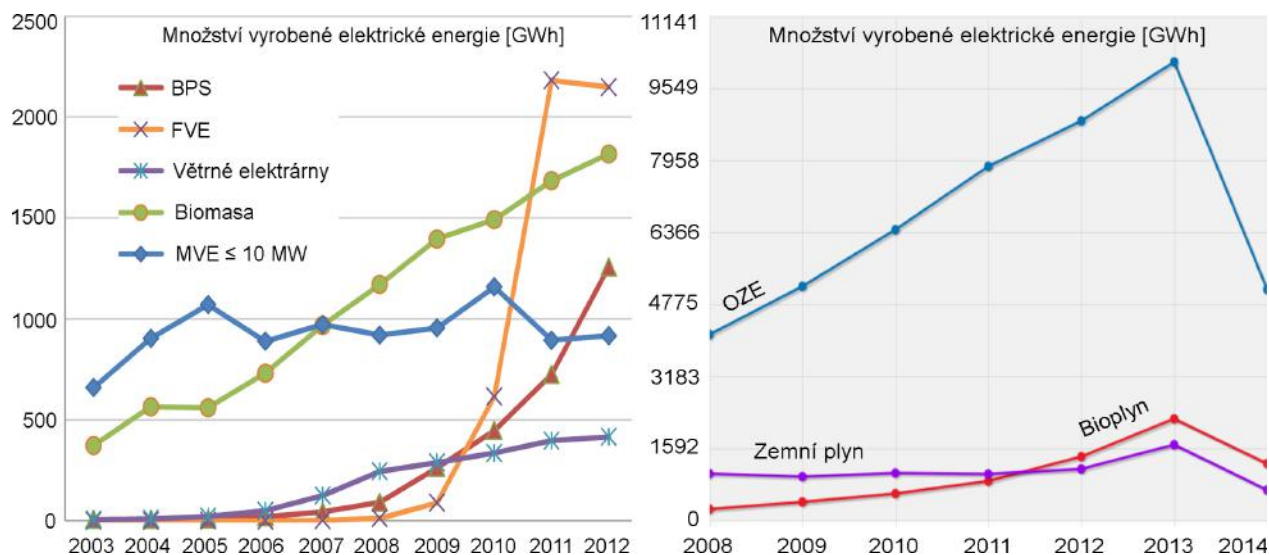
3 VYUŽITÍ BIOPLYNU V PODMÍNKÁCH ČESKÉ REPUBLIKY

3.1 Aktuální situace bioplynu v ČR

Zkušenosti z Německa nebo Rakouska, kde realizace technologií bioplynových stanic probíhala za poslední léta velice intenzivně, potvrzují, že zemědělské bioplynové stanice mají významný pozitivní přínos pro venkov a zemědělství, jsou pro zemědělce novým a stabilním zdrojem příjmů, vytvářejí a stabilizují pracovní místa, produkují ekologickou energii (nahrazování fosilních zdrojů, produkujících skleníkové plyny) a účelně zpracovávají velké množství odpadu na kvalitní hnojivo (ten za normálních okolností končí na skládkách a může znečišťovat životní prostředí nebezpečnými průsaky či emisemi skleníkových plynů)[2]. Bioplynové stanice tak přispívají k ochraně životního prostředí a energetické nezávislosti země[2]. Rozvoj tohoto odvětví ilustruje stav, kdy pouze během roku 2005 bylo v Německu uvedeno do provozu 700 nových bioplynových stanic, s celkovým instalovaným elektrickým výkonem 250 MWe a v roce 2006 činil přírůstek instalovaného výkonu 550 MWe [2]. Ve většině případů se jednalo o zemědělské bioplynové stanice, zpracovávající cíleně pěstovanou biomasu. Existují také bioplynové stanice na zpracování čistírenských kalů z ČOV či bioplynové stanice, zpracovávající komunální odpady. V lednu 2007 byla založena Česká bioplynová asociace. Na jejich webových stránkách sdružují seznam, polohu a informace o aktuálně provozovaných bioplynových stanicích v ČR, které lze najít za pomoci grafického navigátoru na[4].

V České republice se začala výstavba nových BPS zvyšovat cca před deseti lety. Největší rozvoj bioplynových stanic se udál okolo roku 2011 a v dnešní době jsou BPS běžnou součástí venkova. Jejich rozvoj se však v posledních třech letech značně utlumil. V roce 2003 bylo v ČR v provozu 12 bioplynových stanic s celkovým instalovaným výkonem 5,07 MW_e . Jejich počet se postupně zvyšoval a v roce 2012 jich bylo v provozu 264 (s celkovým instalovaným výkonem 167,67 MW_e). Počátkem u roku 2015 vzrostl jejich počet na 507 (s celkovým instalovaným výkonem 358 MW_e a roční výrobou elektřiny 2566 GWh). Podíl energie bioplynu na celkovém objemu OZE byl 24,6 % (viz Obr. 3.1 vpravo). Tento velký nárůst za posledních pár let (viz Obr. 3.1 vlevo) byl způsoben především platností zákona č. 180/2005 Sb., o podpoře výroby elektřiny z OZE. V tomto zákoně je uvedena záruka výkupu elektrické energie s garancí výkupních cen na 15 let (to umožňuje výpočet finančního toku a návratnosti investice, což umožňuje úvěrovatelnost projektu), výše tzv. zelených bonusů, jako příplatků za environmentálně šetrnou výrobu elektrické energie (např. pro výrobu elektřiny spalováním bioplynu v bioplynových stanicích pro zdroj uvedený do provozu po 1. lednu 2008 byla garantovaná výkupní cena elektřiny dodané do sítě 3900 $k.MWh_e^{-1}$ a výše zeleného bonusu 2620 $k.MWh_e^{-1}$). (zdroj odstavce CzBA, ERÚ)

Řadu dalších změn dále přinesl Zákon č. 165/2012 Sb. - o podporovaných zdrojích energie, který upravuje podporu elektřiny, tepla a biometanu z OZE. Novinkou v oblasti BPS byla zejména podpora výroby biometanu formou zeleného bonusu, při jeho vtlačení do plynárenských sítí (distribuční nebo přepravní soustavy). Důvodem byl především fakt, že dřívější se podpora vztahovala pouze k množství vyráběné elektrické energie a tak se zcela opomíjelo, jak BPS využívají teplo, které se nevyhnutelně produkuje při spalování bioplynu. Vznikaly větší BPS, které po většinu roku produkovaly mnohem více tepla, než samy spotřebovávaly a tak bylo přebytečné teplo zbytečně mařeno v chladičích. Z důvodu neudržitelnosti situace tak na ni reagovala podpora výroby biometanu, protože jeho dodávka do sítí zemního plynu za-



Obrázek 3.1: Množství vyrobené elektrické energie. Převzato a upraveno z ERÚ a CzBA.

jišťovala, že se ze stejného množství surovin vyrobí až 2 krát tak více efektivní energie a to při nižších jednotkových nákladech, než pokud by byla vybudována klasická BPS s minimálním využíváním tepla [23].

V roce 2014 však nebyla zprovozněna žádná nová zemědělská bioplynová stanice. Omezení nárůstu počtu BPS (a ostatních OZE) v roce 2014 (viz Obr. 3.1 vpravo) bylo důsledkem zákona č. 310/2013 Sb., kterým došlo ke změně předchozího zákona č. 165/2012 Sb. o podporovaných zdrojích energie. Podle této úpravy byla v podstatě zastavena podpora elektřiny z OZE, uvedených do provozu po 31. 12. 2013. V § 30 nového zákona se doplňuje odstavec 8, který zní: „Podpora biometanu se vztahuje pouze na biometan vyrobený do 31. prosince 2013 včetně.“. I přesto dosáhla celková hrubá produkce elektřiny z bioplynu v roce 2014 2 556 GWh, což znamenalo 14 % nárůst oproti roku 2013 (zdroj ERÚ). V roce 2014 bylo spalováním bioplynu vyrobeno téměř dvakrát více elektřiny než spalováním zemního plynu.

Výstavba nových BPS však pravděpodobně dostane opět zelenou. Návrh zákona o podporovaných zdrojích totiž počítá s jejich podporou, která bude stanovena v souvislosti s vyrobenou elektřinou (prodej elektřiny však bude možný pouze za její tržní cenu), ale i využívaným teplem. Pro splnění podmínek podpory bude nutné využívat alespoň ze 70 % následující vstupní suroviny či odpady: exkrementy hospodářských zvířat, biologicky rozložitelné odpady nebo vedlejší živočišné produkty [24]. Podpora je omezena pouze na BPS do výkonu 550 kW a i když ještě výše podpory nových BPS není známá a její zahájení ani není v zákoně přesně stanoveno, má být stanovena tak, že bude dosaženo patnáctileté návratnosti investice [24].

Počátkem roku 2016 byla vyhlášena první výzva programu podpory obnovitelných zdrojů energie (Operační program podnikání a inovace pro konkurenceschopnost OPPIK 2014-2020). Pro BPS jde o podporu vyvedení tepla ze stávajících výroben elektřiny pomocí tepelných rozvodných zařízení až ke spotřebiteli a vyvedení bioplynu ze stávajících BPS pomocí bioplynovodu do vzdálené KGJ, která využívá bioplyn ze stávající BPS. Kromě investic do hmotného i nehmotného dlouhodobého majetku je uznatelným výdajem i energetický posudek. Žadatelé mohou být všechny typy podniků, včetně zemědělských farem a družstev a

jde tak získat dotace (malé podniky do výše 50 % investice, střední podniky 40 % a velké podniky 50 %) na investice, které zefektivňují provoz BPS.

Ze směrnice Evropského parlamentu a Rady č. 2009/28/ES o podpoře využívání energie z obnovitelných zdrojů, vyplývá pro EU jako celek cíl 20 % podílu energie z OZE a cíl 10 % podílu energie z OZE v dopravě. Pro Českou republiku jsou závazné zejména cíle, vztažené k roku 2020. Jedná se o závazný cíl podílu energie z OZE na hrubé konečné spotřebě energie v České republice, ve výši 13 %, v roce 2020. Jeho součástí je i závazný cíl podílu energie z OZE ve všech druzích dopravy ve výši 10 %. Národní akční plán pro biomasu předpokládá, že v roce 2020 bude v ČR až 742 BPS. V souvislosti s tímto rapidním rozvojem BPS je často poukazováno na to, že by mohly nastat podobné problémy, jako tomu bylo u masivní podpory fotovoltaických elektráren, při které v ČR vyrostlo tisíce nových solárních elektráren, které zapříčinily zvýšení cen elektrické energie i problémy s jejich následnou ekologickou likvidací. Vzhledem k závislosti BPS na provozování zemědělské výroby je nekontrolovaný růst počtu nově vznikajících BPS nepravděpodobný.

3.2 Legislativa v oblasti biometanu

V oblasti biometanu patří k nejdůležitějším předpisům zejména:

- Technická pravidla GAS TPG 902 02 - Jakost a zkoušení plyných paliv s vysokým obsahem metanu,
- Technická doporučení GAS TDG 983 01 – Vtláčení bioplynu do plynárenských sítí, požadavky na kvalitu a měření,
- Zákon č. 458/2000 Sb. ze dne 28. listopadu 2000, o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon),
- Zákon o metrologii č. 505/1990 Sb. (zajištění jednotnosti a správnosti měřidel a měření),
- Vyhláška č. 108/2011 Sb. ze dne 14. dubna 2011 o měření plynu a o způsobu stanovení náhrady škody při neoprávněném odběru, neoprávněné dodávce, neoprávněném uskladňování, neoprávněné přepravě nebo neoprávněné distribuci plynu,
- Vyhláška č. 345/2002 Sb., kterou se stanoví měřidla k povinnému ověřování a měřidla podléhající schválení typu,
- Vyhláška č. 459/2012 Sb. o požadavcích na biometan, způsob měření biometanu a kvality biometanu dodávaného do přepravní soustavy, distribuční soustavy nebo podzemních zásobníků plynu,
- Norma ČSN 656514 - Motorová paliva – bioplyn pro zážehové motory – technické požadavky a metody zkoušení.

Biometan jako takový musí splňovat dané kvalitativní parametry. V České republice byly tyto definovány přijetím **technických pravidel TPG 902 02 - Jakost a zkoušení plyných**

paliv s vysokým obsahem metanu, které nabyly platnosti 1. 3. 2009. Zavedením těchto technických pravidel byla přijata nová definice bioplynu i biometanu. Kvalitativní požadavky byly vyjádřeny v podobě minimálních a maximálně přípustných hodnot jednotlivých sledovaných parametrů. Stěžejní parametry, mezi které patří zejména obsah metanu, vody, kyslíku a síry, musí být měřeny a sledovány kontinuálně. Tento předpis technických pravidel byl však pouze nezávazným technickým dokumentem, a tak se jeho ustanovení začaly využívat ve smluvních ujednáních. Protože byly parametry v TPG 902 02 pouze doporučením, mohl provozovatel dané distribuční sítě zemního plynu požadovat i přísnější hodnoty.

Některá z pravidel však dnes již mají v obchodních vztazích v plynárenství závazný charakter a to přijetím **Vyhlášky č. 459/2012 Sb.** o požadavcích na biometan, způsob měření biometanu a kvality biometanu dodávaného do přepravní soustavy, distribuční soustavy nebo podzemních zásobníků plynu stanovuje především požadavky na kvalitu, odorizaci a tlak vyrobeného biometanu a způsob měření množství biometanu a kvality biometanu v předávacím místě výroby biometanu do přepravní soustavy, distribuční soustavy nebo podzemního zásobníku plynu. Vyhláška současně definuje uznané metody měření jednotlivých parametrů i požadavky na četnost měření. Technické požadavky plynoucí z této vyhlášky jsou plně srovnatelné se standardy ostatních zemí.

Z hlediska práv a povinností smluvních stran (práva výrobce/dodavatele a provozovatele distribuční plynárenské sítě) je důležitý **Zákon č. 458/2000 Sb. (energetický zákon)**. Ten v podobě jednotlivých předpisů definuje práva a povinnosti provozovatele přenosové, resp. distribuční soustavy a výrobce plynu (kromě jiných plynů zde spadá i bioplyn). Jde např. o stanovení způsobu měření a typu měřicího zařízení, který určuje vždy provozovatel distribuční soustavy (§71 odst. 3). Obvykle jde o dohodu mezi importérem plynu a provozovatelem distribuční soustavy na obchodním měření, které zajišťují zejména: procesní plynový chromatograf (stanovení energetického obsahu a chemického složení plynu), průtokoměr, přepočítávač průtoku na standardní podmínky a zařízení pro přenos dat. Provozovatel distribuční sítě zajišťuje instalaci vlastního měřicího zařízení, na náklady výrobce plynu a na své vlastní náklady je pravidelně udržuje a ověřuje správnost měření (§71 odst. 8). Výrobce bioplynu je povinen zajistit měření plynu dopravovaného jím provozovaným plynovodem a vyhodnocené údaje předávat operátorovi trhu účastníků s plynem (§57 odst. 8).

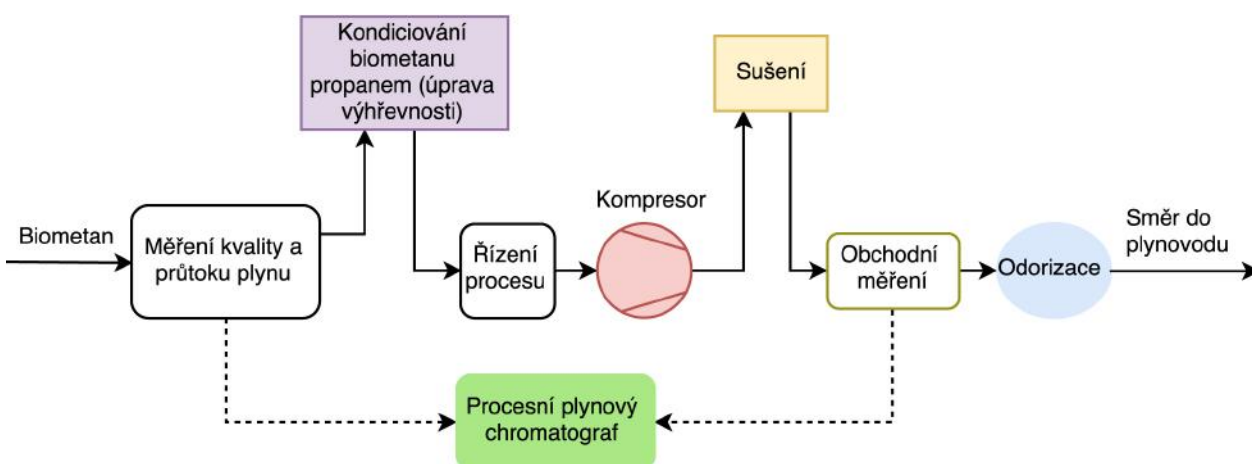
Požadavky na kvalitu pro přímé využití biometanu v motorových vozidlech (tj. bez jeho dopravy veřejnou plynárenskou sítí) jsou definovány v normě **ČSN 65 6514 – Motorová paliva – bioplyn pro zážehové motory – technické požadavky a metody zkoušení**, která vyšla v platnost 1. 1. 2008. Norma stanovuje požadavky a zkušební metody pro bioplyn, určený k užití ve vozidlech se spalovacími, především zážehovými motory, které jsou na tento druh paliva konstruovány. Uvedené požadavky lze aplikovat i pro stacionární spalovací motory pro toto palivo určené. Bioplyn používaný jako palivo spalovacích motorů musí být stlačen na 20 MPa, přičemž maximální tlak bioplynu naplněného v nádrži je 25 MPa.

3.3 Vtláčení biometanu do plynárenských sítí

Minimální technické požadavky na vtláčecí stanici upraveného biometanu v České republice stanovuje normativní dokument technického doporučení TDG 983 01, který vstoupil v platnost 1. 3. 2011. Jde o podrobné technické požadavky na kvalitu a měření, projektování, stavbu, montáž, zkoušení a uvádění do provozu, provoz a údržbu zařízení pro vtláčení bio-

plynu upraveného na kvalitu zemního plynu do plynárenských sítí s maximálním přetlakem 40 bar. Dále předpis definuje způsob monitoringu kvality bioplynu a maximálních odchylek, aby byla zajištěna bezpečnost a provozuschopnost plynárenské soustavy, do které se bude biometan dodávat, stanovuje maximální přípustné odchylky a blíže specifikuje technické a bezpečnostní požadavky na zařízení pro úpravu a vtláčení bioplynu, tj. vtláčecí stanici. Při vtláčení vyčištěného bioplynu do distribuční soustavy nese zodpovědnost za měření jeho kvality jeho dodavatel/výrobce, ale při jeho vtláčení do přepravní soustavy je za měření kvality biometanu ze zákona zodpovědný provozovatel přenosové soustavy.

Základní požadavky na monitoring biometanu mohou být rozšířeny o požadavky plynárenského dispečinku, na který jsou data přenášena. Základními sledujícími parametry jsou především teplota, tlak, spalné teplo a chemické složení biometanu. Teplota dodávaného plynu se měří za kompresory, resp. za chladičem, pokud je nainstalován. Tlak je měřen jak před, tak i za kompresory a také mezi koncovým uzávěrem a armaturním uzlem (místo propojení alespoň dvou plynovodů). Pokud je používán chladič, měří se i tlak chladicího média. Teplota i tlak jsou samozřejmě sledovány také v místě obchodního měření. Chemické složení a spalné teplo (z chemického složení plynu), jsou obvykle měřena v místě obchodního měření.



Obrázek 3.2: Jednoduché schéma vtláčecí plynové stanice. Převzato a upraveno z [22].

Vtláčecí stanici (připojovací místo) jde charakterizovat souborem technologií, zajišťujících přípravu upraveného bioplynu pro vtláčení do plynovodní sítě. Součástí vtláčecí stanice jsou zejména:

- Obchodní (fakturační) měření průtoku plynu (tj. průtokoměr a přepočítač průtoku a toku energie na standardní podmínky),
- Provozní měření průtoku a vlastností plynu, zajišťující kontrolu procesu vtláčení nezávisle na vtláčecí stanici,
- Měření chemického složení biometanu (z chemického složení plynu), kontrola hodnot jeho spalného tepla a Wobbého indexu (stanovuje procesní chromatograf a jde o kritérium záměnnosti zemních plynů),
- Kondicionování propanem (C_3H_8) s cílem úpravy jeho výhřevnosti a Wobbého indexu na optimální hodnoty,

- Sušící a odorizační jednotka,
- Kompresor pro zvýšení tlaku dle požadavků místní sítě,
- Regulace tlaku a průtoku,
- Automatické řízení procesů a veškerých provozních parametrů,
- Telekomunikační zařízení pro dálkový přenos dat provozovateli sítě a dálkové řízení vtláčeční stanice.

3.4 Využití bioCNG v dopravě

V současné době je automobilový provoz jedním z největších znečišťovatelů životního prostředí a v důsledku rostoucího počtu motorových vozidel je životní prostředí díky výfukových zplodinám automobilů zatěžováno stále více. Zhoršování životního prostředí vlivem dopravy si vyžádalo řešení. Nejprve v podobě zavedení katalyzátorů a tím vyloučení olovnatých sloučenin z výfukových plynů, poté začalo docházet k postupnému zpřísnování emisních limitů. Přísnější emisní limity nutí jak výrobce automobilů, aby vyvíjeli dokonalejší pohonné jednotky, tak rafinérie, aby zlepšovaly kvalitu svých motorových paliv. Jedním z dalších způsobů, jak snížit emise klasických pohonných hmot, je jejich úplné/částečné nahrazení alternativními palivy. Mezi jedny z nejvíce používaných alternativních paliv v dopravě dnes patří plynná paliva (ZP, propan-butan). Jsou výhodné především díky jejich ekologickým vlastnostem, dostupnosti a ekonomické výhodnosti ceny plynu. Využívání plynu v dopravě je již v praxi ověřené a technicky vyřešené.

Dá se říci, že obnovitelné i druhotné/alternativní zdroje energie v posledních letech postupně zvyšují svůj podíl na energetických bilancích zemí EU. V současné době také existuje snaha o ještě větší využívání alternativních paliv a technologií v automobilové dopravě. Náhrazení klasických kapalných paliv zemním plynem a biopalivy by měla přispívat ke snížení výfukových emisí z dopravy. Zemní plyn je přitom v dopravě již řadu let prosazován a tak jde pozorovat řadu plnicích stanic i vozidel na plyn (většina automobilek nabízí "plynové" verze svých vozidel). Bioplyn jako takový byl doposud jako pohonná hmota využíván minimálně, protože jeho hlavním využitím je spalování v KGH pro získání tepelné a elektrické energie. V poslední době však řada měst v Evropě uvažuje s jeho využíváním v komunální dopravě a tak se budují nové biometanové plnicí stanice. I přesto, že ve srovnání se ZP je bioplyn obnovitelným zdrojem s nulovými emisemi oxidu uhličitého (CO_2), je třeba řešit jeho čištění na kvalitu potrubního ZP a pro jeho širší uplatnění je nezbytná vnější finanční podpora. Rozvoji použití biometanu v dopravě napomáhá zejména směrnice 2009/28/ES o podpoře využívání biopaliv a jiných paliv z obnovitelných zdrojů pro dopravu, která byla Evropskou komisí přijatá 23. dubna 2009. Ta stanovuje cíl nahradit 10 % konvenčních paliv v dopravě alternativními palivy do roku 2020.

Výhody bioCNG

Metan, obsažený v biometanu či ZP, může být užíván jako motorové palivo BioCNG nebo CNG v klasickém benzínových motorech nebo přímo v plynových motorech. CNG je

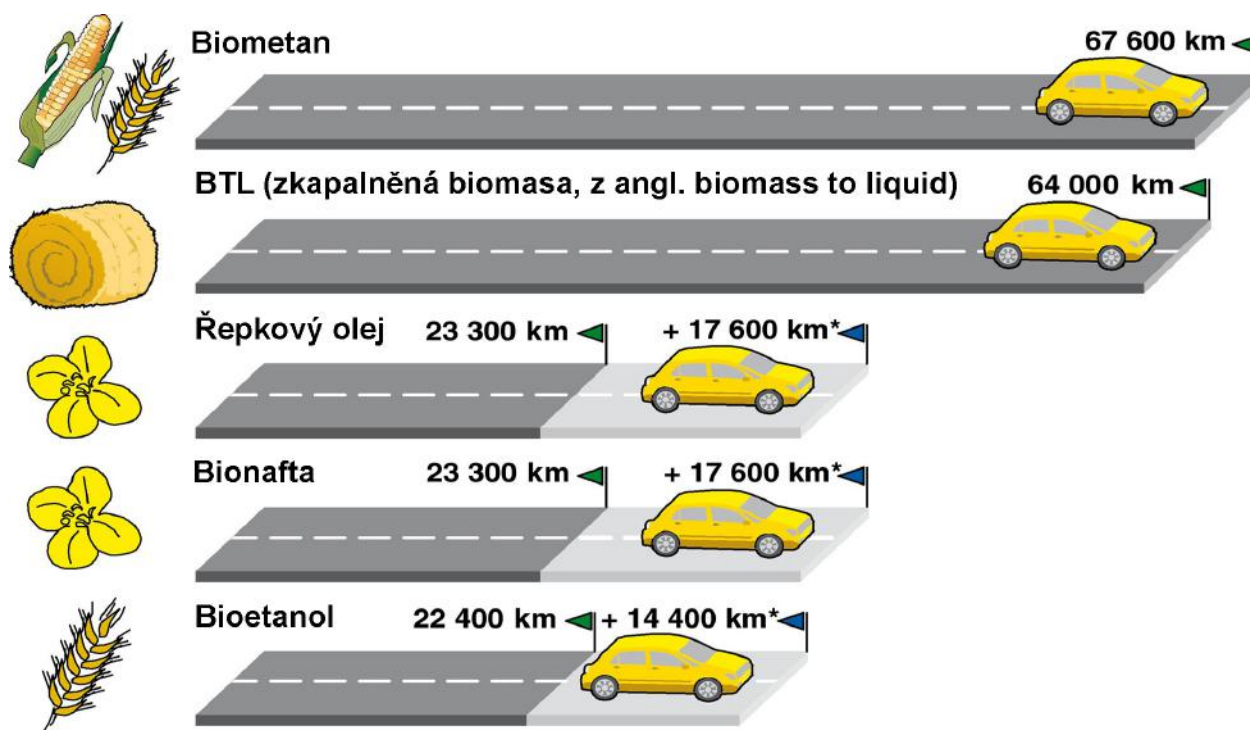
již dnes využíváno napříč celou dopravní technikou. Čistící jednotky mohou mít kapacitu od jednotek až po stovky $Nm^3 \cdot h^{-1}$. Menší jednotky se hodí zejména na farmu, která produkuje vlastní bioplyn, který přečišťuje a zásobuje biometanem řidiče z nejbližšího okolí, popř. zemědělskou techniku. U velkých čistících jednotek je vzhledem k ekologickým vlastnostem ZP velmi vhodné využití plynového pohonu především v městských aglomeracích s vysokým stupněm dopravního zatížení. Může jít o autobusy městské hromadné dopravy, vozidla zajišťující zásobování, svoz odpadu, vozidla taxislužby, policie, pošt, atp.

Jednou z nesporných výhod používání biometanu jsou jeho výborné **ekologické vlastnosti**. Vozidla s palivy na bázi metanu (CH_4) produkují, také díky menšímu obsahu aromátů (včetně benzenu) a nenasycených uhlovodíků, výrazně méně škodlivin než vozidla s klasickým pohonem [22]. Škodlivinami jsou myšleny zejména oxidy dusíku (NO_x), oxid uhelnatý (CO), oxid uhličitý (CO_2), množství pevných částic PM 10, resp. PM 2,5 (z angl. Particulate matter), ale i další zdravotně a ekologicky rizikové uhlovodíky. Oproti klasickým palivům dochází v palivech na bázi metanu k menší tvorbě fotooxidačního smogu (vzniká za přítomnosti slunečního záření) a v případě jeho využití v městských autobusech či nákladních automobilech dochází ke snížení hluku [22]. Produkce oxidu uhličitého (CO_2) u vozidla na zemní plyn, resp. bioplyn, je o více než 20 % menší než u automobilu, který jezdí na benzín, přičemž zplodiny neobsahují oxid siřičitý (SO_2) ani saze [6]. Při používání paliv na bázi metanu navíc nehrozí ani kontaminace půdy a spodních vod při haváriích, způsobujících úniky paliva. Není navíc ani třeba uvažovat ztráty paliva, které vznikají v důsledku odparu, vlivem provozu a tankování pohonných hmot.

Úpravou bioplynu na biometan lze efektivně využít větší část primární energie obsažené v bioplynu, než je dnes obvyklé. Zatímco bioplynová stanice zpravidla zhodnotí 40 až 50 % energie v bioplynu ve formě elektřiny, příp. i tepla (mimo vlastní spotřebu), při úpravě na biometan a jeho dodávce do plynovodní sítě roste tento potenciál na více než 60 % [22].

Jako motorové palivo je dále biometan šetrnější k životnímu prostředí, a to nejen ve srovnání s běžnou naftou či benzinem, ale i jejich obnovitelnými substituty - biodieselem a bioetanolem vyráběnými u nás z tradičních plodin. Hlavním důvodem je totiž jeho **výborná energetická bilance**, se kterou je získáván. V našich podmínkách ČR lze při výrobě biometanolu (z obilí) či bionafty (z řepky olejné) získat reálný hektarový energetický zisk mezi 20 až 50 GJ , při výrobě bioplynu to může být i více než 120 GJ , pokud jsou k jeho produkci použity vhodné plodiny, jakou je třeba kukuřice [22]. V případě výroby bioplynu z kukuřice jsou energetické vstupy, jež je nutné vložit do vypěstování kukuřice, v porovnání s výnosem v podobě dále využitelné zelené hmoty asi v poměru 1:3. Pokud se odpočte vlastní technologická spotřeba bioplynové stanice (závisí na použité technologii anaerobní fermentace, ale představuje zpravidla cca 15–20 % energie obsažené ve vyráběném bioplynu), tento poměr klesá na cca 1:2,5; pokud se odpočte i vlastní spotřeba čištění bioplynu na biometan (opět ve výši 15–20 % v závislosti na typu technologie a konečném tlaku plynu), pak tento poměr dosahuje stále vysokých hodnot, cca 1:2 [22]. To promítá do relativně nejvyšší efektivity počtu ujetých kilometrů, vztažených na 1 ha vypěstované biomasy (viz Obr. 3.3).

Náklady na pořízení automobilu s motorem na CNG jsou v porovnání s klasickým motorem na konvenční palivo v průměru cca o 10 % vyšší. Náklady na pohonné hmoty jsou však relativně nižší a tak je provoz automobilů levnější a **ekonomicky výhodnější**. Z hlediska provozních výhod jde u paliv na bázi metanu především o lepší směšování plynu se vzdu-



Obrázek 3.3: Ujetá vzdálenost osobního automobilu na různá biopaliva, vyprodukovaná z 1 ha zemědělské půdy za rok; pozn: * značí biometan, vzniklý z vedlejších produktů výroby biopaliv (řepkové výlisky, sláma). Převzato a upraveno z [26].

chem, což se projevuje v rovnoměrnosti palivové směsi a rovnoměrnějšího plnění válců. U dvoupalivových systémů to umožňuje zvýšení celkového dojezdu a lepšího startování při nízkých teplotách [22]. Díky tomu, že je zemní plyn přepravován již vybudovanými plynovody, je distribuce plynu k uživateli velmi jednoduchá.

Při srovnávání efektivity produkce biopaliv tedy vítězí biometan. Z Obr. 3.3 jde vidět, že v porovnání s dvěma dnes nejrozšířenějšími biopalivy (bionaftou a bioetanoem) je jeho produkce téměř 3 krát tak energeticky efektivnější. Jistou překážkou však může být jeho nízká měrná energetická hodnota, která spolu s těžkou tlakovou nádobou snižuje reálný dojezd vozidla. Na v současné době obvyklou náplň plynu o objemu 80 l ujede takový automobil jen cca 200 až 300 km. To je relativně dost málo, protože to odpovídá množství energie v cca 20 l klasického motorového benzínu [6]. Jistým řešením by mohlo být nahrazení klasických těžkých nádrží z lehkých kompozitních materiálů. Ty jsou však stále relativně drahé.

V Evropě počet veřejných plnicích stanic dosahuje až k 4,5 tisíc, přičemž je jich nejvíce v Německu (904 plnicích stanic), Itálii (903), Rakousku (203) a Švýcarsku (136) a jejich počet neustále roste [25]. Jejich počet reaguje na růst počtu aut s CNG pohonem. Mezi roky 2013 a 2014 vzrostla spotřeba CNG v ČR o cca 40 % a soubor vozů s tímto pohonem vzrostl cca o 2 tisíce automobilů [25]. Pohon na CNG je obecně považován za čistou technologii. Vzhledem k takřka stejnému chemickému složení je biometan plnou náhradou ZP (palivem do automobilů může být jak zemní plyn, tak biometan, protože obě paliva jsou identická a liší se pouze ve způsobu vzniku) a může tak využívat existující infrastrukturu CNG stanic k tomu, aby byl rovnocennou náhradou ZP ve vozech jezdících na stlačený zemní plyn (CNG). V dnešní době

je již celá ČR pokryta sítí čerpacích stanic na stlačený ZP, takže je zajištěna dojezdnost do jakéhokoliv místa v republice. Biometan tak může ZP plně nahradit, což potvrzují i čísla spotřeby a výrobní kapacity BioCNG v jednotlivých evropských státech. Ve Finsku, které disponuje 24 veřejnými plnicími stanicemi biometanu s kapacitou $2731 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ se na celkové spotřebě CNG podílí tento stlačený biometan (BioCNG) z 35 %; v Norsku je podíl BioCNG na úrovni 85 % , v Holandsku 65 %, ve Švédsku 61 %, ve Švýcarsku 23 %, v Německu 22 % a na Islandu pochází veškerá spotřeba CNG z bioplynu [25]. V ČR je již provozováno více jak 75 veřejných plnicích stanic. Na dvou BPS již probíhá testování technologií na čištění plynu s výdejním místem pro bioCNG, jedna z nich je předmětem této práce.

4 IMPLEMENTACE TECHNOLOGIE MEMBRÁNOVÉ SEPARACE DO STÁVAJÍCÍ BIOPLYNOVÉ STANICE

Cílem této kapitoly je sestavení vhodného koncepčního, technologického a dispozičního řešení pro propojení nové membránové technologie *MemBrain s.r.o.* na úpravu bioplynu na biometan s bioplynovou stanicí.

4.1 Popis bioplynové stanice

Majitel bioplynové stanice si přál její umístění ponechat v anonymitě a proto zde není uvedena její lokalita. Ve fermentoru bioplynové stanice se zpracovávají suroviny zemědělské výroby, rostlinné hmoty, kukuřičné siláže, hovězí kejda, cukrovarské řízky a obiloviny. Výchozím produktem procesu anaerobní fermentace je bioplyn, který se spaluje v KGJ. Součástí BPS je linka hygienizace na úpravu a zpracování kuchyňských odpadů a jiného biologicky rozložitelného materiálu. Výstupem z KGJ je elektrická energie a teplo, jehož část se používá pro ohřev fermentoru a na hygienizaci (odstranění patogenních organismů, které mohou způsobit onemocnění člověka a zvířat). Zbytek tepla je využíván v areálu zemědělské farmy a k vytápění objektů v obci. Generovaná elektřina je vyváděna a prodávána rozvodnému závodu. V případě výpadku veřejné sítě je možnost využití KGJ jako záložního zdroje energie pro areál firmy.

Vstupní suroviny:	Hovězí a vepřová kejda, kukuřičná a treavní siláž, cukrovarské řízky, obiloviny
Rok uvedení do provozu:	Květen 2007
Elektrický výkon:	600 kW
Produkce elektrické energie (denní):	14400 $KWh_{el}.den^{-1}$
Tepelný výkon:	736 kW
Produkce tepelné energie (denní):	17664 $KWh_{th}.den^{-1}$
Produkce bioplynu:	6528 $m^3.den^{-1} = 272 m^3.h^{-1}$
Hodinová spotřeba bioplynu:	261,2 $m^3.h^{-1}$
Typ kogeneračních jednotek:	4 x Tedom Cento 160 SP
Průměr, výška, objem ferm. nádrže:	Ø 16,3 m, 13 m, 2100 m^3
Zastavěná plocha:	0,42 ha = 4200 m^2

Tabulka 4.1: Charakteristické a technické údaje bioplynové stanice.

Nadzemní válcová nádrž ze smaltovaných plechů, která slouží k homogenizaci kejdy a upravené rostlinné hmoty se nazývá **homogenizační nádrž**. Má takový objem, aby mohla pojmout alespoň celodenní vsázku substrátu. Nádrž je vybavena míchadlem, dvěma čerpadly, potrubím a zakrývá ji pachotěsná střecha z textilie. Celá nádrž je opatřena izolací z minerální vlny a je opláštěná trapézovým plechem (základní konstrukční prvek pro velkoplošné krytí, který mají i oba fermentory).

Většina BPS mají vždy dva identické, válcové, zrcadlově otočené **fermentory**. Ty jsou sešroubovány ze smaltovaných (povrchová úprava kovu proti korozi) plechů. Spodní fermentační prostor je míchán ponorným vrtulovým míchadlem a vytápěn topným hadem z ocelových trubek, ve kterých proudí horká voda, která se získává z tepelného výměníku KGJ. Horní plynový prostor uzavírá membrána z poplastované folie a podle množství produkovaného plynu se tato membrána nadouvá z nejnižší do nejvyšší polohy, čímž vytváří vyrovnávací objem dané velikosti. Jak už bylo zmíněno v kap.1, pro dosažení dlouhodobě stabilní produkce bioplynu je důležité udržování stálé teploty ve fermentorech. Oba fermentory BPS pracují v mezofilním režimu při teplotě 40 °C a jsou opatřeny tepelnou izolací z minerální vlny, která je zakrytá plechovým opláštěním. Proti přeplnění jsou oba fermentory chráněny bezpečnostním přepadem, který vede zpět do homogenizační nádrže.

MAJORITNÍ SLOŽKY [% obj.]

Metan (CH_4):	60,0
Oxid uhličitý (CO_2):	38,1
Dusík (N_2):	1,5
Kyslík (O_2):	0,4

MINORITNÍ SLOŽKY [$mg.m^{-3}$]

Ostatní uhlovodíky (C_xH_y)	108,5
Celková síra:	45,2
Sulfan (H_2S):	38
Křemík (Si):	12,1
Chlor (Cl):	2,5
Amoniak (NH_3):	0,8

Tabulka 4.2: Projektované složení výstupního surového bioplynu, produkovaného na bioplynové stanici.

Mezi oběma fermentory se jako spojovací krček nachází **strojovna fermentorů**. Ve strojní části strojovny jsou hlavně potrubí s čerpadly, které přečerpávají kal, průtokoměry, rozvody teplé topné vody s čerpadly a regulačními armaturami a kompresorová stanice, která je zdrojem stlačeného vzduchu pro odsiřovací jednotku. Strojní část obsahuje také čerpadlo, které zajišťuje odvod digestátu (zbytku po fermentačním procesu) z fermentorů do vyhnívací nádrže. Plynová část strojovny obsahuje potrubí s bioplynem, která jsou opatřena plynoměry, uzavíracími a bezpečnostními armaturami, odvodňovači a ventilátory pro zvyšování tlaku plynu.

Energeticky využitelné plyny, jako jsou např. zemní plyn, skládkový plyn či bioplyn, obsahují látky, které mohou komplikovat jejich následné využití. Mezi tyto látky patří především

sloučeniny síry a typickým představitelem sirných sloučenin v bioplynu je již zmíněný sulfan (H_2S). Množství sulfanu, které v bioplynu nalezneme, je přednostně určováno složením substrátu použitého k výrobě bioplynu. Pokud není sulfan odstraněn, může se při jeho vyšších koncentracích tvořit kyselina sírová (H_2SO_4), způsobující korozi zařízení se kterými přichází do styku. U kogeneračních jednotek je typická koroze kontaktů zapalovacích svíček, koroze olejových těsnění a ložisek klikové hřídele. Při spalování bioplynu s vysokým obsahem sulfanu v plynových kotlích dochází především ke korozi spalínového traktu.

Veškeré **odsíření bioplynu** probíhá v místě jímání plynu v reaktoru (horní část fermentorů) a je realizováno dávkováním vzduchu (cca 4 až 6 m^3_N/h) za pomoci kompresorové stanice, dávkovacího zařízení a elektrorozvaděče. Dochází k reakci síry v bioplynu se vzduchem a vznikají krystalky síry, které zůstávají v reaktoru a jsou odváženy s vyhnílou kejdou. Obsah sulfanu (H_2S) je tedy snižován na požadované hodnoty. Tato odsířovací jednotka je v provozu, podobně jako u biofiltru, nepřetržitě.

Vyfermentovaný a anaerobně stabilizovaný materiál je shromažďován ve **skladovací, resp. dohňovací nádrži**, která slouží k dokončení procesu fermentace. Vnitřní prostor nádrže je rozdělen na dohňovací prostor (dole), který je míchán ponornými míchadly na sloupech a plynový prostor (nahore), který je, podobně jako u fermentorů, uzavřen membránou z poplastované textilie. Z této nádrže je separován kal a jeho tuhá složka je odvážena. Jeho tekutá část je dále skladována v již existujících lagunách. Odstředěná voda z lagun je využívána pro zředování vstupní suroviny a odseparovaný kal se zbylou odstředěnou vodou je využíván k přímé aplikaci pro zhodnocení zemědělské půdy.

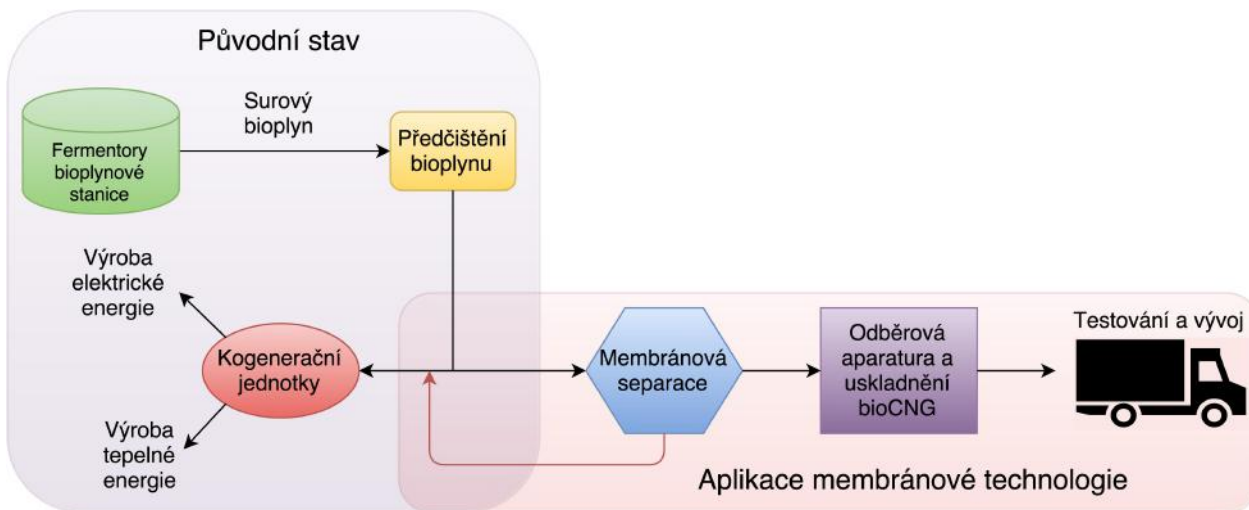
Pokud se v bioplynové stanici zpracovávají i hmoty živočišného původu, je třeba tomu uzpůsobit fermentační proces (např. dostatečná doba zdržení vstupů ve fermentorech) a používat **biofiltr**, resp. deodorizační jednotku. Biofiltr je nadzemní plastová nádrž, která je naplněna filtračním materiálem s organickou náplní. Jsou na něj napojeny výstupy vzduchotechniky a slouží především pro snížení emisí zápachu. V praxi je vzdušina ventilátorem vháněna pod plastový rošt s vrstvou organické náplně a celkový objem vzduchu je za hodinu vyměněn cca čtyřikrát. Do biofiltru přichází vzduch z jímky hovězí kejdy ($120 m^3$), homogenizační jímky ($120 m^3$) a vstupních nádrží (20 a $50 m^3$). Celkové odsávané množství vzduchu, které prochází biofiltrem, je $1200 m^3 \cdot h^{-1}$. Biofiltr je v provozu $8760 h \cdot rok^{-1}$ a pracuje s účinností cca 65 %.

4.2 Konceptní řešení

Cílem nasazení membránové technologie na BPS je vyčištění bioplynu na úroveň zemního plynu tak, aby jej bylo možné využívat pro pohon vozidel na stlačený zemní plyn CNG, či tento vyčištěný biometan vtlačet do sítě zemního plynu. Membránovou technologii je možné využít za pomoci technologie *MemBrain*, která je umístěna v kontejneru. V kontejneru o rozměrech 6 x 2,5 x 2,5 m se nachází jednotka na separaci plynů a vysokotlaký kompresor pro stlačování vyčištěného biometanu. Tento vyčištěný biometan se uskladňuje a testuje.

Konceptní řešení implementace technologie Membrain je znázorněno na obrázku Obr. 4.1. Na obrázku je znázorněn jak stav před zavedením membránové technologie čištění bioplynu, tak i stav po její implementaci. Implementovaná technologie membránového čištění bioplynu na úroveň zemního plynu je naznačena růžovým rámečkem, a to včetně jeho uskladnění a

následného testování. Je zaznačen i vratný proud do kogenerace, který v jisté míře ovlivňuje výkon stávajících kogeneračních jednotek.



Obrázek 4.1: Konceptní řešení čištění bioplynu na úroveň zemního plynu.

4.2.1 Popis technologie Membrain

Jednotka na separaci plynu je určena pouze pro separaci plynů, popř. nekondenzujících par. Pevné částice by mohly zanechat membránové moduly či citlivé měřicí a regulační prvky. Z bioplynu je proto nutné odstranit částice s charakteristickým rozměrem větším $5 \mu\text{m}$.

Separací jednotka je určena pro separaci bioplynu, obecně však pro směsi plynů nepřekračující kritické hodnoty parametrů plynu. Pro tyto limitní parametry jsou kalibrovány průtokoměry a regulátor průtoku. V případě použití jiných typů směsí plynu s jinými vlastnostmi je nutno provést další korekce a recalibraci. Limitní parametry vstupujícího bioplynu jsou shrnuty v tabulce níže (pozn. překročení kritických hodnot může trvale poškodit separační jednotku).

Parametr/složka	Maximální hodnota	Kritická hodnota
Metan (CH_4)	100 % hm.	-
Oxid uhličitý (CO_2)	60 % hm.	100 % hm.
Sulfan (H_2S)	500 ppm	2000 ppm
Amoniak (NH_3)	300 ppm	1500 ppm
Obsah vlhkosti	10 % hm.	15 % hm.
Maximální tlak	0,3 bar_g	0,5 bar_g
Minimální tlak	-0,3 bar_g	-0,5 bar_g

Tabulka 4.3: Limitní parametry vstupujícího surového bioplynu.

Bioplyn (při mírném přetlaku do 0,2 bar) vstupuje do separační jednotky středotlakým rozvodem a prochází přes solenoidový ventil, který je ovládán centrálním řídicím systémem,

a klasický pojistný kohout (pro případ výpadku proudu). Průtok bioplynu je možné v omezeném rozsahu regulovat na vstupní větvi.

Bioplyn dále vstupuje do prvního kondenzačního tepelného výměníku, který se skládá z rekuperační a kondenzační části. Dochází k odstranění prvního definovaného množství vody z bioplynu. Poté je bioplyn přiveden na adsorpční kolonu, kde je zbaven sulfanu (H_2S). Následně pokračuje do středotlakého kompresoru, který jej stlačuje na 10 až 12 barů. Vysokotlakým rozvodem je přes olejový filtr (odstranění mikroskopických nečistot) přiváděn do druhého kondenzačního tepelného výměníku (stejný jako ten první), kde dochází k odstranění zbytkového podílu vodní fáze. Po odstranění vlhkosti z bioplynu je dále tlačěn do dvou, sériově zapojených membránových modulů. Dochází k separaci metanu (CH_4) od oxidu uhličitého (CO_2), na minimální, analyzátořem kontrolovanou čistotu, která je požadována normou ČSN 656514 (požadavky na kvalitu bioplynu, především pro zážehové motory), tzn. 95 %. Takto vyseparovaný metan se přivádí na sání vysokotlakého kompresoru, který jej stlačuje do vysokotlakého plynovodu na cca 230 barů. Dále se jím plní tlakové lahve pro možnost výdeje ve formě bioCNG.

4.2.2 Požadavky a implementace technologie Membrain

Pro připojení a provozování kontejneru s membránovou technologií je třeba splnit jisté požadavky. Kontejner pro své výzkumné aktivity potřebuje cca $13 m_N^3$ bioplynu, což je přibližně 5 % celkové produkce bioplynové stanice. Výstup bioCNG z technologie je pak cca $6,5 m_N^3/h$. Je také třeba zajistit vstupní přetlak bioplynu cca 0,2 bar. Ten zajišťuje dmychadlo, které je elektronicky napojeno na měřicí a regulační systém a je ovládáno z řídicího systému společnosti Membrain.



Obrázek 4.2: Praktické řešení aplikace membránové technologie do stávající BPS.

Retentát z membránové separace je akumulován a testován a proud odseparovaných plynů s nízkou koncentrací metanu (CH_4 , permeát) je z kontejneru odváděn. Tento proud je vrácen do proudu bioplynu, který je veden na kogenerační jednotky. Dle konkrétní aplikace tento vratný plynný proud obsahuje přibližně 5 až 20 % metanu (CH_4). Z kontejneru vychází také kondenzát, který je jímán do plastového zásobníku a zneškodňován ve stávajícím odpadovém hospodářství bioplynové stanice.

4.2.3 Jednotka pro separaci plynů

Jednotka pro separaci bioplynu je určena pro pilotní testy. Kromě běžné práce s neagresivními plyny dokáže při zajištění vhodných podmínek (mimo mez výbušnosti) zvládat i potenciálně hořlavé či výbušné plyny. Součástí jednotky je hlavní zásobník stlačeného plynu a další 4 vyrovnávací tlakové nádoby (2x27 a 2x10 litrů). Jednotka obsahuje uzavírací ventily, filtry, senzory i regulátory tlaku, průtoku a teploty. Jak teploty, tak i tlaky jsou elektronicky hlídány a při překročení nastavených limitních hodnot dojde k aktivaci varovného hlášení, případně k automatickému zásahu řídicího systému (např. elektrické odpojení jednotlivých částí).

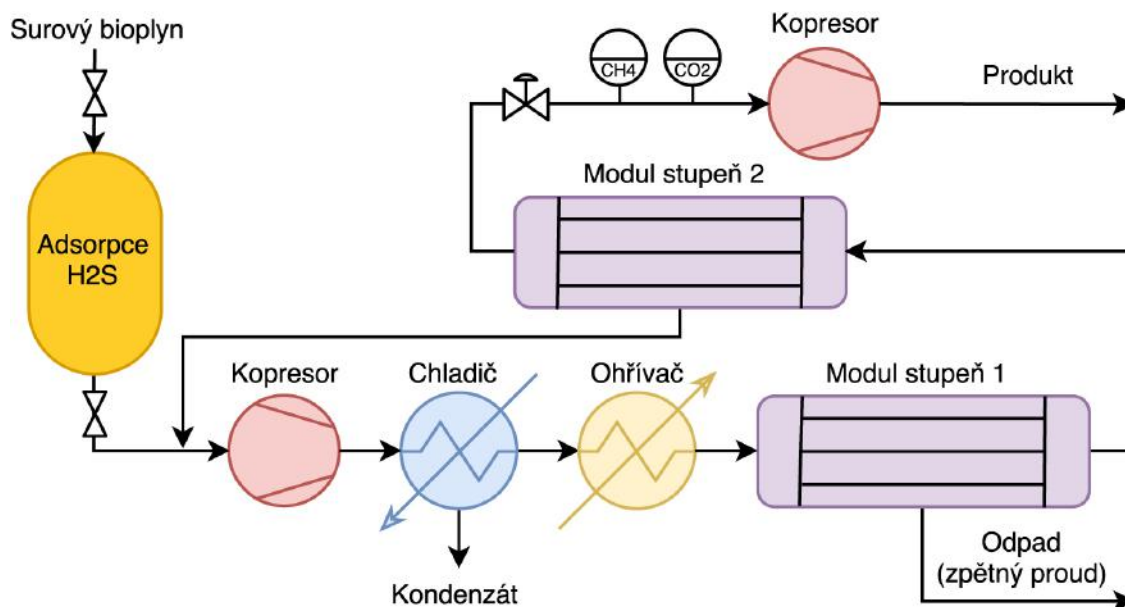


Počet membránových modulů	max. 2 ks
Průtok na sání kompresoru	0 - 30 Nm ³ .h ⁻¹
Nejvyšší/nejnižší abs. dovolený tlak	35/0 bar
Kritický abs. tlak (pojišťovací ventil)	40 bar
Testovací tlak	2/35 bar
Nejvyšší/nejnižší dovolený teplota	50/5 °C
Kritická teplota	55/0 °C
Maximální elektrický příkon	18,8 kW
Rozměry jednotky bez kompresoru	2,45 x 1,5 x 1,95 m

Obrázek 4.3: Přibližný náhled a provozní charakteristiky jednotky pro separaci plynů.
Převzato a upraveno z [21].

Jde k ní zvolit další doplňkové příslušenství v podobě analyzátorů plynu, odsiřovací jednotky, středotlakého kompresoru včetně zásobníku stlačeného plynu, předehřevu plynu či dalších/přídavných membránových separačních modulů. Dalším doplňkem je také šroubová vývěva (dva šroubové rotory se synchronně otáčejí ve společném statoru a jejich závitů do sebe vzájemně zapadají), pro možnost provádění permeabilit za sníženého tlaku (např. permeace do vakua). Náhradními díly jsou především membránové moduly, mechanické filtry a náplň pro odsiřovací jednotku. Jak ukazuje Obr. 4.4, technologií pro čištění bioplynu od nežádoucích příměsí je v tomto případě dvoustupňová separace (konfigurace, resp. volba uspořádání procesu je dvoustupňová) pomocí membrány z dutých vláken. Permeát modulu druhého stupně je recyklován a vrácen před kompresor. Tímto způsobem lze dosahovat požadované čistoty metanu při jeho velkém zisku. Produktem je biometan s obsahem metanu 95 – 99 % a odpadní plyn s obsahem bioplynu stále ještě na úrovni 20 %. Tento odpadní plyn je opět vpouštěn do potrubí, které vede bioplyn ke KGJ, která jej pak běžným způsobem využije. Technologie tedy nevykazuje žádnou ztrátu metanu, protože si jen odebírá část me-

tanu z bioplynu. Vyčištěný plyn je stlačen na 25 MPa a standardním výdejním zařízením připraven pro plnění automobilů s pohonem CNG.



Obrázek 4.4: Dvoustupňová konfigurace separačního procesu. Převzato a upraveno z [18].

4.2.4 Uskladnění bioCNG

V oblasti uskladnění bioCNG je vhodné mluvit o tzv. virtuálním plynovodu. Jde o skupinu výrobků, které mají sloužit jako náhrada klasické plynovodní sítě. Mohou tak zajišťovat zásobování plynem destinace, které nejsou napojeny na plynovodní síť, plynifikaci průmyslových areálů či síť distribučních plnicích stanic CNG. V neposlední řadě mohou sloužit jako nouzová řešení při odstraňování poruch a výpadku plynového vedení či jako výzkumné laboratoře v přírodě.

Virtuální plynovod tedy může sestávat z řady výrobků a některé z nich jsou zobrazeny na Obr. 4.5. Úplně vlevo jdou vidět **trailerové plynové zásobníky**, většinou do objemu 5200 Nm^3 (standardně pro tlak 250 bar a teploty od -20 , resp. -40 °C pro provedení „polar“ až 60 °C), které mohou být v jednosekčním či vícesekčním provedení [28]. Trailery se naplní v mateřské plnicí stanici a na místech bez rozvodu plynového vedení se vystaví dceřiné stanice. Uprostřed je zobrazena **mateřská plnicí stanice**, která je řešena pro bezobslužný provoz a jejíž výkon kompresorů se může pohybovat od 20 až po tisíce Nm^3 (výstupní tlak je stejný jako v případě trailerů, tj. 250 bar) [28]. Využívá se nejvíce ve firemních areálech a dopravních podnicích. Napravo jsou zobrazeny **stacionární plynové kontejnery**, které jsou dodávány v objemech od 2500 až po 5200 Nm^3 , jejichž pro vedení může být jedno či více sekční [28]. Úplně vpravo jde vidět jeden z mobilních **testovacích svazků**, které jsou dodávány v objemech od 200 do cca 1500 Nm^3 a jejich největší uplatnění spočívá v zásobování menších objektů či jako součást plnicích stanic CNG či jiných technologií [28]. Tlakové a teplotní provozní parametry pro stacionární plynové kontejnery i svazky jsou shodné s parametry trailerových plynových zásobníků.

Pro uskladnění bioCNG se tedy nabízí několik možností. Vzhledem k možnosti vyrobit tlakové lahve přímo ve skupině *Vítkovice, a. s.*, se pro prozatímní účely testování organizačně i ekonomicky (odpadá pronájem či nákup odjinud) jeví nejvhodnější použití svazku tlakových lahví 15 x 148 l.



Obrázek 4.5: Možnosti uskladnění CNG. Převzato a upraveno z [28].

Svazek pro testování se skládá z patnácti 148 l ocelových lahví s pracovním tlakem 300 bar. Každá ocelová nádoba je opatřena uzavíracím ventilem a lahve jsou ve svazku propojeny potrubími z nerezové oceli, která jsou svedena do spojovací sběrné trubice. Pokud je třeba svazek transportovat, mohou se použít závěsná oka v horní části konstrukce svazku (transport jeřábem) či využít vodících lišt pro transport vysokozdvížným vozíkem. Celý svazek je opatřen manometrem, uzavírací ventil se nachází před přípojnou kostrou a hlavní uzavírací ventil je za přípojnou kostrou. Základní technické parametry jednoho svazku jsou:

- Pracovní tlak systému 300 bar, maximální tlak 450 bar
- Rozsah pracovních teplot od -20 °C do +65 °C
- Počet ocelových lahví 15 ks, vodní objem jednoho kusu 148 l
- Hmotnost ocelové lahve, jejího ventilu a dalšího příslušenství 185 kg
- Hmotnost plynové náplně svazku 486 kg (při pracovním tlaku systému 300 bar)
- Kompletní hmotnost svazku 3690 kg (bez náplně), resp. 4176 kg (s náplní při pracovním tlaku systému 300 bar)

V současnosti skupina *Vítkovice, a. s.* patří mezi tři největší výrobce tlakových nádob na světě. Stlačený plyn obvykle převáží ve svazku tlakových nádob k vzdálenému využití a kromě toho připravuje řešení (v podobě přepravních kontejnerů a vlečných vozidel) pro přepravu BioCNG o objemech až 5200 Nm³ [25]. Skupina má ve výrobním programu zařazené i výdejní plnicí stanice CNG s kapacitou až 300 Nm³.h⁻¹.

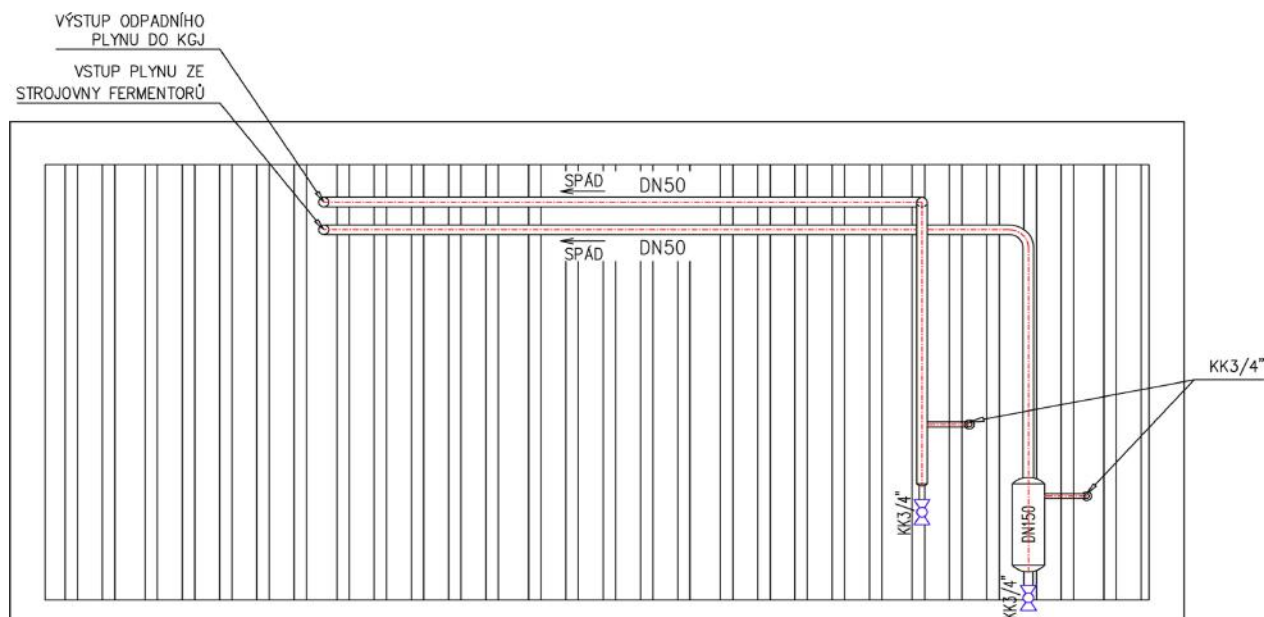
4.3 Technologické řešení

Z hlediska technologického řešení je třeba vyřešit hlavně připojení kontejneru **Membrain** na rozvod elektřiny a bioplynu. Je třeba dále rozšířit požární bezpečnostní systém (požární

bezpečnostní řešení stavby) a projednat jeho schválení s příslušnými orgány státní správy. Výkres technologického schématu je přiložen v přílohách (Příloha č.3).

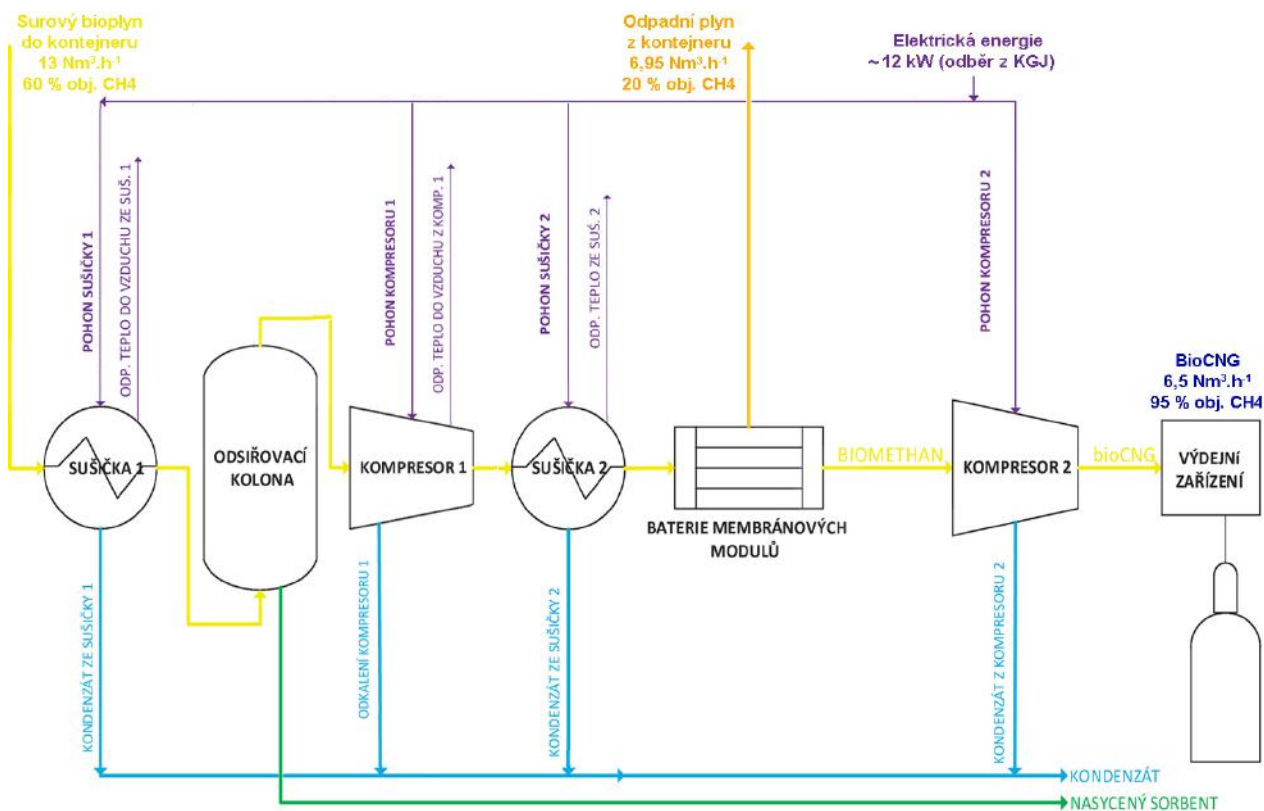
4.3.1 Výzkumný kontejner s technologií Membrain

Při instalaci jednotky je třeba zajistit vodorovnou plochou a kontejner řádně uzemnit. Je nutné nainstalovat elektropřípojku a napojit výzkumný kontejner na větev surového bioplynu, která je vedena ze společné strojovny obou fermentorů.



Obrázek 4.6: Kontejner s Membrain technologií o rozměrech 6,5 m x 2,5 m x 2,5 m.

Obr. 4.7 zobrazuje vnitřní uspořádání a hlavní procesy ve výzkumném kontejneru. Z původní hlavní větve je za pomoci dmychadla odebírán surový bioplyn o objemovém průtoku cca $13 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Bioplyn je postupně zbavován vody a síry (zejména sulfanu H_2S) a před jeho dalším vysušováním je ještě stlačován kompresorovou jednotkou. Po jeho průchodu prvním stupněm membránového modulu je retentát veden do druhého stupně a permeát s nízkým podílem metanu (CH_4S) je dopravován zpět (oranžová větev) do hlavní původní větve, která vede bioplyn ke kogeneračním jednotkám (viz Obr. 4.4). Ze sušiček a kompresoru je odebírán kondenzát a z odsiřovací kolony nasyceny sorbent. Celý kontejner je zásobován elektrickou energií o velikosti cca 12 kW , která je odebírána od místních kogeneračních jednotek. V porovnání s Tab. 4.1 je vlastní spotřeba výzkumného kontejneru cca 2 %. Po stlačení biometanu na požadovaný tlak je ho tímto způsobem produkováno cca $6,5 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Podíl odběru surového bioplynu (porovnání s Tab. 4.1) do výzkumného kontejneru ze stávajícího potrubí je cca 5,5 %.



Obrázek 4.7: Vnitřní technologické uspořádání výzkumného kontejneru.

Z provozního pohledu je (dle konkrétního obsahu sulfanu (H_2S)) nutné počítat i s omezenou životností sorbentu v adsorpční koloně (obvykle jednotky let). Je také nutné počítat s omezenou životností membrán, která se pohybuje od cca 6 do 7 let.

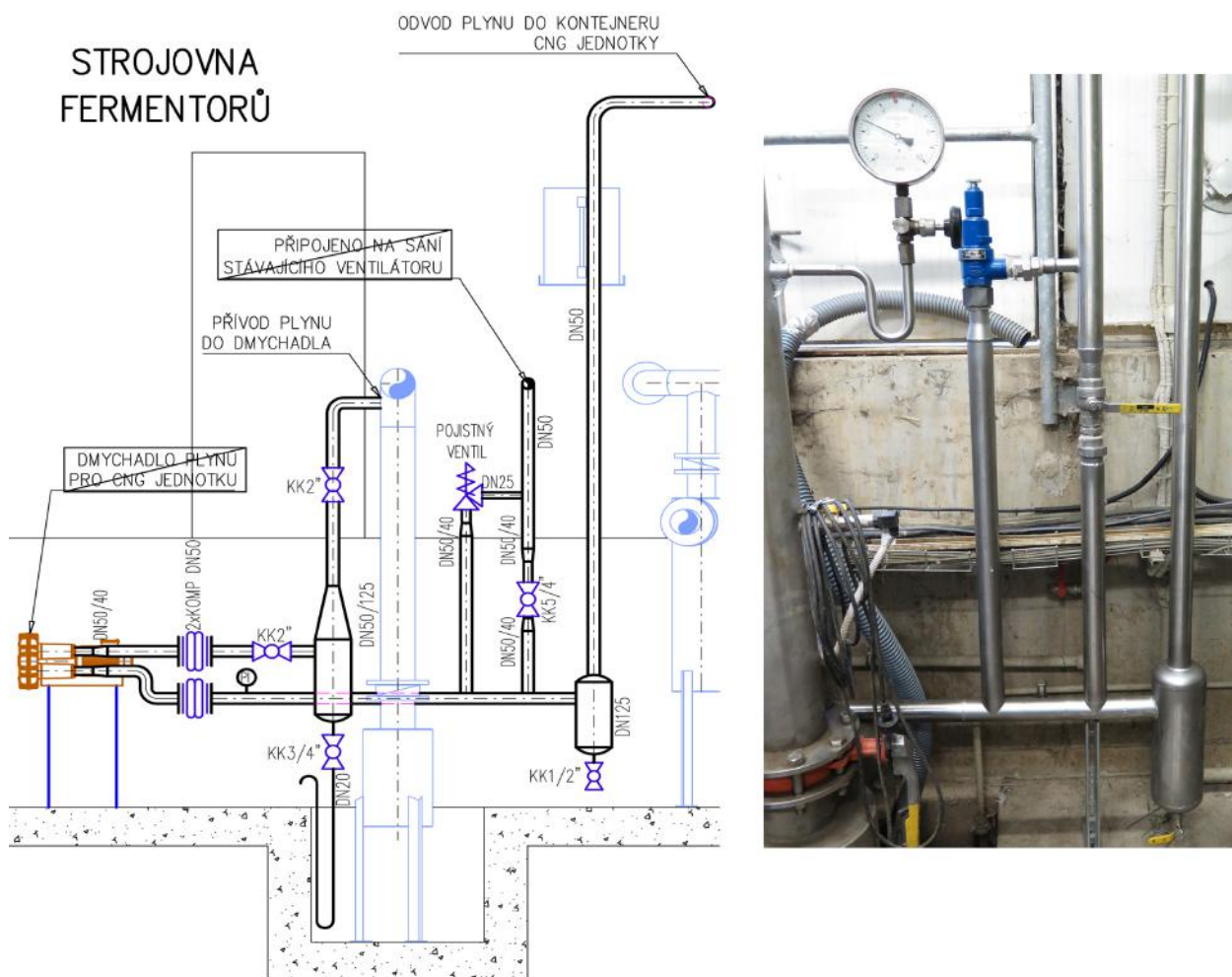
4.3.2 Napojení na elektrickou energii

Výzkumný kontejner potřebuje ke svému provozu cca 12 kW elektrické energie (viz Obr. 4.7). Elektrická energie je odebírána z generátoru KGJ. Pro napojení na zdroj elektrické energie byl použit silový kabel pro pevné uložení v otevřeném prostoru, v zemi i v betonu. Kabel je veden jak po kontejneru (v plastové chráničce), tak i pod zemí a je jištěn v hlavním rozvaděči bioplynové stanice. Uzemnění kontejneru je provedeno spojením se stávající zemnicí soustavou bioplynové stanice.

4.3.3 Napojení na bioplyn

Pro dopravu bioplynu ze společné strojovny fermentorů do kontejneru je uvnitř strojovny umístěno plynové dmyhadlo. Sání plynového dmyhadla je připojeno na stávající plynovod potrubím DN50. Ten je veden po stávajících potrubních sloupech a za pomoci ventilátorů vede bioplyn až ke kogeneračním jednotkám. Na výtlak dmyhadla je namontován nový plynovod DN50, který vede bioplyn až do kontejneru. Výstup z dmyhadla je osazen pojistným ventilem a kvůli možnosti snížení tlaku a množství plynu pro kontejner je na výstupu namontován propoj pro odlehčení. Propoj je naveden až na sání stávajících ventilátorů.

Před vstupem bioplynu do kontejneru je potrubí zakončeno odvaděčem kondenzátu a uzavíracím ventilem. Z kontejneru je dále vyvedeno zpětné potrubí DN50, které odvádí plyn do stávajícího plynovodu, který odvádí plyn ke kogeneračním jednotkám. Na výstupu zpětného potrubí z kontejneru je umístěn uzavírací kohout a odvaděč kondenzátu.



Obrázek 4.8: Pohled na vnitřek společné strojovny.

4.4 Dispoziční řešení

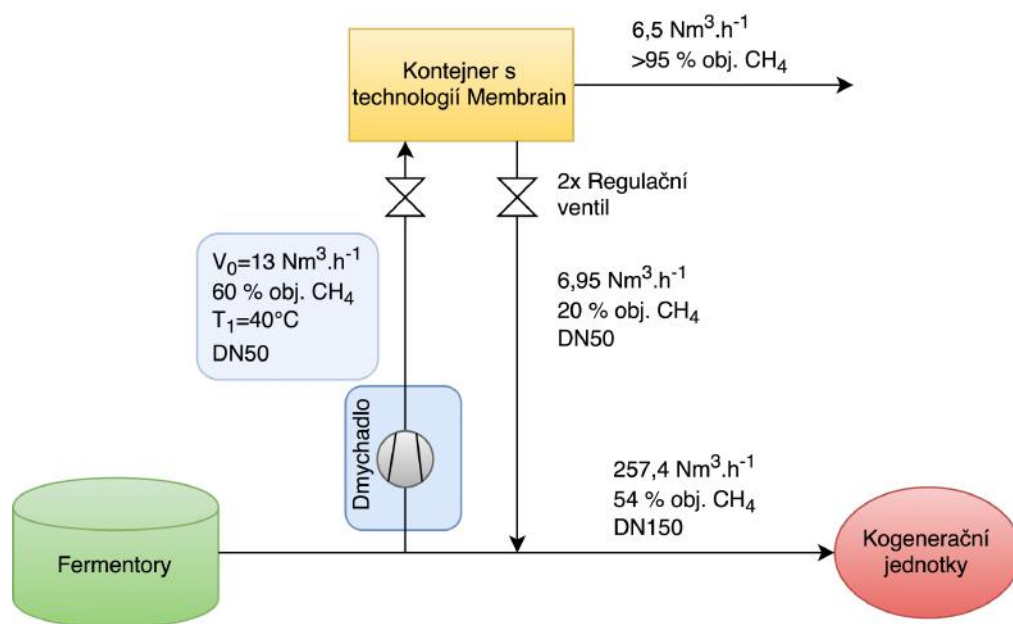
Umístění kontejneru bylo řešeno provozovatelem bioplynové stanice. Kontejner byl umístěn na již připravenou vodorovnou a zpevněnou plochu vedle jednoho z fermentorů. Ve společné strojovně fermentorů je z původní hlavní větve pomocí dmyhadla odebírán surový bioplyn o objemovém průtoku cca $13 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Bioplyn je pak průchodem dmyhadlem stlačován a vyveden ven ze strojovny. Venkovním prostorem je potrubím DN50 veden částečně pod hlavním stávajícím potrubím DN150 (podvěšeně), přičemž v blízkosti kontejneru se potrubí DN50 stáčí jeho směrem a vede bioplyn až k jeho vstupu. Výkres dispozičního uspořádání i jeho dílčí výřez jsou přiloženy v přílohách (Příloha č.1, Příloha č.2).



Obrázek 4.9: Dispoziční umístění kontejneru Membrain.

5 VÝPOČET A NÁVRH DMYCHADLA BIOPLYNU

Surový bioplyn je z obou fermentorů přiváděn do společné strojovny a poté je čištěn a veden hlavním ocelovým potrubím DN150 až ke kogeneračním jednotkám, které jej spalují a vyrábí elektrickou a tepelnou energii. Po připojení kontejneru s technologií Membrain je k němu z hlavního potrubí třeba dopravovat požadované množství bioplynu. Pro zvýšení tlaku na požadované parametry bude do potrubní trasy instalováno dmychadlo. Tato kapitola se věnuje jeho návrhu. Obr. 5.3 zahrnuje pro přehled i bilanční parametry, ale pro návrh dmychadla je důležitá zejména modře vyznačená oblast, která vyznačuje požadované parametry pro kontejner a dmychadlo s větví, na které se budou počítat tlakové ztráty.



Obrázek 5.1: Koncepční schéma návrhu dmychadla.

5.1 Zvolení vhodných parametrů potrubí

Při návrhu světlosti potrubí, tzn. vnitřního průměru d , bylo vycházeno ze všeobecně známého vztahu pro průtok tekutiny (bioplynu) potrubím (viz rov. 1). Bylo stanoveno, že kontejner bude ke svým aktivitám potřebovat průtok V_0 cca $13 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. V rovnici se rychlost v volí taková, aby byla vypočtená světlost optimální z hlediska tlakové ztráty v potrubí (co nejnižší), nákladů na montáž, provoz a údržbu potrubí (co nejnižší), z hlediska ceny, spotřeby materiálu, rozměrů a hmotnosti potrubí (co nejnižší).

Podle rov. 2 (Darcy-Weisbach) jde vidět, že tlakové ztráty třením v potrubí (Δp) rostou kvadraticky se zvyšující se hodnotou rychlosti proudění tekutiny. Tento fakt vede k úvaze snížit rychlost proudění tekutiny zvolením vyšší světlosti potrubí, avšak s větší světlostí potrubí rostou jeho celkové pořizovací náklady. Jde zejména o vyšší náklady na materiál, montáž a armatury v potrubí (jejich světlost se obvykle shoduje se světlostí potrubí). Existují matematické modely pro výpočet optimální, tj. nejehospodárnější možné světlosti potrubí. Jde o minimum průměrných ročních nákladů (součet nákladů na ztrátovou energii v důsledku

tření tekutiny a nákladů na materiál, montáž a provoz). Rychlost v v rov. 1 byla zvolena na základě zkušeností a tabulky, uvádějící doporučené hospodárné hodnoty rychlostí pro dané tekutiny a sice $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (voleno i s ohledem na množství vody v bioplynu obsažené).

$$V = S \cdot v = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot v \quad (1)$$

$$\Delta p_T = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \quad (2)$$

Po vyjádření vnitřního průměru potrubí d z rov. 1, dosazení přepočteného průtoku V pro teplotu $40 \text{ }^\circ\text{C}$ a rychlosti $v 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, vyšel vnitřní průměr potrubí cca 51 mm . Potrubí, které povede bioplyn do kontejneru s technologií Membrain, bylo tedy zvoleno DN50, tzn. se jmenovitou světlostí (přibližným vnitřním průměrem potrubí) 50 mm . Jmenovitý tlak potrubí je PN16, tzn. že nejvyšší pracovní přetlak v systému (pro teploty do $200 \text{ }^\circ\text{C}$) nesmí přesáhnout 16 barů ($1,6 \text{ MPa}$). To pro tuto konkrétní aplikaci plně postačuje.

Volba materiálu potrubí se odvíjí od požadavku na něj kladených. Díky mírnému přetlaku a relativně nízké teplotě bioplynu jsou požadavky mírné a tak byla za materiál potrubí zvolena nerezová ocel třídy 17240 (1.4301). Vzhledem k teplotě bioplynu cca $40 \text{ }^\circ\text{C}$ nebyla izolace potrubí třeba. Potrubí, které vede odpadní plyn zpět z kontejneru do hlavního, stávajícího potrubí DN150, bylo obdobně zvoleno z oceli a stejnou jmenovitou světlostí DN50. Vstup a výstup do kontejneru byl opatřen kulovými uzavíracími kohouty $3/4''$ a odvaděči kondenzátu (viz Obr. 4.2).

5.2 Zjištění charakteru proudění

Tab. 5.2 shrnuje veličiny, ze kterých bude návrh dmyhadla vycházet. Hodnoty objemových koncentrací majoritních složek vycházejí z naměřených hodnot surového bioplynu a byly již uvedeny v Tab. 4.2. Měření objemových koncentrací je však obtížné, hodnoty se v průběhu měření relativně mění a jde tedy o hodnoty projektované. Minoritní složky bioplynu byly zanedbány. Pro výpočet Reynoldsova čísla je třeba zjistit hustotu surového bioplynu. Pro její výpočet byla použita rov. 3, která obsahuje projektované objemové koncentrace a hustoty majoritních složek bioplynu.

Hodnoty hustot jsou vztaženy ke standardním teplotním a tlakovým podmínkám, tj. 0°C a 101325 Pa (byly převzaty z [19]). Hustota bioplynu ρ_0 tak značí jeho hustotu při standardních teplotních a tlakových podmínkách. Pro přepočet na dané teplotní podmínky, tj. $40 \text{ }^\circ\text{C}$, byla použita rov. 4, která vychází ze stavové rovnice ideálního plynu. Předpokladem jejího použití je izobarický děj (změnou teploty se změní tlak velmi nepatrně). Hodnota požadovaného objemového průtoku platí také pro standardní teplotu a tlak. Pro přepočet objemového průtoku na skutečné podmínky byla použita rov. 5, která obdobně zanedbává zvýšení poměrů tlaků vlivem zvýšení teploty směsi.

Objemový průtok (V_0) [$Nm^3 \cdot h^{-1}$]	13,00
Vnitřní průměr potrubí	DN50
Metan (CH_4)	
Molekulová hmotnost M_{CH_4} [$kg \cdot kmol^{-1}$]	16,04
Hustota ρ_{0,CH_4} [$kg \cdot m^{-3}$]	0,72
Objemová koncentrace v bioplynu x_{CH_4} [-]	0,600
Oxid uhličitý (CO_2)	
Molekulová hmotnost M_{CO_2} [$kg \cdot kmol^{-1}$]	28,01
Hustota ρ_{0,CO_2} [$kg \cdot m^{-3}$]	1,98
Objemová koncentrace v bioplynu x_{CO_2} [-]	0,381
Dusík (N_2)	
Molekulová hmotnost M_{N_2} [$kg \cdot kmol^{-1}$]	14,01
Hustota ρ_{0,N_2} [$kg \cdot m^{-3}$]	1,25
Objemová koncentrace v bioplynu x_{N_2} [-]	0,015
Kyslík (O_2)	
Molekulová hmotnost M_{O_2} [$kg \cdot kmol^{-1}$]	16,04
Hustota ρ_{0,O_2} [$kg \cdot m^{-3}$]	1,43
Objemová koncentrace v bioplynu x_{O_2} [-]	0,004

Tabulka 5.1: Veličiny vlastnosti sloučenin, ze kterých vychází návrh dmyhadla.

$$\rho_0 = x_{CH_4} \cdot \rho_{CH_4} + x_{CO_2} \cdot \rho_{CO_2} + x_{N_2} \cdot \rho_{N_2} + x_{O_2} \cdot \rho_{O_2} \quad (3)$$

$$\rho_0 = 0,600 \cdot 0,72 + 0,381 \cdot 1,98 + 0,015 \cdot 1,25 + 0,004 \cdot 1,43 = 1,21 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\rho_1 = \rho_0 \cdot \frac{T_0}{T_1} \quad (4)$$

$$\rho_1 = 1,21 \cdot \frac{273,15}{313,15} = 1,05 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$V_1 = V_0 \cdot \frac{T_1}{T_0} \quad (5)$$

Po zjištění skutečných hodnot hustoty ρ_1 a objemového průtoku bioplynu V_1 , byl pomocí rov. 6 vypočten skutečný hmotnostní průtok bioplynu m_1 , ze kterého byla za pomoci rov. 7 vypočtena skutečná rychlost proudění bioplynu v potrubí, v_1 .

Charakteristickým rozměrem průtočného profilu u kruhového potrubí je jeho vnitřní průměr. Hydraulickým průměrem d_h , který byl použit při výpočtech střední rychlosti v profilu v_1 a Reynoldsova čísla, je tedy přesná velikost vnitřního průměru potrubí, která vychází ze zvolené jmenovité světlosti potrubí DN50 (vnitřní průměr 52,9 mm, tloušťka stěny 3,7 mm).

$$m_1 = \rho_1 \cdot V_1 = \rho_0 \cdot \frac{T_0}{T_1} \cdot V_0 \cdot \frac{T_1}{T_0} = \rho_0 \cdot V_0 \quad (6)$$

$$m_1 = 1,21 \cdot 13 = 15,73 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} = 4,37 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$m_1 = V_1 \cdot \rho_1 = v_1 \cdot S \cdot \rho_1 \Rightarrow v_1 = \frac{m_1}{S \cdot \rho_1} \quad (7)$$

$$v_1 = \frac{4,37 \cdot 10^{-3}}{\frac{\pi \cdot 0,0529^2}{4} \cdot 1,05} = 1,88 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Pro určení hodnoty Reynoldsova čísla je zapotřebí určit hodnotu dynamické viskozity konkrétního bioplynu (60 % metanu) při 40 °C. S mírnou nepřesností byla pro jednoduchost tato hodnota stanovena z literatury [20]. Předpokladem je také fakt, že se dynamická viskozita bioplynu v potrubí mění zanedbatelně.

$$Re = \frac{v \cdot d_h \cdot \rho}{\eta} \quad (8)$$

$$Re = \frac{v_1 \cdot d_h \cdot \rho_1}{\eta_1} = \frac{1,88 \cdot 0,0529 \cdot 1,05}{12,97 \cdot 10^{-6}} = 8128 > 2320$$

Hranice mezi laminárním a turbulentním prouděním není přesně definována a tvoří ji přechodová oblast, kde proudění kapaliny není ani laminární ani turbulentní. Obecně bylo z experimentálních výzkumů zjištěno, že se tato oblast může nacházet v rozmezí Reynoldsova čísla cca 2300 až 4000. K vymezení oblasti laminárního proudění se však v praxi nejčastěji používá kritická hodnota Reynoldsova čísla Re_k , která je rovna bezrozměrnému číslu 2320.

Vypočtená hodnota Reynoldsova čísla přesahuje jeho kritickou mez ($Re \geq Re_k = 2320$). Setrvačné síly bioplynu jsou vůči třecím silám relativně vysoké a vliv třecích sil částic tekutiny má tedy na celkový odpor nezanedbatelný vliv. Hodnota jasně přesahuje i přechodovou oblast a dále je tedy uvažováno s turbulentním prouděním.

5.3 Výpočet tlakové ztráty třením tekutiny

Pro výpočet tlakových ztrát třením byla použita rov. 2. Tato rovnice se nazývá Darcy-Weisbachova. Pro potrubí byla sestavena francouzským inženýrem Henrym Darcym (1803-1858). Později na základě dlouhodobých experimentů a dedukce tento vztah zobecnil německý inženýr Julius Weisbach (1806-1871) i pro proudění přechodové a turbulentní a dokonce i pro ztrátu v potrubních tvarovkách a ventilech.

Nejzásadnějším krokem při výpočtu tlakové ztráty třením tekutiny bývá určení součinitele tření λ . Jeho závislost na Reynoldsově čísle vyjadřuje tzv. Nikuradseho diagram, který

ukazuje jednotlivé oblasti laminárního a turbulentního proudění, založené na měření v uměle zhotoveném drsném potrubí. Stejně je sestaven i tzv. Moodyho diagram, který byl vytvořený pomocí měření v reálně vyrobeném potrubí. Nikuradseho a Moodyho diagram jsou zobrazeny v logaritmických souřadnicích $\log(\lambda)$, $\log(Re)$. Pro přesné určení koeficientu tření však tyto diagramy nejsou vhodné, a proto vznikla řada empirických vztahů mnoha autorů.

Důležitým pojmem při třecích ztrátách je tzv. laminární podvrstva. Jde o velmi malou oblast kolem stěny potrubí. Podle rov. 9 (tzv. Karmánova podmínka) tloušťka laminární podvrstvy δ minimálně pětinašobně převyšuje absolutní hodnotu střední výšky nerovností stěn potrubí k . Tření v laminární podvrstvě je pouze viskózní (vznikající pouze uvnitř proudící tekutiny kvůli vzájemnému silovému působení mezi částicemi). Přechod z laminární podvrstvy do turbulentního jádra se označuje jako tzv. přechodová vrstva.

$$\delta = 5 \cdot k \quad (9)$$

Experimentálně bylo zjištěno, že v lineární oblasti proudění tekutiny je hodnota součinitele tření λ závislá (lineárně) pouze na velikosti Reynoldsova čísla (Hagen-Poiseuillova rovnice). Pro turbulentní proudění se v praxi rozlišují jeho tři různé režimy:

- Režim turbulentního proudění *v hydraulicky hladkém potrubí*, kde je tření závislé pouze na Reynoldsově čísle Re . Drsnostní výčnělky jsou totiž utopeny pod hranicí laminární podvrstvy a neovlivňují tak rychlostní profil.
- Režim turbulentního proudění *v přechodové oblasti*, kde je tření závislé na Reynoldsově čísle a zároveň na relativní drsnosti ε . Drsnostní výčnělky zde zasahují až do přechodové vrstvy a narušují tak rychlostní profil v laminární podvrstvě.
- Režim turbulentního proudění *v hydraulicky drsném potrubí*, kde je tření závislé už jen na relativní drsnosti ε . Drsnostní výčnělky v tomto případě zasahují až do turbulentního jádra proudu a vznik laminární podvrstvy tak není vůbec umožněn.

Literatura uvádí různé kritéria a mnoho rovnic pro dané režimy (iterativní řešení s předpokladem daného režimu). Při zachování požadované přesnosti byl však z důvodu jednoduchosti použit univerzální vztah podle Haalanda (viz rov. 11), který v sobě zahrnuje všechny tři režimy turbulentního proudění.

Relativní drsnost ε je vyjádřena jako poměr absolutní drsnosti k a hydraulického průměru d_h (viz rov. 10). Absolutní drsností k je rozuměna drsnost vnitřních stěn potrubí, které jsou v interakci s proudící kapalinou. Je tedy dána výškou nerovností a je závislá na vlastnostech materiálu a kvalitě vnitřních stěn. Hodnota pro nové ocelové potrubí byla stanovena na 0,1 mm podle literatury, která uvádí hodnoty v rozmezí 0,02 až 0,2 mm.

$$\varepsilon = \frac{k}{d_h} \quad (10)$$

$$\varepsilon = \frac{10^{-4}}{5,29 \cdot 10^{-2}} = 0,0019$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -1,8 \cdot \log\left(\left(\frac{\varepsilon}{3,7}\right)^{1,11} + \frac{6,9}{Re}\right) \quad (11)$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -1,8 \cdot \log\left(\left(\frac{0,0019}{3,7}\right)^{1,11} + \frac{6,9}{8128}\right) = 5,3465 \Rightarrow \lambda = 0,0349$$

Délka potrubní trasy se skládá z rovných úseků, šesti kolen 90°, jednoho kolena 55° a jednoho kolena 35° (viz technologické schéma v přílohách). Celková délka potrubní trasy je cca 26,4 m, přičemž více než 97 % tvoří rovné úseky. Za použití rov. 2 byla vypočítána tlaková ztráta vlivem tření tekutiny a byla stanovena na hodnotu cca 31,5 Pa.

$$\Delta p_T = 0,0349 \cdot \frac{26,2}{0,0529} \cdot \frac{1,88^2}{2} \cdot 1,05 = 31,5 Pa$$



Obrázek 5.2: Potrubní trasa pro návrh vhodného dmychadla - pohled 1.

5.4 Výpočet tlakové ztráty místními odpory

Potrubní větev nebývá přímočará a bývá tvořena i dalšími potrubními prvky typu odboček různých tvarů, oblouků, redukcí, filtrů, měřidel, atp. V těchto částech potrubních tras vzniká tlaková ztráta obdobně jako v přímém potrubí. Vzhledem k tomu, že při průtoku těmito částmi často dochází ke změně průtočného tvaru trubky, směru proudění a ke škrcení, bývají tyto tlakové ztráty oproti rovnému úseku intenzivnější. Z pohledu tlakové ztráty se tyto prvky nazývají místní ztráty. Celková tlaková ztráta místními odpory Δp_{MO} se vypočítá podobným způsobem, jako tlaková ztráta třením rovného úseku potrubí Δp_T (rov. 12 a rov. 2).

$$\Delta p_{MO} = \sum_{i=1}^n \zeta_i \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \quad (12)$$

U jednotlivých potrubních prvků lze jejich ztrátový součinitel ζ vypočítat. Nejpřesnější hodnoty součinitelů místního odporu jde zjistit z dokumentace výrobce tvarovek/armatur. V případě, že nám to dovoluje požadovaná přesnost, lze vycházet z tabulek, které často uvádí



Obrázek 5.3: Potrubní trasa pro návrh vhodného dmyhadla - pohled 2.

rozsahy hodnot. Za speciální případ místního odporu, lze považovat i vstupy a výstupy z trubky. Na okrajích je totiž proudění většinou neustálené a ovlivněné tvarem začátku či konce potrubí. Hodnoty jednotlivých součinitelů ζ_i vycházejí z všeobecně dostupné literatury. V reálném prostředí mohou být hodnoty koeficientů nižší - z důvodu vyšší bezpečnosti byly použity horní hranice rozsahů.

Místní odpor	Součinitel ζ_i
Vstup a výstup (hrdlo dmyhadla a ústí do kontejneru)	2 x 1,5
8 x Koleny 90°	8 x 1,3
1 x Koleny 60°	1 x 0,9
1 x Koleny 30°	1 x 0,6
2 x Odlučovač kondenzátu	2 x 3,5
1 x Gumový kompenzátor	1 x 1,5
2 x Kulový ventil 3/4"	2 x 2,5
2 x T-tvarovka	2 x 1,5
$\sum_{i=1}^n \zeta_i$	31,4

Tabulka 5.2: Součinitele místních odporů pro uvažované prvky, které se nacházejí na potrubní trase. Hodnoty převzaty dle [29] a [30].

$$\Delta p_{MO} = 31,4 \cdot \frac{1,88^2}{2} \cdot 1,05 = 58,3 Pa$$

5.5 Výpočet celkové tlakové ztráty a výběr vhodného dmyhadla

Celková tlaková ztráta je dána součtem tlakové ztráty v důsledku tření tekutiny a místních odporů.

$$\Delta p = \Delta p_T + \Delta p_{MO} \quad (13)$$

$$\Delta p = 31,5 + 58,3 = 89,8 Pa$$

Pro tuto konkrétní aplikaci bylo vybráno jednostupňové (jedno oběžné kolo) boko-sací dmyhadlo, vyráběno světoznámou společností *Becker*. Jde o rotační stroj s bočním (postranním) kanálem. Pracuje na principu otáčení lopatkového oběžného kola uvnitř pevného statoru. Bioplyn je nasáván mezi lopatky a stator a postupně radiálně urychlován a stlačován. Mezi jeho hlavní výhody patří jednoduchá a kompaktní konstrukce, bezolejový provoz, relativně dlouhá životnost a minimální náklady na údržbu a provoz. Dmyhadlo je nainstalováno v horizontální poloze, zajištěno proti pootočení a umístěno ve společné strojovně fermentorů. Je tak chráněno před nárazy, vibracemi, povětrnostními vlivy a vlhkostí.

Dmyhadlo je osazeno bezúdržbovými zapouzdřenými kuličkovými ložisky (není nutné je mazat). Minimální životnost těchto ložisek je cca 22000 hodin (dva a půl roku při kontinuálním provozu) a je vhodné je ještě před koncem jejich životnosti vyměnit. Pokud při údržbě dojde k otevření skříně dmyhadla, je nutné vždy vyměnit všechny těsnicí prvky (pásky, o-kroužky či ucpávky hřídele). Dále musí být pravidelně kontrolována úroveň zanesení filtračních vložek (v závislosti na provozních podmínkách) kvůli poklesu výkonových parametrů dmyhadla při jejich zanesení.

Typ Becker 1.50/3

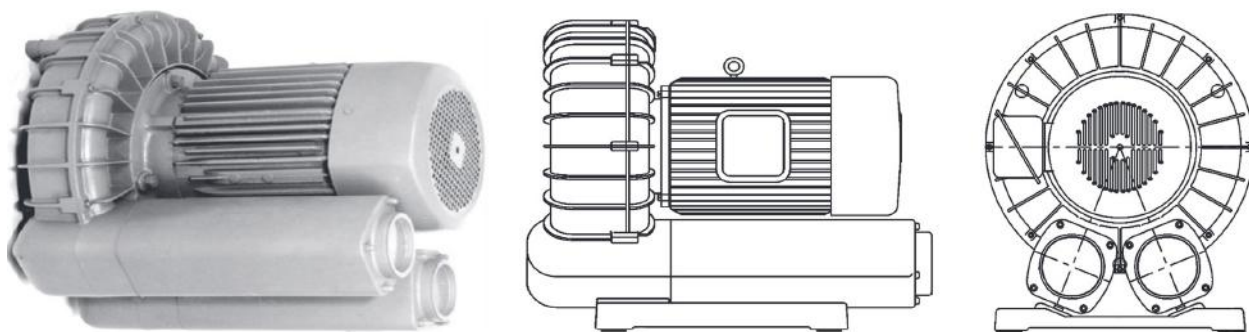
Max. dodávaný obj. průtok	41 m ³ .h ⁻¹
Max. výtlačný tlak	10 kPa
Typ pohonu	Jednofázový elektromotor
Příkon (na hřídeli dmyhadla)	150 W
Jmenovité otáčky	2750 min ⁻¹
Rozměry (délka x šířka x výška)	225x220x225 mm
Hmotnost	8 kg

Tabulka 5.3: Hlavní parametry zvoleného dmyhadla. Hodnoty obj. průtoku, výtlačného tlaku, příkonu a jmen. otáček platí pro frekvenci 50 Hz. Hodnoty převzaty dle [31].

Je důležité neopomenout údržbu dmyhadla. V případě zaznamenání zvýšených vibrací či snížení objemového průtoku musí být provedena kontrola ihned. Revize a údržba namáhaných částí musí být prováděny kvalifikovanou a oprávněnou osobou v doporučených intervalech (stanoveno provozovatelem - uživatel nese odpovědnost za stanovené použití stroje). Životnost

namáhaných (především ložisek a filtru) závisí na počtu provozních hodin, druhu provozu (míře zatížení) a provozních podmínkách (teplota atp.).

Je důležité mít na paměti, že každá část dmyhadla má svoji vlastní frekvenci a při určitých otáčkách může dojít k vybuzení, které může vyústit v rezonanci. Dmyhadlo je primárně určeno pro kontinuální provoz s konstantními otáčkami a je navrženo tak, aby k rezonancím při konstantních provozních otáčkách nedocházelo. Při změnách otáček ventilátoru frekvenčním měničem však mohou nastat. Regulace otáček dmyhadla je realizována za pomoci frekvenčního měniče a pokud se při provozu vyskytnou rezonance, je třeba na něm tyto pásma otáček nastavit jako zakázaná. Je dobré podotknout, že v součinnosti s integrovanými tlumiči hluku nejsou další protihluková opatření nutná. Regulací k nižším otáčkám se navíc trvale sníží jeho hladinu hluku.



Obrázek 5.4: Pohled na zvolené jednostupňové boko-sací dmyhadlo Becker SV 1.50/3. Převzato a upraveno z [31].

5.6 Přepočet charakteristiky a stanovení pracovního bodu dmyhadla

Použitím frekvenčního měniče je možné dosáhnout plynulé regulace otáček a nastavení požadovaného pracovního bodu. Je tak možné dosáhnout kvalitní regulace výkonu dmyhadla a jeho ekonomického chodu. Inteligentní kontrolní systém udržuje tlak a objemový průtok konstantní. Dmyhadlo může být provozováno jen v limitech specifikovaných na typovém štítku. Možný frekvenční regulační rozsah tohoto typu je 10 až 100 Hz (tedy až 6000 otáček za minutu). Maximální povolené otáčky dmyhadla nesmí být v žádném případě překročeny, jinak by mohlo dojít k mechanickému poškození.

$$V = V_j \cdot \left(\frac{n}{n_j}\right) \quad (14)$$

$$p = p_j \cdot \left(\frac{n}{n_j}\right)^2 \quad (15)$$

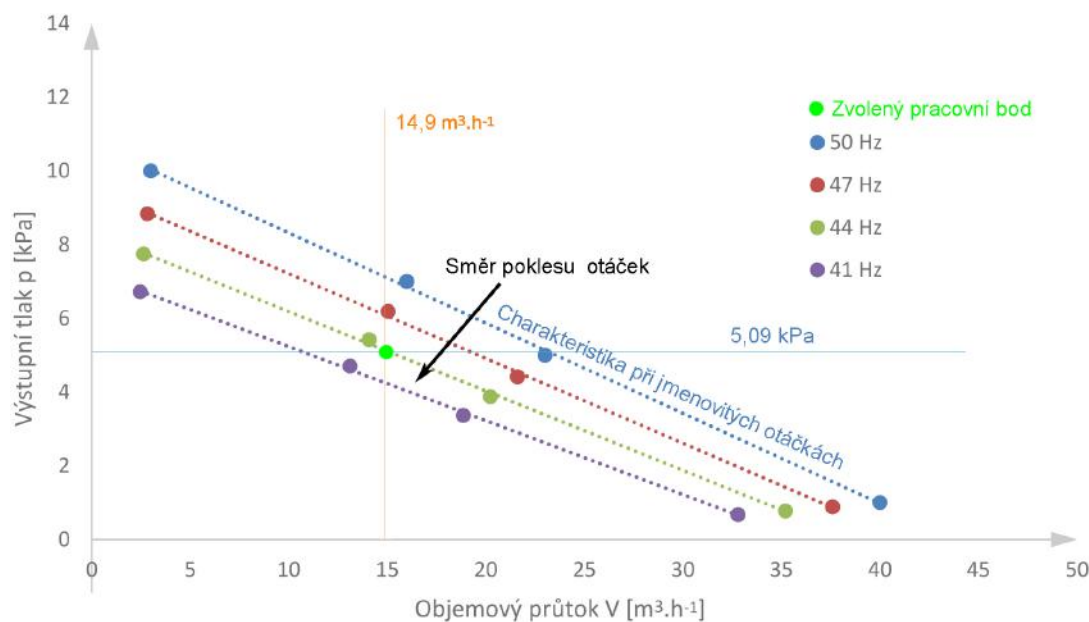
$$P = P_j \cdot \left(\frac{n}{n_j}\right)^3 \quad (16)$$

Původní charakteristika pro jmenovité otáčky dmyhadla (2750 min^{-1}) byla převzata od výrobce dmyhadla. Při jejím přepočtu byly použity rov. 14, 15 a 16. Změna průtoku je úměrná podílu nových a jmenovitých otáček hřídele dmyhadla. Změna výstupního tlaku

je úměrná druhé mocnině podílu nových a jmenovitých otáček hřídele dmyhadla. U příkonu dmyhadla je změna úměrná třetí mocnině podílu nových a jmenovitých otáček hřídele dmyhadla. Hodnoty jednotlivých bodů shrnuje tabulka Tab. 5.4. K původní charakteristice dmyhadla tak byly sestrojeny i další pro odlišné (nižší) otáčky hřídele (viz Obr. 5.5).

Otáčky n [min^{-1}]	Parametry	Bod 1	Bod 2	Bod 3	Bod 4
2750	Objemový průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$]	3	16	23	40
	Výstupní tlak [kPa]	10	7	5	1
	Příkon dmyhadla [W]	150			
2585	Objemový průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$]	2.8	15.0	21.6	37.6
	Výstupní tlak [kPa]	8.8	6.2	4.4	0.9
	Příkon dmyhadla [W]	124.6			
2420	Objemový průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$]	2.6	14.1	20.2	35.2
	Výstupní tlak [kPa]	7.7	5.4	3.9	0.8
	Příkon dmyhadla [W]	102.2			
2255	Objemový průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$]	2.5	13.1	18.9	32.8
	Výstupní tlak [kPa]	6.7	4.7	3.4	0.7
	Příkon dmyhadla [W]	82.7			

Tabulka 5.4: Přepočtení původní charakteristiky. Původní char. převzata z [31].



Obrázek 5.5: Charakteristiky vybraného dmyhadla. Původní charakt. převzata z [31].

Linearita zůstala z velké části zachována a byl naznačen směr, s kterým se charakteristika mění (posouvá) při poklesu otáček. Jak už bylo zmíněno (viz. Kapitola 5.1), výzkumný kontejner bude pro své aktivity potřebovat objemový průtok bioplynu $V_0 = 13 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, tzn. cca $14,9 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Při původní charakteristice při jmenovitých otáčkách vychází při tomto

požadovaném objemovém průtoku výstupní tlak vybraného dmyhadla cca $7,3 \text{ kPa}$. Uvnitř kontejneru už je další kompresorová jednotka. Požadavek vstupního tlaku do kontejneru byl stanoven na hodnotu 5 kPa , resp. $5,09 \text{ kPa}$ při počítání s celkovými tlakovými ztrátami. Snížením otáček hřídele dmyhadla na cca 2420 min^{-1} (44 Hz) je možné při respektování požadovaných podmínek snížit příkon dmyhadla téměř o třetinu. Pracovní bod vybraného dmyhadla odpovídá charakteristice dmyhadla při otáčkách 2420 min^{-1} , objemovému průtoku $14,9 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ a výstupnímu tlaku cca $5,1 \text{ kPa}$.

ZÁVĚR

V současné době je automobilový provoz jedním z největších znečišťovatelů životního prostředí. Počet motorových vozidel pořád roste a jejich výfukové zplodiny zatěžují životní prostředí stále více (zejména ve městech). V minulosti již došlo k postupnému snížení až úplnému vyloučení obsahu olova v benzínech a byly zavedeny katalyzátory výfukových plynů. V technicky nejvyspělejších oblastech světa dnes dochází k postupnému zpřísnování emisních limitů pro motorová vozidla. To tlačí jak na výrobce vozidel, kteří musí vyrábět dokonalejší pohony, tak i na rafinérie, které musí zlepšovat kvalitu jejich paliv.

Jedním ze způsobů, jak snížit škodlivé emise, je záměna klasických pohonných hmot palivy alternativními. Mezi nejvyužívanější z hlediska ekologie, dostupnosti a ekonomiky ceny plynu patří zejména zemní plyn a propan-butan. Stlačený biometan je obnovitelným zdrojem energie a má téměř stejné vlastnosti jako zemní plyn. V dnešní době je již biometan v dopravě v řadě zemí využíván. V České republice je téměř všech vyprodukovaný bioplyn využíván jako zdroj energie pro výrobu tepla a elektrické energie v kogeneračních jednotkách. Tato technologie je osvědčená a má podporu ze strany státu v podobě dotačních programů a povinného výkupu elektrické energie.

Atraktivní alternativou s mnoha výhodami je úprava bioplynu na bioCNG za účelem jeho využití v dopravě či vtláčení do plynárenské sítě. Technologie je nejvíce vhodná zejména tam, kde není možné efektivně využít odpadní teplo z kogeneračních jednotek a tak se již začínají objevovat projekty, které se čištěním bioplynu na bioCNG a jeho následným využitím v dopravě zabývají. Z důvodu nedostatku státní a legislativní podpory jde však jen o pilotní projekty. Jedním z nich je i pilotní projekt, který byl nasazen na současnou bioplynovou stanici za pomoci výzkumného kontejneru.

Cílem práce bylo navrhnout technologii čištění bioplynu pro pohon vozidel. V Kapitole 1 jsou popsány nejrozšířenější metody pro úpravu bioplynu. Kapitola 2 popisuje konkrétní technologii membránové separace, která byla pro separaci bioplynu použita. Ve třetí Kapitole je řešena otázka podmínek České republiky a současný stav legislativy. Kapitola 4 je zaměřena na implementaci technologie membránové separace do stávající bioplynové stanice. Nejprve je bioplynová stanice popsána z pohledu provozních a technických parametrů. Poté je nastíněno vhodné koncepční řešení (základní rozvržení) a možnosti uskladnění bioCNG. Z technologického pohledu je řešeno hlavně připojení výzkumného kontejneru na současné rozvody elektřiny a bioplynu. Závěr čtvrté kapitoly obsahuje dispoziční řešení, které obsahuje pozici umístění kontejneru a jeho napojení na současné rozvody. V poslední kapitole 5 je zvoleno dmyhadlo, které bude dopravovat bioplyn ze společné strojovny fermentorů do výzkumného kontejneru. Zvolené dmyhadlo odpovídá technickým požadavkům a je možné jeho výkon v případě vyšších požadavků upravit.

Obrovskou výhodou při separaci bioplynu je získání environmentálně šetrného, skladovatelného produktu, který má univerzální možnosti využití. Využití bioCNG v dopravě závisí na rozvoji zemního plynu v dopravě, vzhledem k jejich téměř shodným vlastnostem. S tím je spjatá síť CNG plnicích stanic a prodej vozidel na CNG. V současnosti se již v řadě evropských zemí rozbíhají projekty, které připravují technické a legislativní podmínky pro skladování a vtláčení bioplynu do stávající plynovodní sítě. V Německu a Švýcarsku již funguje mnoho bioplynových stanic, které vtlácejí většinu produkovaného bioplynu do plynovodní sítě.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Průvodce výrobou a využitím bioplynu. CZ Biom. 2009. Dostupné z: <http://www.mpo-efekt.cz/cz/ekis/publikace/21406>
- [2] Desatero bioplynových stanic. eAGRI. 2007. [online]. [cited 2015-06-11].
Dostupné z: <http://eagri.cz/public/web/mze/zivotni-prostredi/obnovitelne-zdroje-energie/bioplyn/bps/desatero-bioplynovych-stanic.html>
- [3] Informace z kontrolní akce č. 14/06. Nejvyšší kontrolní úřad. [online]. [cited 2015-06-09].
Dostupný z: <http://www.nku.cz/assets/media/informace-14-06.pdf>
- [4] Mapa bioplynových stanic. Česká bioplynová asociace. [online]. [cited 2015-06-10].
Dostupné z: <http://www.czba.cz/mapa-bioplynovych-stanic/>
- [5] ŠAFAŘÍK, Miroslav: Bioplynové stanice – podmínky a možnosti využití tepla. Biom.cz [online]. 2012-03-13 [cit. 2015-06-10]. ISSN: 1801-2655. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/bioplynove-stanice-podminky-a-moznosti-vyuziti-tepla>
- [6] VLK, F. Alternativní pohony motorových vozidel. 1. vyd. Brno. 2004. ISBN 80-239-1602-5. Dostupné z: <http://www.sinz.cz/archiv/docs/si-2004-04-212-224.pdf>
- [7] Volba vhodné kogenerační jednotky na bioplyn. Biom.cz [online]. 2020-12-18 [cit. 2015-06-11]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/volba-vhodne-kogeneracni-jednotky-na-bioplyn>
- [8] Mikroturbína a bioplyn. Biom [online]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/mikroturbina-a-bioplyn>
- [9] ŠVEC, Jan. Využití obnovitelných zdrojů energie v zemědělství-zemědělské bioplynové stanice. Vyd. 1. Chrudim: Vodní zdroje Ekomonitor, 2010, 69 s. ISBN 978-80-86832-49-4.
- [10] WELLINGER, Arthur; MURPHY, Jerry D.; BAXTER, David (ed.). The biogas handbook: science, production and applications. Elsevier, 2013.
- [11] VRBOVÁ, Veronika, Alice PROCHÁZKOVÁ, a Karel CIAHOTNY. "Úprava bioplynu na biometan pomocí sdsorpčních materiálů." Plyn 6 (2013): 130-135. Dostupné z: http://www.szn.sk/slovgas/Casopis/2013/4/2013_4_10.pdf
- [12] Čermáková, Jiřina, Daniel Tenkrát, and Ondřej Prokeš. "Výroba a využití biometanu." Odpadové fórum (2008).
- [13] Membránová separace bioplynu. MemBrain [online]. Dostupné z: <http://www.membrain.cz/files/procesy/membranova-technologie-pro-vyrobu-biometanu-z-biop.pdf>
- [14] Separace CO₂ z bioplynu membránami. MemBrain [online]. Dostupné z: <http://www.membrain.cz/files/aplikace/separace-co2-z-bioplynu-membranami.pdf>

- [15] VRBOVÁ, V., CIAHOTNÝ, K., HÁDKOVÁ, K. Testování membránových modulů pro separace CO₂ z bioplynu. PALIVA 6 (2014), 3, S. 78 - 82. ISSN 1804-2058. Dostupné z: <http://paliva.vscht.cz/cz/archiv-clanku/detail/24>
- [16] ŠNITA, D. Chemické inženýrství I. Vyd. 1. 2005. Praha: Vydavatelství VŠCHT. str. 289.
- [17] HÁDKOVÁ, K., VÁLEK, R. Příprava membrán ve formě dutých vláken pro úpravu bioplynu. Energie z biomasy XV. 2014. ISBN 978-80-214-5016-5. Dostupné z: www.eu.fme.vutbr.cz/file/305_1_1/
- [18] BOBÁK M. a spol. Úprava bioplynu na biometan membránovou separací. CZEMP [online]. Dostupné z: <http://www.czemp.cz/sites/default/files/clanek/146/prilohy/2012-05-10-bobakseminargms.pdf>
- [19] Engineering Toolbox [online].
Dostupné z: http://www.engineeringtoolbox.com/gas-density-d_158.html
- [20] Properties of biogas. Biogas Wiki [online].
Dostupné z: <https://biogas.wikispaces.com/Biogas+burners>
- [21] Pilotní jednotka k separaci plynů. MemBrain [online].
Dostupné z: <http://www.membrain.cz/files/articles/jednotka-separace-plynu.pdf>
- [22] Žákovec J. Biometan: hospodárné užití obnovitelných zdrojů energie. Dostupné z: <http://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/2201-gas-s.r.o.-biometan.pdf>
- [23] Tisková zpráva: CzBA nesouhlasí s tvrzením ERÚ, že podpora biometanu je hrozbou. CzBA [online]. Dostupné z: <http://www.czba.cz/aktuality/tiskova-zprava-czba-nesouhlasí-s-tvrzením-eru-že-podpora-biometanu-je-hrozbou.html>
- [24] Výstavba bioplynových stanic dostane opět zelenou. Biom: odborný časopis a informační zpravodaj Českého sdružení pro biomasu [online]. 1/2015. Dostupné z: http://czbiom.cz/wp-content/uploads/casopis_Biom_2015_01_web-1.pdf
- [25] MORAVEC, Adam: Již i v Česku bude automobily pohánět biometan. Biom.cz [online]. 2015-08-12 [cit. 2016-03-29]. ISSN: 1801-2655. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/jiz-i-v-cesku-bude-automobily-pohanet-biometan>
- [26] Biokraftstoffe im Vergleich. FNR [online]. Dostupné z: <https://mediathek.fnr.de/grafiken/pressegrafiken/biokraftstoffe-im-vergleich.html>
- [27] Separace v biotechnologiích. Dostupné z: <http://ub.vscht.cz/files/uzel/0015847/separ.pdf>
- [28] Komponenty virtuálních plynovodů. VÍTKOVICE MACHINERY GROUP [online].
Dostupné z: <http://www.vitkovice.cz/documents/10181/47560/Katalog+%E2%80%93+CNG+a+CTG+Czech/19e24024-f004-472c-95de-b695cee00937?version=1.3>
-

- [29] Obecný výpočet tlakových ztrát místním odporem. QPRO - Technika prostředí [online]. Dostupné z: <http://www.qpro.cz/Tlakova-ztrata-mistnimi-odpory-Strana-2>
- [30] Vliv místních odporů na tlakové ztráty v potrubí. Technická zařízení budov TZB-info. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/8514-vliv-mistnich-odporu-na-tlakove-ztraty-v-potrubí>
- [31] Dmyhadla s bočním kanálem Becker. YNNA [online]. Dostupné z: <http://www.ynna.cz/produkty/dmyhadla-becker/snbocnim-kanalem>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka	Význam
bioCNG	Stlačený biometan
BPS	Bioplynová stanice
CNG	Stlačený zemní plyn
CzBA	Česká bioplynová asociace
ČOV	Čistírna odpadních vod
ČR	Česká republika
ERÚ	Energetický regulační úřad
EU	Evropská unie
FVE	Fotovoltaická elektrárna
KGJ	Kogenerační jednotka
LNG	Zkapalněný zemní plyn
LPG	Zkapalněný ropný plyn (Liquefied petroleum gases)
LTO	Lehký topný olej
MVE	Malá vodní elektrárna
OZE	Obnovitelné zdroje energie
STP	Standardní teplota (273,15 K) a tlak (101325 Pa)

Symbol	Význam	Jednotka
d	Vnitřní průměr potrubí	m
d_h	Hydraulický průměr	m
k	Střední výška nerovností stěn potrubí	mm
L	Délka potrubí	m
m	Hmotní průtok plynu	$kg.h^{-1}$
m_1	Skutečný hmotnostní průtok bioplynu	$kg.h^{-1}$
M	Molekulová hmotnost bioplynu	$kg.kmol^{-1}$
M_{CH_4}	Molekulová hmotnost metanu	$kg.kmol^{-1}$
M_{CO_2}	Molekulová hmotnost oxidu uhličitého	$kg.kmol^{-1}$
M_{N_2}	Molekulová hmotnost dusíku	$kg.kmol^{-1}$
M_{O_2}	Molekulová hmotnost kyslíku	$kg.kmol^{-1}$
n	Otáčky dmyhadla	min^{-1}
n_j	Jmenovité otáčky dmyhadla	min^{-1}
p	Výstupní tlak plynu	Pa
p_j	Výstupní tlak plynu při jmenovitých otáčkách	Pa
P	Příkon dmyhadla	W
P_j	Příkon dmyhadla při jmenovitých otáčkách	W
Re	Reynoldsovo číslo	–
Re_k	Kritická hodnota Reynoldsova čísla	–
S	Průtočný průřez	m^2
T_0	Standardní teplota	$^{\circ}C$
T_1	Skutečná teplota bioplynu	$^{\circ}C$
v	Střední rychlost v profilu	$m.s^{-1}$
v_1	Skutečná střední rychlost v profilu	$m.s^{-1}$
V	Objemový průtok plynu	$m^3.h^{-1}$
V_0	Objemový průtok bioplynu při STP	$Nm^3.h^{-1}$
V_1	Skutečný objemový průtok bioplynu	$m^3.h^{-1}$
V_j	Objemový průtok plynu při jmenovitých otáčkách	$m^3.h^{-1}$
x_{CO_2}	Objemová koncentrace oxidu uhličitého v bioplynu	–
x_{CH_4}	Objemová koncentrace metanu v bioplynu	–
x_{N_2}	Objemová koncentrace dusíku v bioplynu	–
x_{O_2}	Objemová koncentrace kyslíku v bioplynu	–
δ	Tloušťka laminární podvrstvy	mm
Δp_T	Tlaková ztráta vlivem tření	Pa
Δp_{MO}	Tlaková ztráta místními odpory	Pa
Δp	Celková tlaková ztráta	Pa

Symbol	Význam	Jednotka
ε	Relativní drsnost	mm
ζ_i	Ztrátový součinitel místního odporu	–
η	Dynamická viskozita plynu	$m^2 \cdot s^{-1}$
η_1	Skutečná dynamická viskozita bioplynu	$m^2 \cdot s^{-1}$
ρ	Hustota plynu	$kg \cdot m^{-3}$
ρ_0	Hustota bioplynu při STP	$kg \cdot Nm^{-3}$
ρ_1	Skutečná hustota bioplynu	$kg \cdot Nm^{-3}$
ρ_{CO_2}	Hustota oxidu uhličitého při STP	$kg \cdot Nm^{-3}$
ρ_{CH_4}	Hustota metanu při STP	$kg \cdot Nm^{-3}$
ρ_{N_2}	Hustota dusíku při STP	$kg \cdot Nm^{-3}$
ρ_{O_2}	Hustota kyslíku při STP	$kg \cdot Nm^{-3}$
λ	Součinitel tření	–

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č.1: Detail dispozičního uspořádání

Příloha č.2: Dispoziční schéma připojení kontejneru

Příloha č.3: Technologické schéma připojení kontejneru