



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
**ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO**  
**INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL  
ENGINEERING

## **ČIŠTĚNÍ BIOPLYNU NA KVALITU ZEMNÍHO PLYNU**

BIOGAS CLEANING TO SUBSTITUTE NATURAL GAS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
DIPLOMA'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**Bc. JAN NĚMEC**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Ing. RADEK DVOŘÁK, Ph.D.**

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství  
Akademický rok: 2011/12

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student: Bc. Jan Němec

který studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Procesní inženýrství (3909T003)**

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

### **Čištění bioplynu na kvalitu zemního plynu**

v anglickém jazyce:

### **Biogas cleaning to substitute natural gas quality**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Bioplyn vzniká anaerobní fermentací organických látek a obsahuje dvě majoritní složky a to metan ( $\text{CH}_4$ ) a oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ), dále jsou přítomny ještě minoritní látky, jako jsou sirovodík ( $\text{H}_2\text{S}$ ), nežádoucí uhlovodíky, pevné látky nebo voda ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Aby mohl být bioplyn využíván v běžné plynárenské síti, je nutné jej čistit na kvalitu standardního zemního plynu, k tomu existuje mnoho technologií, z nichž nejčastější jsou na bázi absorpce nebo adsorpce. Vyčištěný bioplyn se pak nazývá SNG (Substitute Natural Gas) a má obsah metanu 95% a vyšší. Takto vyčištěný bioplyn lze pak využívat stejně jako klasický zemní plyn, tj. v průmyslu, v dopravě nebo v domácnostech. Čištění bioplynu je rozšířeno zejména ve skandinávských zemích, v Německu nebo ve Švýcarsku. Jelikož se jedná o obnovitelný zdroj energie, je tato problematika v současnosti velice aktuální.

Cíle diplomové práce:

- 1) Vytvoření obecné rešerše technologií čištění bioplynu a podrobné rešerše technologie mokré vypírky (fyzikální praní)
- 2) Seznámení se s platnou legislativou a normami
- 3) Navržení technologie mokré vypírky pro zadané podmínky (průtok a složení bioplynu)
- 4) Vytvoření technologického schématu navržené technologie
- 5) Výpočet a návrh hlavních aparátů technologie mokré vypírky včetně basic design výkresové dokumentace
- 6) Vytvoření modelu Chemcad
- 7) Zhodnocení provozních a investičních nákladů (investiční náklady jen přibližně nebo rešeršně).



Seznam odborné literatury:

- [1] Dohányos M. a kol., Anaerobní čistírenské technologie, NOEL, Brno (1998), ISBN 80-86020-19-3
- [2] WR ATV/VKS, Recovery, Processing and Utilization od Biogas, Working report of ATV/VKS Expert Comitee 3.8 „Biogas“, Korreesponz Abwasser, 36, 153-164 (1989)
- [3] Straka F. a kol., Bioplyn, II. rozšířené a doplněné vydání, GAS s.r.o., Praha (2006), ISBN 80-7328-090-6
- [4] European IPPC Bureau: Reference Document on the Best Available Techniques in Common Waste Water and Waste Gas Treatment / Management System in Chemical Sector, Brussels, available on <http://eippcb.jrc.es> (2003)
- [5] Schulz H., Eder B., Bioplyn v praxi, HEL, Ostrava (2004), ISBN 80-86167-21-6
- [6] Nishimura S., Yoda M., Removal of hydrogen sulfide from an anaerobic biogas using a bio-scrubber, Water Science and Technology, Volume 36, Issues 6-7, Pages 349-356 (1997)
- [7] European IPPC Bureau: Reference Document on the Best Available Techniques for Large Combustion Plants, Brussels, available on <http://eippcb.jrc.es> (2005)
- [8] Persson M., Evaluation of Upgrading Techniques for Biogas, available on <http://www.sgc.se/uk/index.asp> (2003)
- [9] Vaxtkraft – Presentation of a system for the use of biogas as fuel for buses and cars, Vasteras, Svensk, (2004)
- [10] Aufwind Achmack GmbH Neue Energie, Biometanová stanice v obci Pliening, Pliening, Německo (2006)
- [11] Plynárenská příručka, 150 let plynárenství v Čechách a na Moravě, GAS s.r.o., Praha (1997), ISBN 80-902339-6-1
- [12] Bezpečnostní list látky zemní plyn, Jihomoravská plynárenská, a.s., dostupný na <http://www.rwe-jmp.cz> (2005)

Vedoucí diplomové práce: Ing. Radek Dvořák, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.  
V Brně, dne 18. 11. 2010

L.S.

---

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

## **Anotace**

Tato práce se zabývá způsoby čištění bioplynu na kvalitu zemního plynu k dalšímu využití. Úvod je věnován technologiím na úpravu bioplynu a současné situaci nakládání s bioplynem v České republice. Stěžejní kapitolou je vlastní návrh technologie vodní vypírky a výpočet absorpční kolony pro dané podmínky. Na základě získaných dat byl pak vytvořen simulační model a předběžná ekonomická bilance.

## **Klíčová slova**

Bioplyn, absorpce, vodní vypírka, bilance, simulace

## **Annotation**

This work deals with methods of biogas cleaning to natural gas quality for further use. The introduction is focused on technologies for biogas treatment and biogas management for current situation in the Czech Republic. In the main chapter there is a water scrubber technology design and calculation of the absorption column for the conditions given. A simulation model and preliminary economic balance were then developed on the obtained data.

## **Key words**

Biogas, absorption, water scrubber, balance, simulation

## **Bibliografická citace**

NĚMEC, J. Čištění bioplynu na kvalitu zemního plynu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 74 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Radek Dvořák, Ph.D.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Čištění bioplynu na kvalitu zemního plynu“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu literatury.

V Brně dne 24. května 2012

---

Podpis

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval všem, kteří mi pomáhali při vzniku této práce. Především Ing. Radku Dvořákovi Ph. D., vedoucímu mé diplomové práce za vedení a rady. Dále pak rodině za podporu a trpělivost při studiu.

## OBSAH

|  |           |
|--|-----------|
| <b>SEZNAM SYMBOLŮ .....</b>                        | <b>9</b>  |
| <b>SEZNAM ZKRATEK .....</b>                        | <b>12</b> |
| <b>ÚVOD .....</b>                                  | <b>13</b> |
| <b>2. SLOŽENÍ BIOPLYNU .....</b>                   | <b>14</b> |
| 2. 1. Majoritní složky v bioplynu .....            | 14        |
| 2. 2. Minoritní složky v bioplynu .....            | 14        |
| <b>3. ČIŠTĚNÍ BIOPLYNU .....</b>                   | <b>16</b> |
| 3. 1. Odstranění vody .....                        | 16        |
| 3. 2. Odstraňování sulfanu z bioplynu .....        | 16        |
| 3. 3. Odstraňování halogenovaných uhlovodíků ..... | 17        |
| 3. 4. Odstraňování oxidu uhličitého .....          | 17        |
| 3. 5. Odstranění kyslíku a dusíku .....            | 17        |
| 3. 6. Odstraňování siloxanů .....                  | 17        |
| 3. 7. Odstranění amoniaku .....                    | 18        |
| 3. 8. Odstranění tuhých částic .....               | 18        |
| <b>4. METODY ČIŠTĚNÍ BIOPLYNU .....</b>            | <b>19</b> |
| 4. 1. Absorpce .....                               | 19        |
| 4.1.1. Fyzikální absorpce .....                    | 20        |
| 4.1.2. Chemická absorpce .....                     | 20        |
| 4.1.3. Hybridní absorpce .....                     | 21        |
| 4. 2. Adsorpce na molekulových sítích .....        | 21        |
| 4. 3. Membránová separace .....                    | 22        |
| 4. 4. Kryogenní separace .....                     | 23        |
| 4. 5. Srovnání metod úpravy bioplynu .....         | 24        |
| <b>5. VODNÍ VYPÍRKA .....</b>                      | <b>26</b> |
| <b>6. LEGISLATIVA .....</b>                        | <b>29</b> |
| 6. 1. Biometan jako palivo .....                   | 29        |
| 6. 2. Biometan vtláčený do plynárenské sítě .....  | 29        |
| 6. 3. Aktuální situace v ČR .....                  | 30        |
| <b>7. NÁVRH TECHNOLOGIE MOKRÉ VYPÍRKY .....</b>    | <b>31</b> |
| 7. 1. Popis technologie .....                      | 31        |
| 7. 2. Hlavní aparáty technologie .....             | 33        |
| 7.2.1. Odlučovač kapek .....                       | 33        |
| 7.2.2. Kompresor .....                             | 33        |
| 7.2.3. Chlazení (bioplyn-voda) .....               | 34        |
| 7.2.4. Absorpční kolona .....                      | 35        |
| 7.2.4.1. Náplň .....                               | 36        |

|   |           |
|---|-----------|
| 7.2.4.2. Zkrápění .....                                     | 37        |
| 7.2.4.3. Odlučovač kapek .....                              | 37        |
| 7.2.4.4. Nosný rošt .....                                   | 37        |
| 7.2.4.5. Plášť .....  | 37        |
| 7.2.5. Flash kolona .....                                   | 38        |
| 7.2.6. Desorpční kolona .....                               | 38        |
| 7.2.7. Sušárna .....  | 38        |
| 7.2.8. Biofiltr .....                                       | 39        |
| <b>8. NÁVRH ABSORPČNÍ KOLONY .....</b>                      | <b>40</b> |
| 8. 1. Složení bioplynu a vstupní podmínky .....             | 40        |
| 8. 2. Hmotová bilance absorpční kolony .....                | 41        |
| 8. 3. Stanovení rozměrů absorpční kolony .....              | 47        |
| 8.3.1. Součinitel přestupu hmoty v plynné fázi .....        | 47        |
| 8.3.2. Součinitel přestupu hmoty v kapalně fázi .....       | 51        |
| 8.3.3. Součinitel prostupu hmoty .....                      | 52        |
| 8.3.4. Povrch výměny hmoty a výška a absorpční kolony ..... | 54        |
| 8. 4. Hydrodynamické výpočty absorpční kolony .....         | 56        |
| 8.4.1. Pracovní oblast navržené absorpční kolony .....      | 57        |
| 8.4.2. Tlaková ztráta .....                                 | 59        |
| <b>9. SIMULAČNÍ MODEL MOKRÉ VYPÍRKY .....</b>               | <b>61</b> |
| <b>10. EKONOMICKÉ NÁKLADY .....</b>                         | <b>63</b> |
| 10. 1. Teoretické náklady simulovaného procesu .....        | 63        |
| 10. 2. Náklady na reálná zařízení .....                     | 63        |
| <b>11. ZÁVĚR .....</b>                                      | <b>65</b> |
| <b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>                      | <b>66</b> |
| <b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>                                  | <b>70</b> |

## SEZNAM SYMBOLŮ

| Symbol                     | Význam   | Jednotka                                  |
|----------------------------|--|---|
| $[A]_i^j$                  | povrch výměny hmoty v řezu                             | $[m^2]$                                   |
| $\bar{c}_{g \text{ krit}}$ | kritická rychlost plynné fáze                          | $[m/s]$                                   |
| $\bar{c}_g$                | mimovrstvová rychlost plynu                            | $[m/s]$                                   |
| $\bar{c}_k$                | rychlost vypírací kapaliny                             | $[m/s]$                                   |
| $\dot{m}_A$                | hmotnostní průtok $CO_2$                               | $[kg/h]$                                  |
| $\dot{m}_C$                | hmotnostní průtok vody                                 | $[kg/h]$                                  |
| $\dot{m}_{ig}$             | hmotnostní průtok inertu (metanu)                      | $[kg/h]$                                  |
| $\dot{m}_{l1}$             | hmotový průtok v řezech                                | $[kg/h]$                                  |
| $\dot{n}_A$                | molový průtok $CO_2$                                   | $[kmol/h]$                                |
| $\dot{n}_B$                | molový průtok $CH_4$                                   | $[kmol/h]$                                |
| $\dot{n}_C$                | molový průtok $H_2O$                                   | $[kmol/h]$                                |
| $\dot{V}_{BP}$             | objemový průtok bioplynu                               | $[Nm^3/h]$                                |
| $\dot{V}_{Cmin}$           | minimální objemový průtok vypírací vody                | $[m^3/h]$                                 |
| $\dot{V}_g$                | objemový průtok plynu                                  | $[Nm^3/s]$                                |
| $\dot{V}_k$                | objemový průtok kapaliny                               | $[m^3/h]$                                 |
| $\frac{\Delta p}{h}$       | jednotkový tlakový spád                                | $[N/m^3]$                                 |
| $\frac{d \ln k_H}{d(1/T)}$ | teplotní závislost Henryho konstanty (směrnice přímky) | $[K]$                                     |
| $k_H$                      | Henryho konstanta při dané teplotě                     | $\left[ \frac{mol}{kg \cdot atm} \right]$ |
| $k_H^\theta$               | Henryho konstanta při standardních podmínkách          | $\left[ \frac{mol}{atm} \right]$          |
| $p_A^*$                    | parciální tlak složky                                  | $[MPa]$                                   |
| $\beta_{A1}$               | součinitel přestupu hmoty v kapalně fázi               | $[kg/m^2 \cdot h]$                        |
| $\beta_{Agi}$              | součinitel přestupu hmoty v plynné fázi                | $[kg/m^2 \cdot h]$                        |
| $\eta_{H_2O}$              | kinematická viskozita vody                             | $[m^2/s]$                                 |
| $\eta_k$                   | viskozita zkrápěcí kapaliny                            | $[Pa \cdot s]$                            |
| $\Delta p_m$               | tlaková ztráta   | $[Pa]$                                    |
| $a$                        | specifický povrch kroužků                              | $[m^2/m^3]$                               |
| $A$                        | povrch výměny hmoty                                    | $[m^2]$                                   |
| $A_i$                      | konstanty regresních funkcí                            | $[-]$                                     |

|               |   |   |
|---------------|---|---|
| $C_A$         | rozpustnost   | [g/l]   |
| $d$           | průměr absorpční kolony                             | [m]   |
| $D_A$         | difuzivita systému $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ | [ $\text{m}^2/\text{h}$ ]                         |
| $g$           | gravitační zrychlení                                | [ $\text{m}/\text{s}^2$ ]                         |
| $G_i$         | hmotová rychlost                                    | [ $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ]         |
| $h$           | výška absorpční kolony                              | [m]   |
| $H_A$         | Henryho konstanta                                   | [MPa]   |
| $K_{MA}$      | koeficient prostupu hmoty                           | [ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$ ] |
| $K_y$         | konstanta fázové rovnováhy                          | [-]   |
| $L_{\min}$    | voleného násobku vypírací kapaliny                  | [-]   |
| $M_i$         | hmotnostní poměr                                    | [-]   |
| $MW_i$        | molární hmotnost složky                             | [ $\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$ ]               |
| $P$           | tlak v absorpční koloně                             | [MPa]   |
| $R$           | molární plynová konstanta                           | [ $\frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$ ]  |
| $Re$          | Reynoldsovo číslo                                   | [-]   |
| $S$           | průřez absorpční kolony                             | [ $\text{m}^2$ ]                                  |
| $Sc$          | Schmidtovo číslo                                    | [-]   |
| $Sh$          | Sherwoodovo číslo                                   | [-]   |
| $T$           | teplota   | [K]   |
| $T_0$         | teplota za normálních podmínek                      | [K]   |
| $V$           | objem náplně  | [ $\text{m}^3$ ]                                  |
| $v_{BP}$      | rychlost bioplynu                                   | [m/s]   |
| $x_{Ai}$      | molový zlomek v kapalně fázi                        | [-]   |
| $X_{Ai}$      | relativní molový zlomek                             | [-]   |
| $X_{Ai}^*$    | rovnovážný relativní molový zlomek v kapalně fázi   | [-]   |
| $Y_{Ai}$      | relativní molový zlomek v plynně fázi               | [-]   |
| $y_{Ai}$      | molový zlomek v plynně fázi                         | [-]   |
| $Y_{Ai}^*$    | rovnovážný relativní molový zlomek v plynně fázi    | [-]   |
| $Y_P$         | souřadnice bodu plnění                              | [-]   |
| $Y_Z$         | souřadnice bodu zahlcení                            | [-]   |
| $\delta_A$    | modifikovaná difuzivita v kapalně fázi              | [ $\text{kg}/\text{m} \cdot \text{h}$ ]           |
| $\delta_{AS}$ | modifikovaná difuzivita v plynně fázi               | [ $\text{kg}/\text{m} \cdot \text{h}$ ]           |



|               |   |                      |
|---------------|---|----------------------|
| $\Delta\pi_A$ | hnací potenciál   | [-]                  |
| $\varepsilon$ | mezerovitost  | [-]                  |
| $\theta$      | charakteristický lineární rozměr                        | [m]                  |
| $\mu_{BP}$    | dynamická viskozita bioplynu                            | [kg/m·h]             |
| $\mu_{H_2O}$  | dynamická viskozita bioplynu                            | [kg/m·h]             |
| $\rho_i$      | hustota složky  | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| $\rho_{ig}$   | hustota plynu (bioplynu)                                | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| $\rho_k$      | hustota zkrápěcí kapaliny                               | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| $\rho_{vzd}$  | hustota vzduchu   | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| $\psi$        | součinitel k přepočtení hnacího potenciálu kapalné fáze | [-]                  |

## SEZNAM ZKRATEK

| Zkratka          | Význam  |
|------------------|---|
| aMDEA            | aktivovaný metyldietanolamin                    |
| BP               | bioplyn   |
| CNG              | stlačený zemní plyn (Compressed Natural Gas)    |
| CO <sub>2</sub>  | oxid uhličitý                                   |
| CzBA             | Česká bioplynová asociace                       |
| ČOV              | čistírna odpadních vod                          |
| ČR               | Česká republika                                 |
| D                | dole  |
| DEA              | dietanolamin                                    |
| DGA              | diglykolamin                                    |
| ERÚ              | Energetický regulační úřad                      |
| H <sub>2</sub>   | vodík   |
| H <sub>2</sub> O | voda  |
| H <sub>2</sub> S | sulfan  |
| HCl              | Kyselina chlorovodíková                         |
| CH <sub>4</sub>  | metan   |
| LPG              | zkapalněný ropný plyn (Liquefied Petroleum Gas) |
| MEA              | monoetanolamin                                  |
| N                | nahoře  |
| N <sub>2</sub>   | dusík   |
| NH <sub>3</sub>  | amoniak   |
| NO <sub>x</sub>  | oxidy dusíku                                    |
| O <sub>2</sub>   | kyslík  |
| OZE              | obnovitelný zdroj energie                       |
| PCDDs            | polychlorované dibenzo-p-dioxiny                |
| PCDFs            | polychlorované dibenzofurany                    |
| PSA              | Pressure Swing Adsorption                       |
| SNG              | Substitute Natural Gas                          |
| SO <sub>2</sub>  | oxid siřičitý                                   |
| €                | Euro  |

## ÚVOD

Bioplyn vzniká anaerobní fermentací organického materiálu např. zbytkové či cíleně pěstované biomasy, exkrementů hospodářských zvířat, odpadů z údržby zeleně a kalů čistíren odpadních vod. Jedná se především o materiály, které jsou jak z ekonomického tak technologického hlediska nevhodné pro spalování [1].

Bioplyn je vysoce hodnotným nositelem energie, to znamená, že může být mnohostranně a velmi účinně využit především pro výrobu elektrické energie, vaření, vytápění a přípravu teplé vody, k sušení, chlazení a napájení infračervených zářičů. Výhřevnost leží v závislosti na obsahu metanu mezi 19,6 až 25,2 MJ/m<sup>3</sup>. Bioplyn má v poměru k objemu podstatně menší výhřevnost než zemní plyn (ZP) nebo propan-butan. Je lehčí než vzduch, a proto se nehromadí při úniku u podlahy jako těžký propan-butan. Naopak při stoupání se velmi rychle mísí se vzduchem, čímž se zmenšuje nebezpečí hoření nebo výbuchu. Další vlastnosti bioplynu uvádí tab. 1[2].

| Vlastnosti                                  | Složky bioplynu |                 | Směs (65 % CH <sub>4</sub> a 35 % CO <sub>2</sub> ) |
|---|-----------------|-----------------|---|
|   | CH <sub>4</sub> | CO <sub>2</sub> |   |
| průměrný obsah [obj. %]                     | 55 - 75         | 24 - 44         | 100   |
| třaskavá směs ve směsi se vzduchem [obj. %] | 5 - 15          | -               | 6 - 12  |
| zápalná teplota [°C]                        | 700             | -               | 650   |
| kritický tlak [MPa]                         | 4,7             | 7,5             | 7,5 - 8,9   |
| kritická teplota [°C]                       | -81,5           | 31              | -82,5   |
| hustota [kg/m <sup>3</sup> ]                | 0,72            | 1,98            | 1,2   |

**Tab. 1. Vlastnosti bioplynu [44]**

Je velmi důležité minimalizovat, nebo pokud je možné vyhnout se emisím metanu z procesů, protože metan je 23-krát více nebezpečný skleníkový plyn než oxid uhličitý (CO<sub>2</sub>). Unikne-li metan do vzduchu, pak vlivem slunečního světla, ozónu a takzvaných radikálů (velmi reaktivních molekul HO) oxiduje na oxid uhličitý a vodu. Dnes je však tato rovnováha stále porušována. Hlavně při těžbě uhlí, ropy a zemního plynu, kdy uniká velké množství metanu v nespálené formě do atmosféry. To vše vedlo v posledních desetiletích ke stálému nárůstu koncentrace metanu v zemské atmosféře. Metan je po oxidu uhličitém nejvýznamnější škodlivinou ve vzduchu a podílí se z 20 % na skleníkovém efektu. Kromě toho při oxidaci spotřebovává ozón a přispívá ke zvětšování ozónové díry. Za těchto okolností získává na významu technická výroba a využití bioplynu, která má několik výhod. Důležitou předností bioplynu proti zemnímu plynu je jeho nefosilní, plně obnovitelný charakter. Vysoce kvalitní zbytek z vyhnívání může být použit jako hnojivo. Redukuje uvolňování metanu do atmosféry v porovnání s tradičním hnojením v zemědělství a skládkami. Vozidla na zemní plyn produkují výrazně méně škodlivin než vozidla s klasickým pohonem. Energetické využití bioplynu na rozdíl od spalování zemního plynu, zkapalněného plynu (propan-butanu), oleje a uhlí, je neutrální z hlediska produkce CO<sub>2</sub>, neboť vznikající CO<sub>2</sub> je součástí koloběhu uhlíku v přírodě a je opět spotřebováván rostlinami. Jeho koncentrace v atmosféře se proto nezvyšuje, zatímco CO<sub>2</sub> pocházející z fosilních surovin k tomu přispívá [1], [1], [3].

## 2. SLOŽENÍ BIOPLYNU

Bioplyn je produktem látkové výměny metanových bakterií, ke které dochází, když bakterie rozkládají organickou hmotu. Tento proces rozkladu má v podstatě čtyři fáze:

V první fázi přeměňují přítomné anaerobní bakterie, tedy ještě nikoli metanové bakterie, makromolekulární organické látky (bílkoviny, uhlovodíky, tuk, celulózu) pomocí enzymů na nízkomolekulární sloučeniny, jako jsou jednoduché cukry, aminokyseliny, mastné kyseliny a voda. Tento proces se nazývá hydrolýza [2].

Poté mohou acidofilní bakterie provést další rozklad na organické kyseliny, CO<sub>2</sub>, sulfan a amoniak. Z toho nyní octotvorné bakterie vytvoří acetáty, CO<sub>2</sub> a vodík. A teprve nakonec metanové bakterie v alkalickém prostředí vytvoří metan, CO<sub>2</sub> a vodu [2].

### 2. 1. Majoritní složky v bioplynu

Hlavními složkami bioplynu jsou metan a oxid uhličitý v různých poměrech, dle podmínek metanizace a kvality substrátu. Jejich poměrné zastoupení můžeme v literatuře nalézt jako značně proměnné v širokých mezích zjištěných obsahů metanu (tab. 2) [4].

V majoritních složkách je poměrně velký rozdíl mezi reaktorovým a skládkovým plynem. Skládkový odpad, na rozdíl od reaktoru, není tělesem ideálně plynotěsným a procesy difúzní i vlivy měnícího se barometrického tlaku téměř vždy způsobí, že v plynu je naředěn zůstatek ze zreagovaného vzduchu anebo dokonce, že plyn obsahuje určitý podíl nezměněného přísátého vzduchu. Skládkový plyn tedy na rozdíl od plynu reaktorového obsahuje vedle metanu a CO<sub>2</sub> i podíly vzdušného dusíku, může se v něm nalézat argon a nezreagovaný kyslík [4].

Kvalita bioplynu je určována především poměrem hořlavého metanu k „neúčinnému“ oxidu uhličitému, který zředí bioplyn, snižuje výhřevnost, způsobuje korozi a zapříčiňuje vznik nákladů, především při skladování plynu. Proto je nutné usilovat o co nejmenší obsah CO<sub>2</sub> v bioplynu [2], [5].

| Bioplyn                     | Obsah CH <sub>4</sub> [obj. %] |
|-----------------------------|--------------------------------|
| z čištění odpadních vod     | 50-85                          |
| ze stabilizace kalů         | 60-70                          |
| z agroindustriálních odpadů | 55-75                          |
| ze skládek                  | 35-55                          |

Tab. 2. Typické obsahy metanu z různých technologických procesů [6]

### 2. 2. Minoritní složky v bioplynu

Obsah veškerých dalších plynů jsou více než o jeden řád nižší, tedy jsou v úrovních maximálně jednotek procent (u kvalitního bioplynu). Oproti majoritním složkám je chemická skladba minoritních komponent bioplynu velice pestrá. Chemické sloučeniny, které byly v bioplynech identifikovány a stanoveny v řádech stovek miligramů na krychlový metr a menších, se počítají na stovky v mnoha skupinách a typech derivátů. Počet identifikovaných látek lze v současnosti odhadnout na 400-500. Pro praktické účely jsou analýzy minoritních obsahů uhlovodíků téměř bezcenné, neboť tyto látky jen velmi málo přispívají k celkovému energetickému obsahu bioplynu. Výhřevnost plynu je prakticky výlučně dána obsahem metanu [4].

Ke zvýšení kvality je obvykle surový bioplyn čištěn od nežádoucích látek, jako jsou sulfan, kyslík, dusík, voda a pevné částice. Některé z nežádoucích látek a jejich nežádoucí účinky jsou uvedeny v tab. 3.

| Komponenta                          | Typický obsah          | Vliv  |
|-------------------------------------|------------------------|---|
| H <sub>2</sub> S                    | 0-0,5 % obj.           | - žíravý účinek na zařízení a potrubní systémy<br>emise SO <sub>2</sub> po spálení a emise H <sub>2</sub> S po nedokonalém spalování<br>- ničí katalyzátory |
| NH <sub>3</sub>                     | 0-0,05% obj.           | - emise NO <sub>x</sub> po spalování<br>- zvyšuje antidetonační vlastnosti motorů   |
| Vodní pára                          | 1-5% obj.              | - způsobuje korozi v zařízeních a potrubních systémech<br>- kondenzáty ničí zařízení<br>- nebezpečí zamrznutí potrubních systémů a trysek                   |
| Prach                               | > 5 μm                 | - blokuje trysky  |
| N <sub>2</sub>                      | 0-5% obj.              | - snižuje výhřevnost<br>- zvyšuje antidetonační vlastnosti motorů   |
| Siloxany<br>(organokřemičité látky) | 0-50 mg/m <sup>3</sup> | - působí jako abrazivo a poškozují motory   |

**Tab. 3. Typické komponenty nečistot v bioplynu [5]**

Základní minoritní složkou v bioplynu je síra. Z pohledu technologického i uživatelského však můžeme problém síry v bioplynu pro naprostou většinu případů zúžit na jedinou sloučeninu – na problém sulfanu, který může v bioplynu narůst do významných obsahů. Vzniká během rozkladu sirmé sloučeniny (sulfáty, peptidy, aminokyseliny. Tato látka je velmi agresivní. Zapříčiňuje korozi, což vyvolává problémy především v armaturách, plynoměrech, hořácích a motorech. Proto je zpravidla nutno bioplyn odsířit. Jeho množství, které v bioplynu nalezneme, je přednostně určováno složením reakčního substrátu. Za hlavní zdroj síry lze považovat látky bílkovinné povahy a její množství je úměrné tomu, kolik jí je obsaženo v substrátu v biologicky zpracovatelné formě [2], [4].

Kromě toho obsahuje bioplyn obvykle celou řadu dalších látek, z nichž mnohé působí problémy při jeho energetickém využití. Mezi takové látky se řadí především organokřemičité sloučeniny, z nichž největší pozornost je věnována nízkomolekulárním siloxanům. Jejich koncentrace v bioplynu závisí na obsahu křemíku v biomase, ze které bioplyn vzniká. Možným způsobem odstraňování organických sloučenin křemíku z bioplynu je jejich adsorpce na vhodných adsorpčních materiálech (aktivní uhlí, apod.) [7].

V bioplynu se dále nachází určité množství amoniaku, molekulárního dusíku, vodíku a kyslíku. Jejich podíl činí celkem 6 až 8 %. Čerstvý plyn z bioplynové stanice je také nasycen vodní párou. Vysušení bioplynu kondenzací vodní páry je důležitým opatřením při úpravě plynu. Spolu s vodou se odstraní i velká část obsaženého amoniaku [2].

### 3. ČIŠTĚNÍ BIOPLYNU

Pro mnoho aplikací se kvalita bioplynu musí zvýšit. Například bioplyn, který je určen pro použití místo zemního plynu nebo jako palivo pro vozidla je nutné upravit na kvalitu srovnatelnou se zemním plynem. Takto upravený bioplyn se nazývá biometan nebo také Substitute Natural Gas (SNG). Hlavní složky, které se vyžadují odstranit v systémech úpravy je odstranění vody, odstranění nežádoucích příměsí ( $H_2S$ , aj.) a odstranění  $CO_2$ . Po čištění bioplynu se dosahuje složení podobné složení zemního plynu (tab. 4) [3], [4].

| Složení                   | Bioplyn | SNG   | Zemní plyn |
|---------------------------|---------|-------|------------|
| $CH_4$ [obj. %]           | 61      | 94,9  | 98,2       |
| $CO_2$ [obj. %]           | 36,8    | 2     | 0,1        |
| vyšší uhlovodíky          | -       | -     | 0,9        |
| $N_2$ [obj. %]            | 1,7     | 2,2   | 0,8        |
| spalné teplo [ $MJ/m^3$ ] | 22,99   | 35,77 | 39,17      |

Tab. 4. Složení a spalné teplo bioplynu, SNG a zemního plynu [4]

#### 3. 1. Odstranění vody

Při odchodu z fermentoru je bioplyn nasycen vodní párou a tato voda může kondenzovat v potrubí a spolu s oxidy síry může způsobovat korozi. K jejímu odstranění se nejčastěji používají metody absorpce a adsorpce, buď zachytáváním vody absorpcí glykoly nebo adsorpcí na silikagelu, alumině nebo molekulových sítích. Nevýhodou je nákladná termická regenerace absorbentů. Další metodou je chlazení plynu a následná kondenzace vody. Pokud je bioplyn ochlazen na teploty 0-5 °C, pak kondenzuje největší podíl vodní páry. Spolu s vodní párou se odlučují také ve vodě rozpustné minoritní složky, jako jsou amoniak, sulfan nebo různé aerosoly. Vhodnou metodou může být také kombinace chlazení a vypírání glykoly. Při nízkých teplotách se totiž přítomné halogenované uhlovodíky v bioplynu nerozkládají a nevzniká kyselina chlorovodíková (HCl). Absorpční sušící procesy nejsou vhodné, pokud jsou v bioplynu přítomny tepelně nestálé halogenované uhlovodíky. Vzniklé HCl z halogenovaných uhlovodíků okyseluje prací médium a způsobuje jeho polymerizaci [2], [3], [4], [8].

#### 3. 2. Odstraňování sulfanu z bioplynu

Sulfan je problematická složka bioplynu z mnoha důvodů. Z nejzávažnějších je to zápach a toxicita podle jeho koncentrace. Další jsou agresivní a korozivní vlastnosti a zdroj oxidů síry ve spalinách při jeho energetickém využití. Rozmezí koncentrací, ve kterých se v bioplynu pohybuje, je velmi široké a závisí především na koncentracích sírných látek ve vstupním substrátu a použité technologii fermentace. Bioplyn lze podle tohoto kritéria rozdělit na bioplyn s technologicky nevýznamným podílem sulfanu (do  $50 \text{ mg/m}^3$ ), bioplyn s nízkým podílem sulfanu ( $50 - 250 \text{ mg/m}^3$ ), bioplyn se středním podílem sulfanu ( $250 - 1500 \text{ mg/m}^3$ ) a bioplyn s vysokým podílem sulfanu (nad  $1500 \text{ mg/m}^3$ ) [4], [6].

K jeho odstranění z plynu je možno použít metody fyzikálně-chemické nebo chemické. Často užívané jsou metody selektivní absorpce v aminech (diglykolamin, monoetanolamin, metyldietanolamin) nebo jiných sloučeninách s vysokou afinitou k  $H_2S$ . Tyto metody jsou široce rozšířeny a již dlouho úspěšně aplikovány. Vždy jsou však spojeny s náklady



na spotřebu energie, na náplně sorpčních zařízení, chemikálie pro jejich regeneraci, jejíž účinnost navíc časem klesá. Pro odstraňování sulfanu z relativně malých objemů bioplynu se osvědčily především adsorpční metody, kdy se sulfan zachycuje na pevných absorbentech [6], [9].

### 3. 3. Odstraňování halogenovaných uhlovodíků

Nejběžnější jsou chlorofluorovodíky, které byly používány jako chladiva. Ačkoli jejich použití bylo zcela zakázáno v 80. letech, jsou stále obsaženy ve skládkách v důsledku jejich pomalého vypařování ze starého odpadu. Skládkový plyn proto často obsahuje významné množství halogenovaných uhlovodíků a vyšších uhlovodíků. Zřídka jsou obsaženy v bioplynu z čistírny odpadních vod (ČOV) a neměly by být přítomny ani v bioplynu ze zemědělských surovin. Tyto složky mohou oxidovat během spalování bioplynu, vytvářet žíravé produkty v kogeneračních jednotkách, ve spalovacích komorách, ventilech, hlavách válců a dalších zařízeních. Navíc mohou být předzvěstí tvorby dioxinů (PCDDs) a furanů (PCDFs). Před použitím bioplynu je proto třeba je odstranit. Technologie k odstranění těchto složek jsou stejné jako u odstraňování CO<sub>2</sub>. Nejúčinnější metodou pro záchyt halogenovaných uhlovodíků je adsorpce na vrstvě aktivního uhlí nebo podobné adsorpční metody [3], [6], [10], [11].

### 3. 4. Odstraňování oxidu uhličitého

Jeho odstranění se provádí především z důvodu potřeby zvýšit obsah metanu v bioplynu na požadovanou úroveň. Pokud se bioplyn čistí na kvalitu zemního plynu, je potřeba zvýšit obsah metanu v něm až na cca 95 a více %. Vhodné jsou metody adsorpce, absorpce, membránová separace a kryogenní postupy. Tyto metody budou více přiblíženy níže v kapitole 0 [6].

### 3. 5. Odstranění kyslíku a dusíku

Kyslík není v bioplynu normálně obsažen, protože by měl být spotřebován aerobními mikroorganismy ve vyhnívací nádrži. Pokud je ve vyhnívací nádrži přítomen vzduch, bude dusík nadále přítomen v plynu při odchodu z vyhnívací nádrže. Kyslík a dusík mohou být přítomny v plynu ze skládky, když je nasáváno příliš velké množství vzduchu během odběru skládkového plynu. Nižší koncentrace kyslíku nejsou problémem, ale při vyšších koncentracích představují riziko výbuchu. Tyto plyny mohou být odstraněny adsorpcí na aktivovaném uhlí, molekulárních sítích nebo membránách. Zabránění vniknutí vzduchu a pečlivým monitoringem koncentrace kyslíku je však mnohem levnější než odstraňování těchto složek při čištění bioplynu [3], [8].

Bioplyn ze skládek obsahuje také vysoký podíl dusíku. Vzhledem k tomu, že je inertní, jeho jediný vliv je na zředění energetického obsahu. Pokud snižování H<sub>2</sub>S vyžaduje dodání vzduchu, má to za následek nárůst dusíku (4% dodaného vzduchu by mělo za následek 3,1% dusíku). V zemědělském bioplynu není dusík obvykle obsažen. Lze ho odstranit PSA a kryogenními technologiemi, ale obecně je to příliš nákladné [10].

### 3. 6. Odstraňování siloxanů

Siloxany jsou organokřemičité sloučeniny, které lze označit společným komerčním názvem silikony. Mezi tyto látky se řadí například silikonové oleje, mazací tuky, gely nebo

pryže. Největším zdrojem „organického křemíku“ jsou však silanizační avivážní prostředky, deodoranty a šampóny. Proto se mohou vyskytovat v zařízení na výrobu bioplynu z čistírenských kalů a skládkového plynu. Při jejich spalování vzniká bílý prášek oxidu křemičitého, který je příčinou mnoha problémů v plynových motorech. Možným způsobem odstraňování organických sloučenin křemíku z bioplynu je jejich adsorpce na vhodných adsorpčních materiálech. V úvahu přichází použití aktivního uhlí či podobných uhlíkatých adsorbentů. Výhodou použití aktivního uhlí je možnost současného odstraňování sulfanu. Dalším možným způsobem odstranění siloxanů je ochlazením plynu, aktivovaným hliníkem nebo silikagelem nebo absorpcí v tekuté směsi uhlovodíků [3], [8], [12].

### 3. 7. Odstranění amoniaku

Amoniak vzniká během rozkladu bílkovin a jeho množství přítomné v bioplynu je závislé na složení substrátu a pH ve vyhnívající nádrži. Koncentrace je obvykle velmi nízká ( $<0,1 \text{ mg/m}^3$  bioplynu). Spalování amoniaku vede k tvorbě oxidů dusíku. Plynové motory mohou obvykle přijmout maximálně  $100 \text{ mg/Nm}^3$ . Pouze Švédsko má standard pro obsah amoniaku v biometanu vtlačného do distribuční sítě  $20 \text{ mg/Nm}^3$ . Amoniak je obvykle odstraňován, když je plyn sušen. Kromě toho je amoniak rozpustný ve vodě, tedy odstranitelný pomocí kondenzované vody a technologiemi mokré vypírky. Proto ho není nutné odstraňovat před vstupem do technologie [3], [11].

### 3. 8. Odstranění tuhých částic

Tuhé částice přítomné v bioplynu a skládkovém plynu mohou způsobovat mechanické opotřebení v plynových motorech a turbínách. Jsou odstraňovány mechanickými síty [3]. V bioplynu mohou být přítomny také prachové a olejové částice z kompresorů, které musí být filtrovány na 2 až  $5 \mu\text{m}$ . Tyto filtry jsou vyrobeny z papíru nebo tkaniny [11].



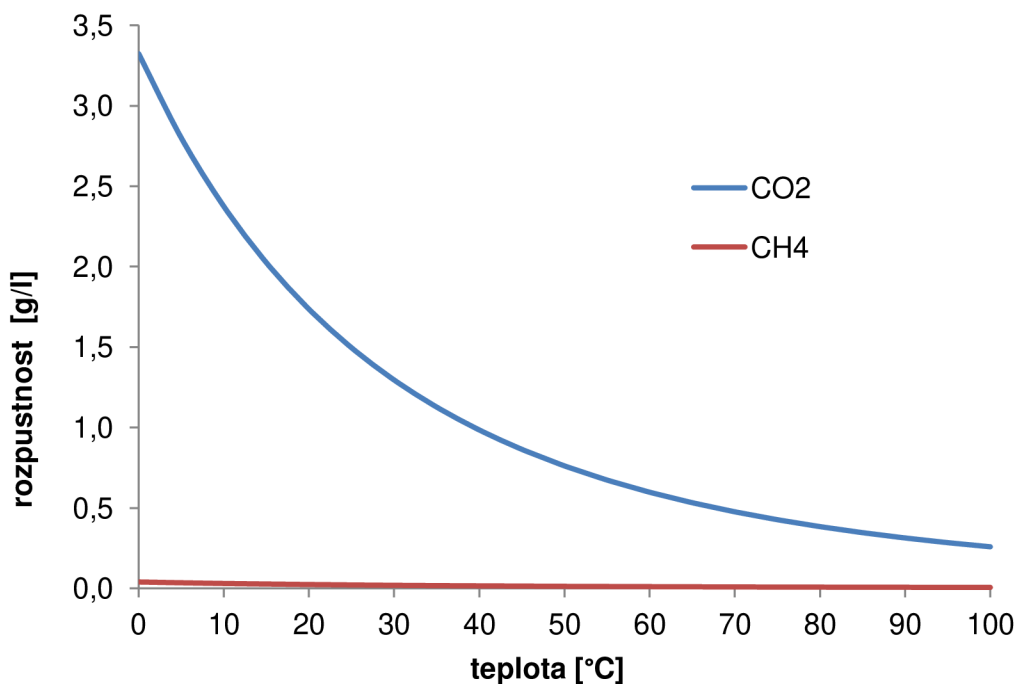
## 4. METODY ČIŠTĚNÍ BIOPLYNU

K čištění plynů jako jsou zemní plyn, svítiplyn, kalový plyn, skládkový plyn atd., byla vyvinuta celá řada technologií. Nicméně ne všechny z nich se doporučují k čištění bioplynu, buď kvůli jejich ceně nebo životnímu prostředí [8].

Největší uplatnění v reálném provozu získaly převážně tři technologie. Proces tlakové adsorpce (PSA), fyzikální absorpce (tlaková vodní vypírka) či chemická absorpce (např. aminová vypírka). Jako perspektivní se však dále jeví metoda membránové separace a kryogenní separace [1].

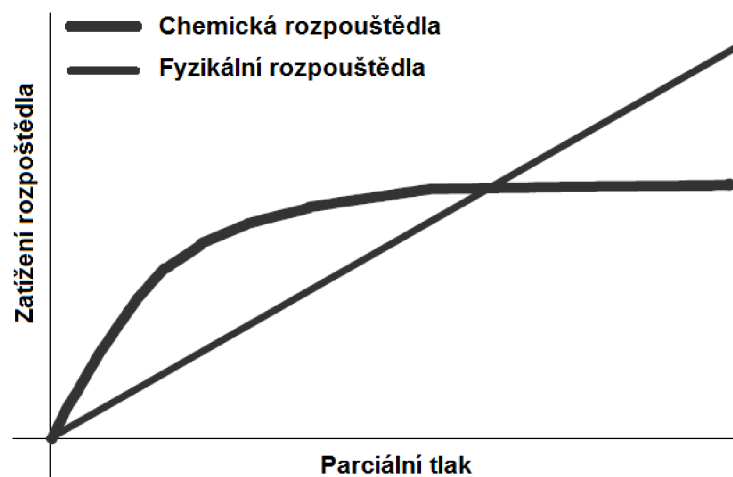
### 4. 1. Absorpce

Absorpce v kapalinách je proces pohlcování plynů nebo par (absorbátu) v rozpouštějících kapalinách (absorpční činidlo) za vzniku chemických nebo fyzikálních vazeb. Surový plyn se setkává s kapalinou protiproudě v koloně, která je vyplněna materiálem s velkým měrným objemem (za účelem zvýšení kontaktu mezi plynem a kapalnou fází). Principem absorpce je, že oxid uhličitý je mnohem více rozpustný ve vypírací kapalině než metan (obr. 1). Kapalina (rozpouštědlo) odcházející z kolony obsahuje zvýšenou koncentraci  $\text{CO}_2$ , zatímco plyn opouštějící kolonu má zvýšenou koncentraci  $\text{CH}_4$ . Po absorpci je rozpouštědlo regenerováno využitím tepla nebo tlaku (v závislosti na druhu rozpouštědla). Zachycené  $\text{CO}_2$  je odděleno a shromažďováno. V průmyslu se většinou absorpce využívá ke komerční výrobě  $\text{CO}_2$  [3], [13].



**Obr. 1** Rozpustnost  $\text{CO}_2$  a  $\text{CH}_4$  ve vodě v závislosti na teplotě (viz. PŘÍLOHA 1)

Absorpce obecně dělíme na fyzikální, chemickou a hybridní. Ve většině případů se využívá vypírání v absorpčních věžích. Hlavní rozdíl mezi chemickou a fyzikální absorpcí je, že rozpustnost cílového plynu ve fyzikálních rozpouštědlech se zvyšuje lineárně s parciálním tlakem tohoto plynu, zatímco chemická rozpouštědla mají vysokou absorpční kapacitu při relativně nízkých parciálních tlacích (obr. 2). Ustáleného stavu dosahují až při dosažení vyšších parciálních tlaků. Hybridní absorpce je pak kombinací vlastností fyzikální a chemické absorpce [3], [13], [14].



Obr. 2 Porovnání mezi fyzikálními a chemickými rozpouštědly [14]

#### 4.1.1. Fyzikální absorpce

Nejjednodušším absorpčním činidlem pro záchyt  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{S}$  pracujícím na principu fyzikální absorpce je voda. Z důvodu slabé interakce při fyzikální absorpci následuje velmi snadná regenerace. Pro regeneraci lze využít tepla nebo snižování tlaku. V případě použití jako rozpouštědla vody, mluvíme o tlakové vodní vypírce. Tato technologie je předmětem diplomové práce a bude více přiblížena níže v kapitole 5 [13], [15].

Velmi podobná vodní vypírce je organická fyzikální vypírka, která využívá kapaliny na bázi alkoholů, glykolů a jejich směsí pod nejrůznějšími komerčními názvy. Příklady obchodních značek pro kapaliny používané v organické fyzikální vypírce jsou Selexol (polyetylglykol) a Genosorb (metanol). V těchto kapalinách je  $\text{CO}_2$  více rozpustný než ve vodě, čímž dochází ke zlepšení průtoku kapalně fáze. To má za následek menší požadavky na množství rozpouštědla (snižování čerpání) a zařízení mohou být tak menší. Sulfan, voda, kyslík a dusík mohou být odstraněny spolu s oxidem uhličitým, ale mnohem častěji se však odstraňují před úpravou bioplynu. Tato metoda je vždy navrhována s regenerací, nicméně u chemických vazeb je následkem silných interakcí potřeba na desorpci vynaložit výrazně více energie. V důsledku vzniku elementární síry se odstraňování rozpouštědla vzduchem nedoporučuje. Vhodné je odstranění párou nebo inertním plynem (upravený bioplyn nebo zemní plyn). Alternativa je odstranění sulfanu předem. Výhodou fyzikální absorpce je vysoký výtěžek metanu. Není však ekonomické v technologii měnit charakteristický průtok plynu a obsah  $\text{CO}_2$ . Z důvodu složitosti procesu, energetického zatížení na regeneraci a doplňování kapaliny, jsou provozní náklady na tyto technologie poměrně vysoké [3], [8], [13], [16].

#### 4.1.2. Chemická absorpce

Oddělování nežádoucích příměsí přítomných v bioplynu od metanu je možné docílit i chemickou absorpcí. Při ní  $\text{CO}_2$  reaguje s chemickými rozpouštědly na slabě vázané meziprodukty. Výhodou oproti fyzikální vypírce je vyšší selektivita a rozpustnost nežádoucích plynů a to i při atmosférickém tlaku. Nejčastějším absorbenty je monoethanolamin (MEA), dietanolamin (DEA), diglykolamin (DGA), amoniak nebo horký uhličitán draselný. Vstupní surový bioplyn je stlačován pouze na cca 50 kPa (k překonání odporu vypírky) a vychlazen na teplotu cca 10 °C. Sorbent je ředěn vodou na koncentraci 10-20 % a na rozdíl od fyzikální vypírky váže nežádoucí plyny chemicky. Obohacený

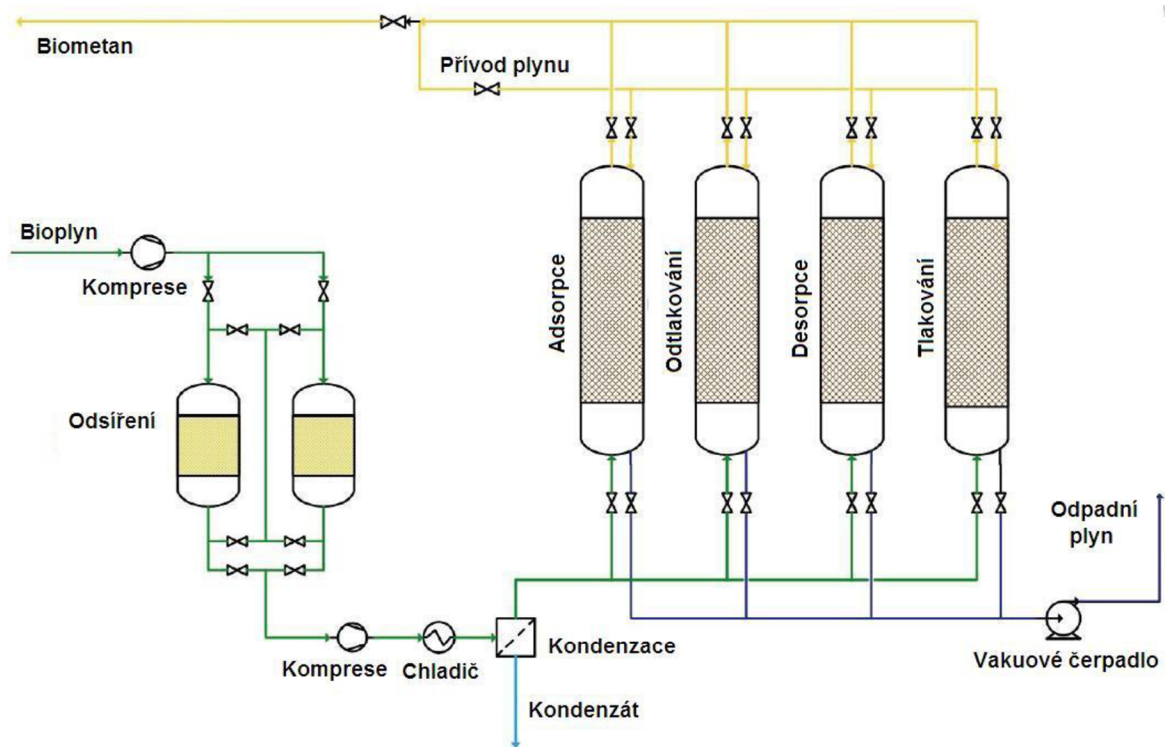
biometan odchází s koncentrací 96-99 %  $\text{CH}_4$ . Regenerace sorbentu se provádí párou při teplotě až přes  $100\text{ }^\circ\text{C}$  ve spodní třetině desorpční kolony. Z meziproductů jsou pak regenerovány původní rozpouštědla a reversní chemickou reakcí se  $\text{CO}_2$  vrátí zpět do plynné fáze. Část vody se při tom odpaří a musí být nahrazena. S tím jsou také spojeny vyšší energetické náklady. Vzhledem k vysoké spotřebě energie na regeneraci sorbentu od sulfanu, je vhodné ho odstranit před odstraňováním  $\text{CO}_2$ . Výhodou je, že technologie pracuje za atmosférického tlaku. Nevýhodou, že zahrnuje zpracování toxických látek a proto zde existuje riziko chemického úniku, [3], [4], [17], [18].

#### 4.1.3. Hybridní absorpce

Hybridní rozpouštědla kombinují ty nejlepší vlastnosti chemických a fyzikálních rozpouštědel obvykle složených ze směsi složek. Typická rozpouštědla jsou například aMDEA proces (aktivovaný metyldietanolamin), Sulfinol a UCARSOL [14]. Proces aMDEA využívá vodný roztok obsahující metyldietanolamin - aktivátor pro zvýšení absorpce  $\text{CO}_2$ . Podle výrobce je možné při použití aMDEA procesu významně snížit koncentraci  $\text{CO}_2$  (až na 5ppm). Provozní tlak je v rozmezí 1 až 120 atm a kapacita pro jeden průběh se může pohybovat mezi 3000 a 810 000  $\text{Nm}^3/\text{h}$  vstupního plynu. Sulfinol je směs chemického rozpouštědla (sekundární nebo terciární amin, v závislosti na aplikaci) a fyzikálního rozpouštědla (sulfolan). Podle výrobce, může dojít ke snížení koncentrace  $\text{CO}_2$  v syntetickém plynu až na 0,5% [14].

## 4. 2. Adsorpce na molekulových sítích

Další nejrozšířenější metodou odstraňování  $\text{CO}_2$  z bioplynu je metoda střídání tlaků během fáze adsorpce a desorpce. Zařízení využívající tuto technologii se nazývá procesem PSA (Pressure Swing Adsorption) s vakuovou desorcí (schéma procesu PSA je na obr. 3). Pokud je v surovém plynu přítomen sulfan, bude nevratně adsorbován do adsorpčního materiálu a společně s vodou může zničit strukturu adsorpčního materiálu. Proto je nutné odstranit sulfan a vodu před vstupem do technologie. Je také důležité zamezit průchodu butanům a těžkým sloučeninám. Odsířený bioplyn se stlačí na 8-10 barů a poté je vháněn na molekulová síta adsorberu tvořená většinou zeolity (oxid hlinitý, křemičitan hlinitý), na jejichž povrchu je absorbován  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  a  $\text{N}_2$ . Jakmile je adsorpční materiál nasycen, přesouvá se operace do druhého adsorbéru při dodržení pracovního tlaku. Odcházející plyn má pak vysoký obsah metanu (více než 97%), avšak jeho ztráty tvoří 10-25 %. Regenerace nasyceného adsorpčního materiálu se provádí postupným odtlakováním adsorberu na atmosférický tlak a následně pak blízkému vakuu. Vakuum je použito, aby vysálo většinu  $\text{CO}_2$  z média a vyfouklo ho do okolí. Tento odpadní plyn obsahují zbytky  $\text{CH}_4$  a někdy může být z důvodu snížení emisí spalován. Pro zajištění plynulého provozu a dostatku potřebného času k regeneraci se zpravidla používají čtyři, šest nebo devět kolon pracujících paralelně. Výhodou této technologie jsou nízká spotřeba energie a nízká úroveň emisí. Mezi nevýhody technologie patří vyšší investiční náklady, složitá obsluha, nutnost odstranit  $\text{H}_2\text{S}$  před vstupem do technologie a nižší produkce  $\text{CH}_4$  než u fyzikální absorpce [3], [6], [16], [17].



Obr. 3 Zjednodušené schéma procesu PSA s vakuovou desorpcí [19]

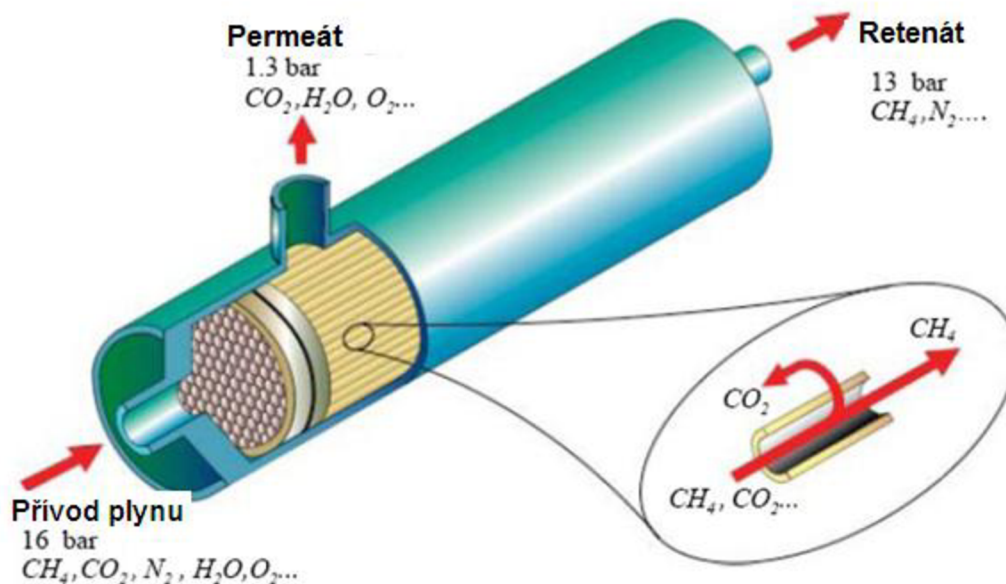
### 4. 3. Membránová separace

Membránová separace využívá rozdílné průchodnosti jednotlivých složek ve směsi bioplynu tenkou membránou (viz. obr. 4). Většinou pracuje při tlacích od 25 do 40 barů, do teplot maximálně 70 °C. Pro tyto procesy se používají tři typy membrán: spirální balená, válcová, dutá vlákna. Obvykle jsou membrány v podobě dutého vlákna v jednom svazku. Materiálem pro konstrukci membrán jsou nejčastěji využívány polymery. Je nutné zabránit přístupu tuhých látek na membránu. Předtím než plyn vstoupí na duté vlákno, projde přes filtr, který zachytí vodu, olejové kapky a aerosoly, které by mohly negativně ovlivnit výkon membrány. Kromě toho je sulfan odstraněn čištěním přes aktivované uhlí před membránou. Skrze membránu prochází snáze  $\text{CO}_2$  (a též  $\text{H}_2\text{S}$  a vodní pára) jako tzv. permeát, zatímco většina metanu zůstává před membránou a odchází na tlakové straně jako tzv. retenát. V závislosti na membráně, lze odstranit z bioplynu i  $\text{H}_2\text{S}$ , pak není nutné bioplyn čistit před nebo po čištění. Podíl metanu v retenátu závisí na použitém materiálu membrány, jejím stáří a také tlakové úrovni. Dociluje se až 97-98 % obsahu  $\text{CH}_4$  ve výsledném plynu, avšak přibližně 22-28 % metanu se ztratí v odplyně. Metoda není vhodná pro bioplyn s mnoha nedefinovanými nečistotami, jako je skládkový plyn nebo bioplyn z ČOV. Vyšší míru čištění (a menších ztrát metanu) umožňuje dvoustupňová separace [3], [6], [17], [20].

Existují dva základní systémy čištění plynu na membránách. Vysokotlaké oddělení plynné fáze na obou stranách membrány a nízkotlaká absorpce kapalina-plyn [8].

Výhodou této technologie jsou relativně nízké náklady na primární čištění bez použití chemikálií. Tato technologie také způsobuje nízké mechanické opotřebení. Nevýhodou jsou požadavky na vysoký vstupní tlak, vysoké náklady na předčištění bioplynu od  $\text{H}_2\text{S}$  a  $\text{H}_2\text{O}$  a nutnost pravidelně vyměňovat membrány za provozu [16], [21].

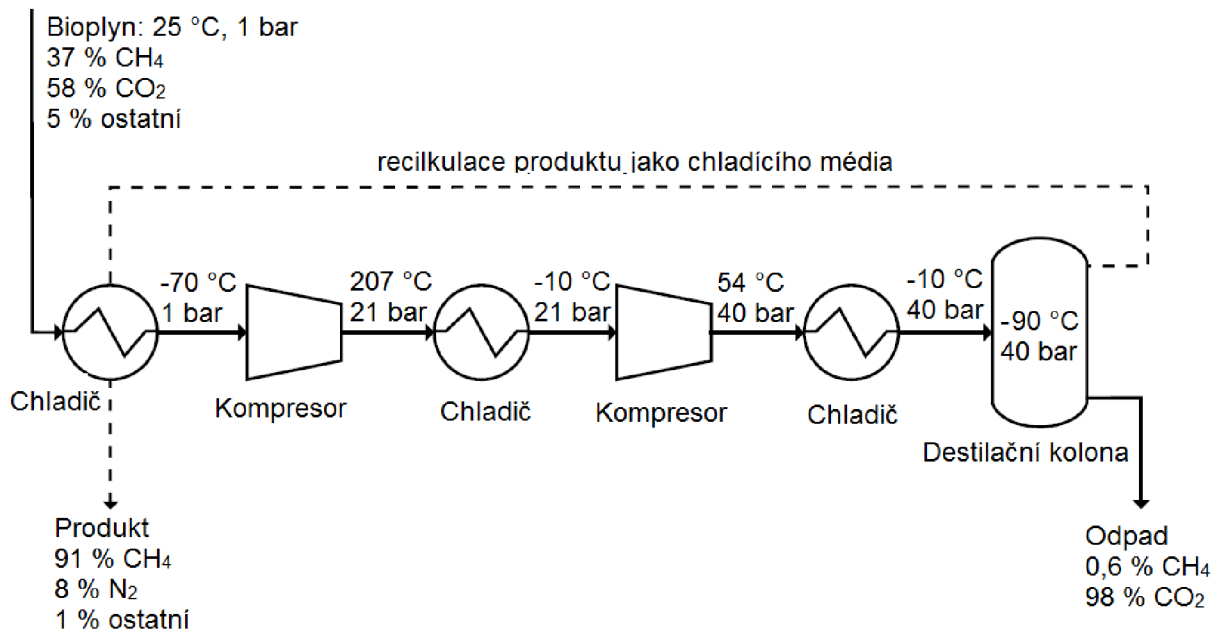




Obr. 4 Schéma membránové separace [20]

#### 4. 4. Kryogenní separace

Oxid uhličitý a metan mají dosti rozdílné teploty varu ( $\text{CO}_2$   $-78,5$  °C a  $\text{CH}_4$   $-161$  °C). Tého skutečnosti lze tak využít kryogenní cestou. Tato technologie je založena na kondenzaci  $\text{CO}_2$  při nižší tlaku a vyšší teplotě než metan. Bioplyn je stlačen a ochlazen na velmi nízkou teplotu (min.  $-80$  °C). Tím se dosáhne kondenzace  $\text{CO}_2$  případně další nežádoucích složek, které tak mohou být odděleny od bioplynu v kapalně fázi. Vhodné je odstraňovat  $\text{H}_2\text{S}$  a vodu před vstupem do technologie, aby se předešlo zamrznání a ucpávání systému. Výhodou tohoto postupu je možnost produkce velkého množství plynu a velmi vysoké čistoty (více než 99 %  $\text{CH}_4$ ) a také možnost dále zhodnotit zkapalněný  $\text{CO}_2$ . Při ještě nižších teplotách pak může být zkapalněn i biometan, čímž se pak může stát náhradou za LPG. Další výhodou je, že proces nevyužívá žádných chemikálií. Kryogenní procesy vyžadují použití mnoha přístrojů a zařízení, které jsou náročné na údržbu. Zejména kompresory, turbíny, výměníky tepla, izolace a destilační kolony. Nasazení této technologie tak nedoznalo v oblasti čištění bioplynu komerčního uplatnění, zejména z důvodu vysoké finanční a energetické náročnosti k dosažení kryogenní teploty. Ekonomická je teprve při vyšších průtocích bioplynu [3], [11], [15], [17].



Obr. 5 Princip kryogenní separace [22]

#### 4. 5. Srovnání metod úpravy bioplynu

Vzhledem k nárokům na kvalitu plynu je potřeba čistit bioplyn bezpečným, stabilním a ekonomicky výhodným procesem pro odstranění CO<sub>2</sub> a ostatních nečistot. Posouzení jednotlivých procesů na úpravu bioplynu znázorňuje 0 a jejich hlavní data tab. 5.

| Proces                | Popis   | Výhody   | Nevýhody  |
|-----------------------|---|--|---|
| <b>Adsorpce</b>       | CO <sub>2</sub> , vyšší C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> , H <sub>2</sub> S, SI-, FI-, Cl- složky, zapáchající, mohou být odstraněny aktivovaným uhlím/ uhlíková molekulová síta | <ul style="list-style-type: none"> <li>- vysoká kvalita plynu</li> <li>- suchý proces</li> <li>- žádné chemikálie</li> <li>- žádná odpadní voda</li> <li>- částečné odstranění N<sub>2</sub> a O<sub>2</sub></li> <li>- žádné bakteriální znečištění odpadního plynu</li> <li>- ověřená technologie</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- předčištění H<sub>2</sub>S</li> <li>- úroveň CH<sub>4</sub> není stabilní</li> <li>- složitý proces</li> <li>- vyšší investiční náklady</li> </ul> |
| <b>Vypírání plynu</b> | CO <sub>2</sub> a H <sub>2</sub> S jsou absorbovány vypíracími prostředky (např. voda, aminy, glykol etany, atd.)   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- vysoká kvalita plynu</li> <li>- zajímavé investiční náklady</li> <li>- není třeba žádné předčištění</li> <li>- kompaktní proces</li> <li>- ověřená technologie</li> <li>- je možné znovu použít CO<sub>2</sub></li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- likvidace odpadní vody</li> <li>- vysoká spotřeba vody</li> </ul>  |

|                                    |   |  |   |
|------------------------------------|---|--|---|
| <b>Membránový proces</b>           | Oddělení CO <sub>2</sub> důsledkem různé propustnosti na membráně                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- suchý proces</li> <li>- žádné chemikálie</li> <li>- nízké mechanické opotřebení</li> <li>- kompaktní proces</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- potřeba předčištění</li> <li>- nízké znovuzískání metanu</li> <li>- vysoké investiční náklady</li> <li>- vysoká spotřeba energie</li> <li>- nestabilní dlouhodobé chování</li> <li>- stále málo garancí</li> </ul> |
| <b>Zkapalňování CO<sub>2</sub></b> | CO <sub>2</sub> je zkapalňováno vysokým tlakem a nízkou teplotou a odděleno rektifikací | <ul style="list-style-type: none"> <li>- vysoká kvalita plynu</li> <li>- žádné chemikálie</li> <li>- žádná voda</li> <li>- kompaktní proces</li> <li>- možnost znovu využití CO<sub>2</sub></li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- potřeba předčištění</li> <li>- velmi vysoká spotřeba energie</li> <li>- vysoké investiční náklady</li> <li>- složitý proces</li> </ul>   |

Tab. 5. Srovnání jednotlivých procesů [23]

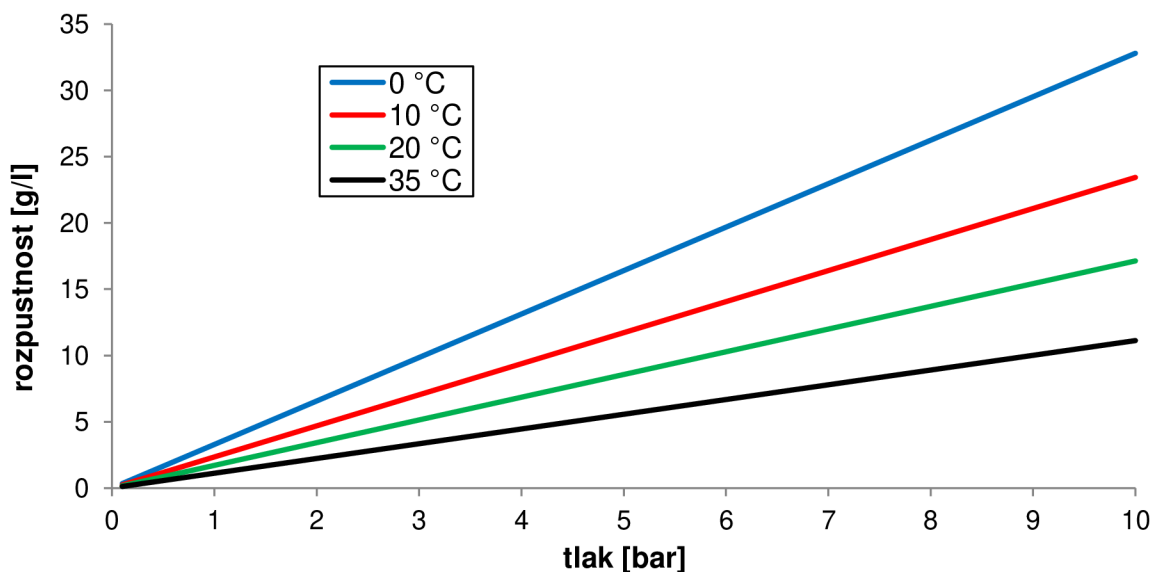
| Princip                    | Název                                 | Typ regenerace                 | Předčištění                  | Pracovní tlak [bar] | Ztráty metanu [%] |
|----------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|------------------------------|---------------------|-------------------|
| <b>Adsorpce</b>            | PSA (Adsorpce na molekulových sítích) | snížení tlaku                  | vodní pára, H <sub>2</sub> S | 4 – 7               | 2                 |
| <b>Absorpce</b>            | Mokrý vypírka                         | žádná nebo stripování vzduchem | žádné                        | 7 – 10              | < 2               |
|                            | Polyetylen glykol                     | stripování vzduchem            | vodní pára, H <sub>2</sub> S | 7-10                | < 2               |
|                            | Mono etanol amin MEA                  | teplo                          | H <sub>2</sub> S             | atmosf.             | < 0,1             |
| <b>Membránová separace</b> |                                       |                                | vodní pára, H <sub>2</sub> S | 8 – 10              | >10               |

Tab. 6. Hlavní data jednotlivých procesů úpravy bioplynu [23]

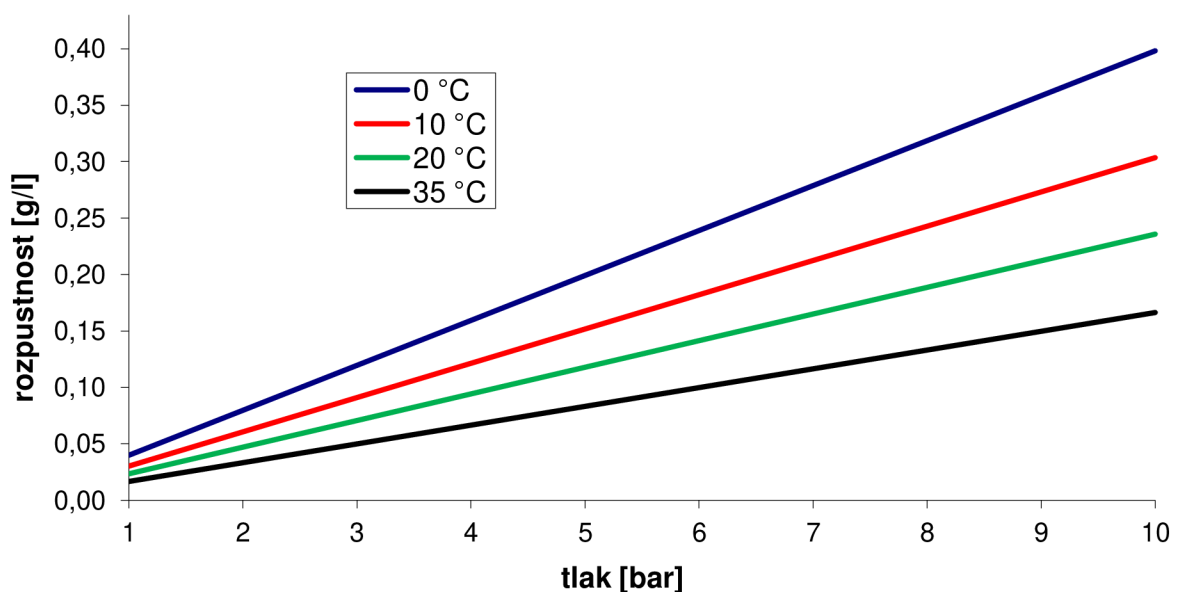
## 5. VODNÍ VYPÍRKA

V diplomové práci byla zvolena jedna z nejvíce v praxi používaných metod čištění bioplynu na kvalitu zemního plynu, a proto bude popsána podrobněji. Jedná se o fyzikální absorpci, kde je použita jako rozpouštědlo voda.

Technologie využívá odlišné rozpustnosti nežádoucích složek bioplynu, které jsou více rozpustné ve vodě než metan. Jedná se především o  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CO}_2$ . Vodní vypírka pracuje lépe za vyššího tlaku, než je atmosférický. Hlavní výhodou je, že se za vyššího tlaku zvyšuje rozpustnost  $\text{CO}_2$  (obr. 6 a obr. 7) a to má za následek nižší požadavek na množství vody. Například při tlaku 1 bar a teplotě  $25\text{ }^\circ\text{C}$  má  $\text{CO}_2$  25-krát větší rozpustnost než metan,  $\text{H}_2\text{S}$  téměř 80-krát [8], [11], [17].



Obr. 6 Vliv tlaku na rozpustnost  $\text{CO}_2$  ve vodě (PŘÍLOHA 1)



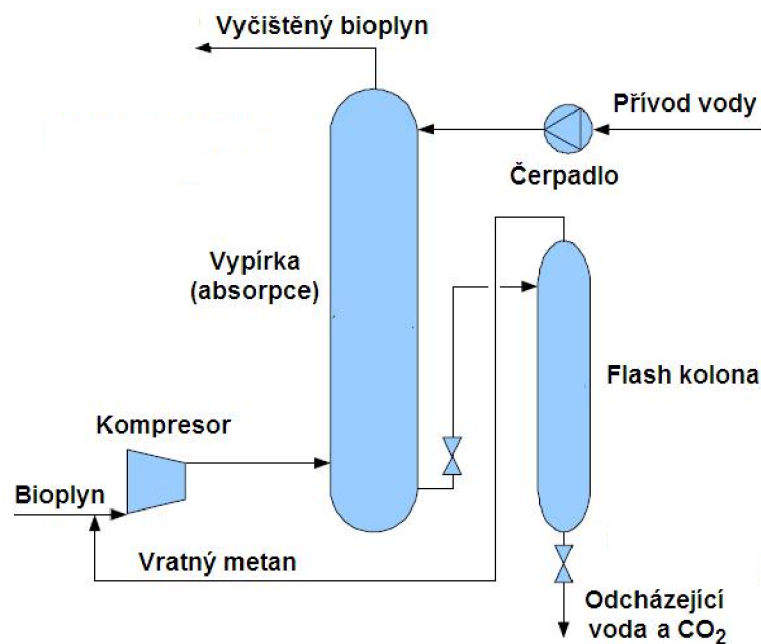
Obr. 7 Vliv tlaku na rozpustnost  $\text{CH}_4$  ve vodě (PŘÍLOHA 1)



Pokud je podíl síry v surovém bioplynu nižší než 300 ppm, nepředstavuje to žádný problém a odsiřovací zařízení se před vstupem do technologie nepoužívá. Nad tuto koncentraci je ale nezbytné, protože může ucpávat potrubí v regeneračních systémech a produkuje emise oxidů síry. Obvykle je plyn v absorberu s pracovní teplotou 20-25 °C stlačen na tlak 8-10 bar a přiváděn na dno kolony. Voda je přiváděna z vrchu kolony. Absorpce je tedy provozována protiproudě. Ve vypírce je oxid uhličitý rozpouštěn ve vodě, dokud nevzroste koncentrace metanu v plynné fázi. Pro zajištění většího povrchového kontaktu plyn-kapalina, je kolona naplněna výplňovým materiálem [8], [11], [17], [22].

V jednostupňovém čištění je prací voda použita pouze jednou (obr. 8). Výhodou tohoto typu je, že voda vstupující do absorpční kolony není znečištěna  $H_2S$  a  $CO_2$  a celkové množství  $CO_2$  a  $H_2S$  odcházející ze zařízení je tak na svém maximu. Nevýhodou této metody je, že vyžaduje velké množství vody. Cenově nejvýhodnější je používat například vodu z čistírny odpadních vod. U technologií pracujících na ČOV se používá vyčištěná voda z čistírny, která se pak i se zachyceným  $CO_2$  vypouští do vodoteče. Úprava bioplynu je tak levnější [17], [22].

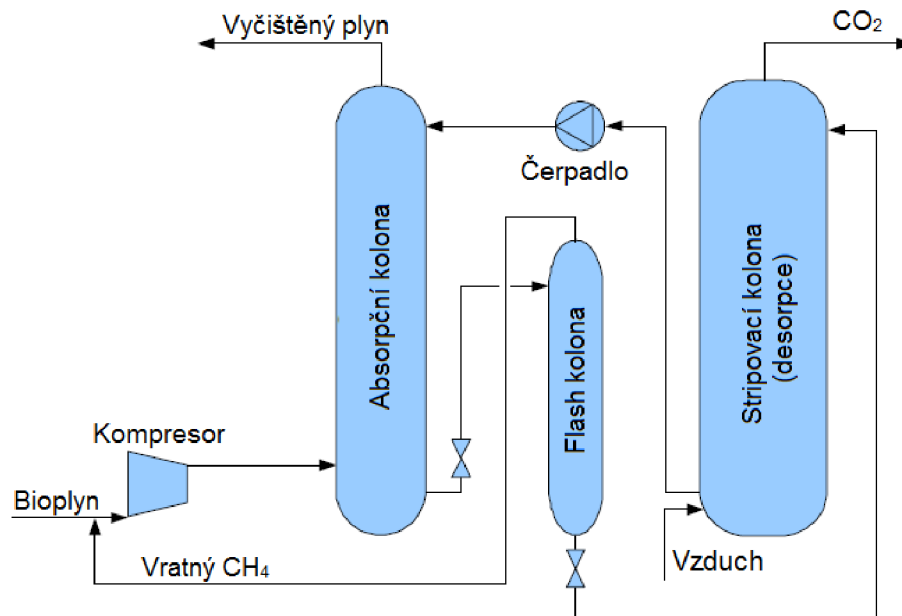
Z důvodu růstu bakterií v potrubí a kolonách způsobuje voda z ČOV problémy. Z tohoto důvodu je nutné čištění. Čištění se může provádět i několikrát ročně. Kolony se čistí čistícími prostředky nebo se médium vypustí a kolona se čistí externě [11].



Obr. 8 Schéma jednostupňové vodní vypírky [11]

Vodní vypírka vyžaduje velké množství vody. Například vypírka s regenerací, která vypírá  $330 \text{ Nm}^3/\text{h}$  bioplynu, vyžaduje kolem  $1500 \text{ l/h}$  vody. Protože voda je příliš drahá a vláda by mohla mít námitky proti použití takového množství vody v procesech bez regeneračního vypírání, je kladen větší důraz na regenerační absorpci (obr. 9) v druhém stupni. Zde je voda recyklována ve stripovací koloně (desorpce), kde se setkává s proudem vzduchu, do kterého se oxid uhličitý za tlaku 2 bar uvolní (aplikace vakua nebo vyšší teploty by usnadnila proces desorpce). Regenerovaná voda je pak recyklována zpět do absorpční kolony. Předtím než se voda recykluje zpět do absorpční kolony, je chlazená, aby se dosáhlo velkého rozdílu rozpustnosti mezi metanem a  $CO_2$  ( $CO_2$  je více rozpustné ve studené vodě). Stripování vzduchem není doporučeno, když je vysoká hladina sulfanu, protože voda by byla brzy kontaminována elementární sírou, která způsobuje provozní problémy. Hlavní výhodou této

metody je, že celkové množství požadované vody je mnohem nižší v porovnání s jednostupňovou vypírkou. Aby se zabránilo zápachu a zbytkovému  $H_2S$  při odchodu plynu z desorpční kolony, instaluje se zde bio-filtr. Vodní vypírka je nejběžnější metodou úpravy a zařízení jsou komerčně dostupná od několika dodavatelů v širokém rozsahu kapacit. V plynu upraveného z bioplynu touto metodou je asi 97 % metanu. Po poklesu tlaku se uvolňuje metan, který společně s vodou odchází z absorpční kolony. Způsobené ztráty činí 4-10 % metanu [3], [8], [5], [11], [17], [22].



**Obr. 9 Schéma dvoustupňového vypírání  $CO_2$  z bioplynu vodní vypírkou [19]**

Velmi důležité pro návrh vodní vypírky je stanovení, kolik  $H_2S$  a  $CO_2$  může být odstraněno. V porovnání s ostatními technologiemi se vodní vypírka jeví jako nejjednodušší způsob čištění bioplynu, protože vyžaduje v podstatě pouze vodu a absorpční kolonu. Jsou schopny pracovat za vysoké teploty a vlhkosti a dokážou odstranit nejen nežádoucí plyny, ale také částice a neutralizovat žíravé plyny [22].

Nevýhodou je, že při čištění vodní vypírkou se do bioplynu přidává voda, což zvyšuje náklady na jeho sušení. Únik oleje z kompresorů může také způsobovat ucpávání výplně kolony [11].

## 6. LEGISLATIVA

Veškerá produkce bioplynu v ČR je spotřebováána pro energetické účely v místě vzniku na výrobu tepla a elektrické energie převážně v kogeneračních jednotkách, které obvykle pracují s celkovou účinností až 80 %, přičemž 38 % tvoří elektrická energie a 42 % tepelná energie. Takovéto využití bioplynu v místě produkce je osvědčené a nevyžaduje odstraňování CO<sub>2</sub> a dalších nežádoucích složek a je silně podporováno dotačními programy či povinným výkupem elektrické energie. Nicméně nadměrné ztráty odpadního tepla zhoršují celkovou energetickou bilanci procesu. Efektivnějším způsobem využití bioplynu je jeho úprava na plyn srovnatelný kvalitou a čistotou se zemním plynem, na tzv. biometan, který lze použít srovnatelně jako zemní plyn. Na vyčištění bioplynu se spotřebuje 5 – 8 % energie obsažené v bioplynu v závislosti na použité metodě. Výhodou je např. skladovatelnost tohoto nosiče energie oproti elektřině a teplu. Biometan lze použít pro všechny aplikace určené pro zemní plyn. Ne všechny plynové spotřebiče vyžadují stejné normy pro plyn. Značný rozdíl je mezi požadavky na stacionární aplikace bioplynu jako paliva nebo potrubní kvalitu. V České republice velmi pozitivně přispívá hustá síť plynovodů, kterou je možné využít pro přepravu a distribuci vyrobených paliv. Jedny z nejvýznamnějších bariér pro vtláčení biometanu do plynovodní sítě jsou však nedostatečné ekonomické a technické podmínky výkupu biometanu z provozu bioplynových stanic. Využití bioplynu v dopravě také závisí ve značné míře na rozvoji zemního plynu v dopravě, především na vybudování sítě čerpacích stanic pro CNG. Prozatím v ČR není k dispozici funkční zařízení pro čištění bioplynu na kvalitu zemního plynu. V řadě evropských zemí se v současnosti rozbíhají projekty, jejichž cílem je připravit technické a legislativní podmínky pro vyskladňování bioplynu a alternativních paliv do stávající plynovodní sítě. Značný náskok v této oblasti má již několik evropských zemí (např. Švýcarsko, Německo), ve kterých již v současnosti funguje řada bioplynových stanic, které dodávají plyn do nízkotlaké rozvodné sítě. [8], [24], [25].

### 6. 1. Biometan jako palivo

Snahy zvýšit podíl obnovitelných zdrojů energie na celkové energetické bilanci se objevují především v oblasti motorových paliv. Tato snaha se promítla zejména do dvou směrnic 2009/28/ES a 2003/96/ES přijatých Evropskou komisí. Směrnice 2009/28/EC o podpoře využívání biopaliv a jiných paliv z obnovitelných zdrojů pro dopravu stanovuje cíl nahradit 10 % konvenčních paliv v dopravě alternativními palivy do roku 2020. Biometan pro přímé použití v motorových vozidlech definuje norma ČSN 65 6514, která je obdobou švédského standardu SS 15 54 38. Tato norma uvádí dvě označení pro bioplyn a to bioplyn typu LH s obsahem metanu 96-98 % a bioplyn typu H s obsahem metanu 95-99 % [2], [8].

### 6. 2. Biometan vtláčený do plynárenské sítě

Legislativní požadavky pro připojení výrobního plynu jsou uvedeny ve vyhlášce č. 62/2011 Sb., Práva a povinnosti výrobce plynu jsou stanoveny v “energetickém zákoně” č. 458/2000 Sb. (ve znění pozdějších předpisů) a pravidly pro měření plynu se zabývá vyhláška č. 108/2011 Sb. Základní technické požadavky jsou uvedeny v oborových dokumentech Českého plynárenského svazu a technickém požadavku vydaném RWE DSO [26]:

**Technická pravidla TPG 902 02 – „Jakost a zkoušení plyných paliv s vysokým obsahem metanu“** [26].

**TPG 902 02 změna 1** – požadavky na složení a vlastnosti vtláčeného biometanu [26].

**Technická doporučení TDG 983 01** – „Vtláčení bioplynu do plynárenských sítí. Požadavky na kvalitu měření” stanovují technické požadavky pro projektování, stavbu, montáž, zkoušení a uvádění do provozu, provoz a údržbu zařízení pro vtláčení biometanu do plynárenských sítí [26].

**Technický požadavek DSO\_TX\_B03\_071** – „Technické podmínky vtláčení biometanu do distribuční soustavy a připojování bioplynových stanic” stanovuje technické podmínky vtláčení biometanu do distribuční soustavy [26].

### 6. 3. Aktuální situace v ČR

V roce 2002 bylo v ČR okolo 15 bioplynových stanic s instalovaným výkonem 5,07 MW. Momentálně je u nás již 236 bioplynových elektráren s instalovaným výkonem 224,17 MW (zdroj CzBA). Aktuální podíl bioplynu na obnovitelný zdroj energie (OZE) je dnes 10,8%. Podle Směrnice 2009/28/ES o podpoře využívání energie z OZE, musí ČR do roku 2020 dosáhnout 13% podílu energie z OZE na hrubé konečné spotřebě. Národní akční plán pro biomasu předpokládá, že v roce 2020 bude v ČR až 742 bioplynových stanic. Tento obrovský nárůst za posledních pár let byl způsoben především platností zákona č. 180/2005 Sb., o podpoře výroby elektřiny z OZE, kde je uvedena záruka výkupu elektrické energie s garancí cen na 15 let a zelené bonusy, resp. příplatek za environmentálně šetrnou výrobu elektrické energie. V souvislosti s rozvojem bioplynových stanic v poslední době odborníci také často poukazují na to, že by v této oblasti mohly nastat stejné problémy jako u solárních elektráren. Vysoké dotace pro sluneční zdroje se výrazně promítly do cen energie. Nekontrolovaný růst počtu bioplynových stanic, jak tomu bylo u solárních elektráren, však nehrozí. Jejich budování je totiž závislé na provozování zemědělské výroby [27], [28].

Senát Parlamentu ČR schválil dne 11. 1. 2012 zákon o podporovaných zdrojích energie, který přináší řadu pozitivních změn. Dnešní situace, kdy kombinací jediné výkupní ceny elektřiny z výroben spalujících bioplyn a nižších měrných investic jsou budovány převážně větší stanice, které po velkou většinu roku produkují více tepla, než samy spotřebují, není udržitelná. Na tento negativní vývoj podpora biometanu reaguje, jelikož technologie úpravy bioplynu na biometan a jeho dodávka do sítí zemního plynu zajistí, že se ze stejného množství surovin vyrobí přinejmenším 1,5 až 2 krát více efektivní energie při nižších nákladech, než při zbudování klasické bioplynové stanice jen s malým využitím tepla [29], [30].

Novinkou je od roku 2013 podpora výroby biometanu vtláčeného do distribuční nebo přepravní soustavy. Zelený bonus na biometan stanoví Energetický regulační úřad (ERÚ) v maximální výši 1700 Kč/MWh spalného tepla [29], [30].

## 7. NÁVRH TECHNOLOGIE MOKRÉ VYPÍRKY

### 7. 1. Popis technologie

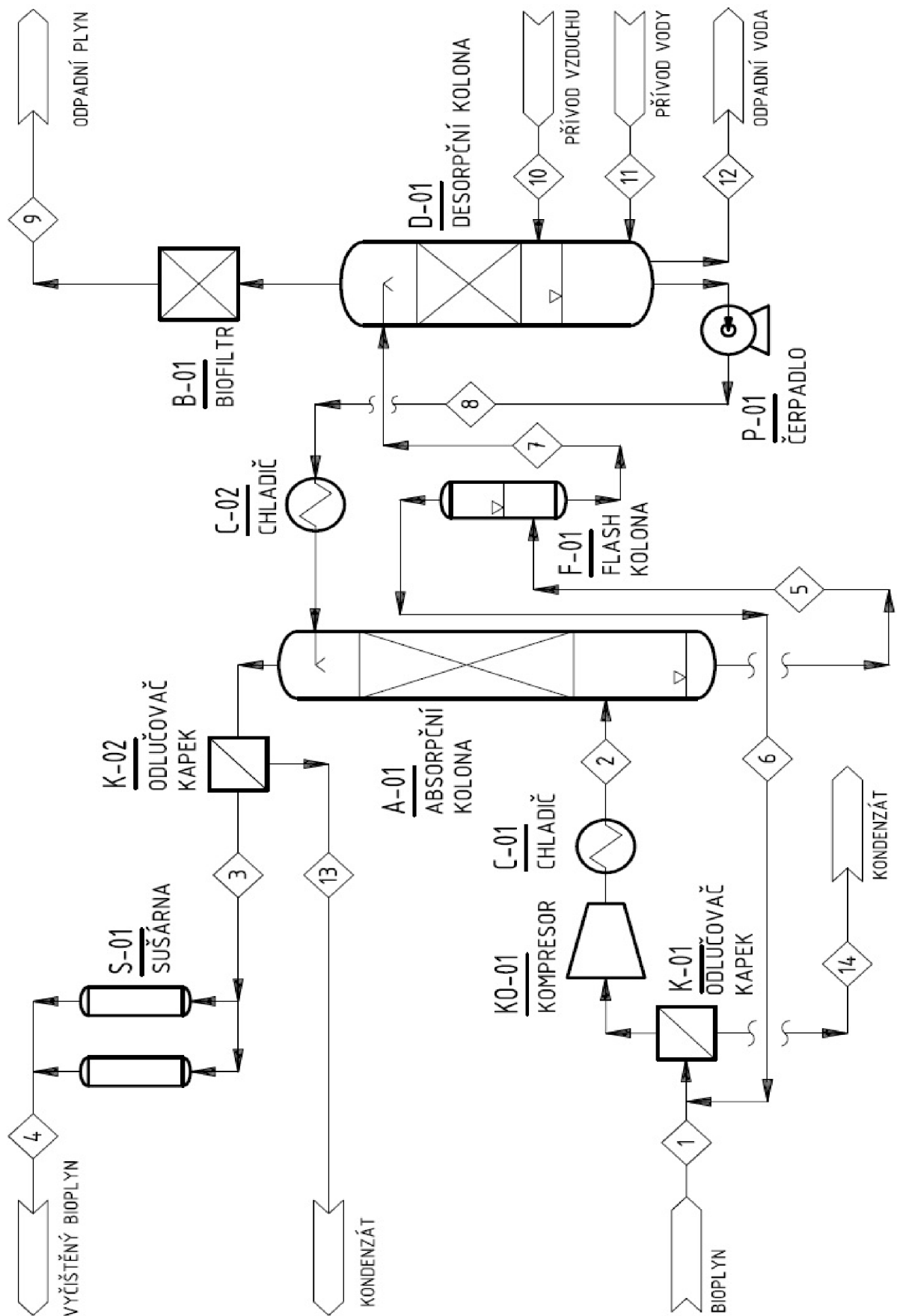
Před vstupem do systému čištění musí surový bioplyn (**proud č. 1**) projít odlučovačem kapek **O-01**, kde dojde k odloučení kondenzátu z bioplynu, aby se zabránilo poškození mechanických zařízení. Bioplyn je pak stlačen pomocí lamelového kompresoru **KO-01** na 9 barů. Při stlačení se zvýší teplota plynu, které je v technologii dále využito. K zajištění dobré rozpustnosti nežádoucích plynů musí být bioplyn chlazen pomocí chladiče **C-01**. Takto připravený bioplyn je přiveden **proudem č. 2** do dolní části absorpční kolony **A-01**, kde sypaným ložem vytvořeným z náplňových tělísek postupuje vzhůru. Protiproudě se setkává s tlakovou vodou o teplotě 10 °C přiváděnou **proudem č. 8** na vršek kolony. Střední pracovní teplota v koloně je 20 °C. V absorpční koloně je bioplyn zbavován všech nežádoucích složek, především CO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>S. Vyčištěný bioplyn (biometan) pak odchází **proudem č. 3** přes odlučovač kapek **O-02** (odstranění únosu kapek z absorpční kolony) do adsorpční sušárny **S-01**, kde je pomocí sušicího média zbaven zbytkové vlhkosti. **Proudem č. 4** upravený bioplyn na kvalitu zemního plynu odchází k dalšímu využití.

Znečištěná voda obsahující rozpuštěné plyny, ale také malé množství metanu, je dnem absorpční kolony (**proud č. 5**) přiváděna do flash kolony **F-01**. Zde dojde k uvolnění tlaku na 2-4 bary a částečnému odplynění. Aby se co nejvíce zabránilo ztrátám metanu, je uvolněný plyn přiváděn zpět do přívodu surového bioplynu (**proud č. 6**). Celkové ztráty metanu v systému tak činí okolo 2 %.

Voda je pak ze spodu flash kolony odváděna **proudem č. 7** na vršek desorpční kolony **D-01**. V ní se protiproudě setkává s proudem vzduchu, který je přiváděn ze spodu desorpční kolony **proudem č. 10**. Většina CO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>S odchází spolu s čistícím vzduchem (**proud č. 9**) vrchem z desorpční kolony. Aby bylo vyhověno předpisům pro emise H<sub>2</sub>S prochází tento proud biofiltrem **B-01** a vyčištěný plyn je pak vypouštěn do atmosféry.

Vyčištěná voda je čerpána pomocí čerpadla **P-01** zpět do absorpční kolony (**proud č. 8**) a znovu použita k čištění. Aby bylo opět dosaženo co největší rozpustnosti nežádoucích plynů je před vstupem chlazená pomocí chladiče **C-02**. **Proud č. 11** slouží k doplnění ztrát vody v technologii. **Proudem č. 12** je odváděna odpadní voda, která je dále využita v biofiltru. **Proud č. 13** a **14** slouží k odvodu kondenzátu z odlučovačů kapek **O-01** a **O-02**.





Obr. 10 PFD diagram procesu mokré vypírky

## 7. 2. Hlavní aparáty technologie

V této kapitole budou popsány hlavní aparáty technologie mokré vypírky. Podrobnější zobecněné technologické schéma procesu je uvedeno v příloze (PŘÍLOHA 4).

### 7.2.1. Odlučovač kapek

Surový bioplyn vyrobený anaerobní digescí je při odchodu z fermentoru teplý a nasycen vodou. Jak vstoupí do potrubí systému úpravy, dochází k ochlazení a z bioplynu se oddělují kapky vody. Tuto vodu je třeba odstranit, aby se ochránila mechanická zařízení před možným poškozením způsobené korozi nebo vodními rázy. Voda kondenzuje na stěnách nádoby nebo separační stěně a stéká na dno nádrže. Vypustit lze dnem manuálně přes kulový ventil nebo automaticky přes sifon. Jsou vyráběny z nerezové oceli pro nízké i vysoké tlaky. Při návrhu potrubních tras je nutné zvážit vhodné umístění nádob na odvod kondenzátu [31], [32].

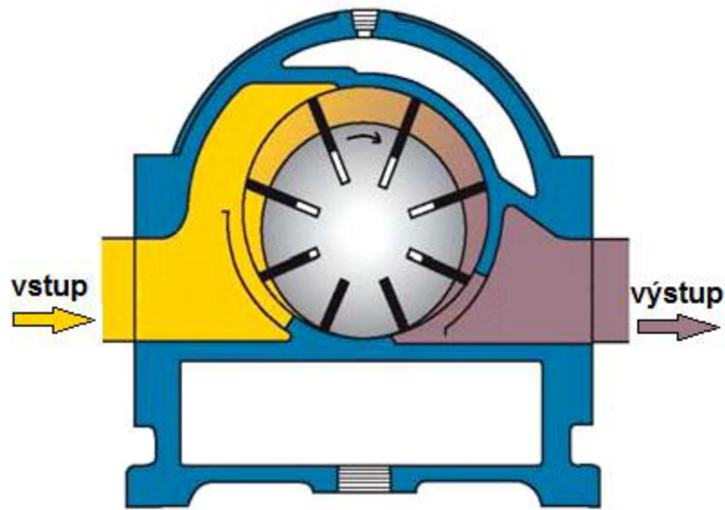


Obr. 11 Odlučovač kapek [31]

### 7.2.2. Kompresor

Aby bylo dosaženo co největší rozpustnosti  $\text{CO}_2$  a dalších nežádoucích složek ve vodě, je nutno bioplyn stlačit na požadovaných 9 barů (viz. obr. 7). Jedny s nejčastěji využívaných kompresorů jsou rotační lamelové kompresory.

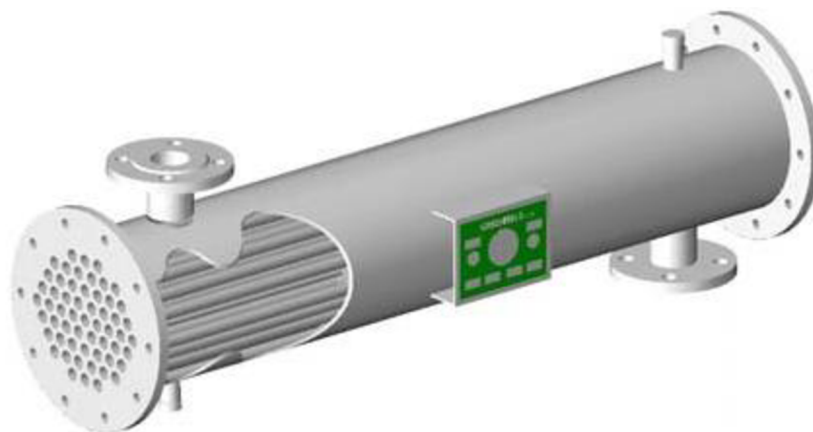
Principem lamelového kompresoru je zvyšování tlaku redukcí objemu (obr. 12). Kompresor se skládá elektromotoru, který roztáčí rotor uložený excentricky, aby se prostor mezi lamelami, statoru a rotorem mohl měnit během otáčení. Rotor má řadu radiálních drážek, které drží lopatky. Tyto lopatky se mohou volně pohybovat dovnitř a ven z drážek, ale vždy udržují pomocí odstředivé síly kontakt se stěnou válce. Tím se prostor od sacího otvoru až do dosažení první poloviny otáčky zvětšuje. Vznikne podtlak a kompresor nasává bioplyn. Dosažením druhé poloviny otáčky se prostor vlivem excentricity zmenšuje a stlačuje bioplyn až do dosažení výtlačného otvoru. Stlačený bioplyn je pak dopravován vně kompresoru výstupním otvorem. Výhodou tohoto kompresoru je jednoduchost zařízení, možnost bezolejového provedení při vyšších koncentracích  $\text{H}_2\text{S}$ , nízké nároky na údržbu a plynulost toku bioplynu bez rázů a pulsací [33], [34].



Obr. 12 Princip lamelového kompresoru [35]

### 7.2.3. Chlazení (bioplyn-voda)

Výměník tepla se svazkem trubek v plášti je navržen tak, že bioplyn proudí v trubkovém prostoru a chladicí médium (chladicí voda respektive chladicí směs voda-glykol) v mezitrubkovém prostoru. Podle asociace TEMA se jedná o výměník typu E. Aby se zabránilo korozi, jsou části s přímým kontaktem s bioplynem vyrobeny z nerezové oceli. Voda proudící do výměníku je chlazená pomocí chladiče [36].



Obr. 13 Výměník tepla voda-bioplyn [36]



### 7.2.4. Absorpční kolona

Absorpce je pohlcování plynu kapalinou. Nezbytnou podmínkou je rozpustnost plynu v kapalině, která jej absorbuje. Obvykle je plyn směsí, jejíž některé složky se v kapalině rozpouštějí a absorbují se, kdežto jiné jsou prakticky nerozpustné a chovají se inertně. Je-li koncentrace aktivní složky v plynu větší než koncentrace, jaká by byla v rovnováze s kapalinou, získává kapalina tuto složku na úkor plynu [37].

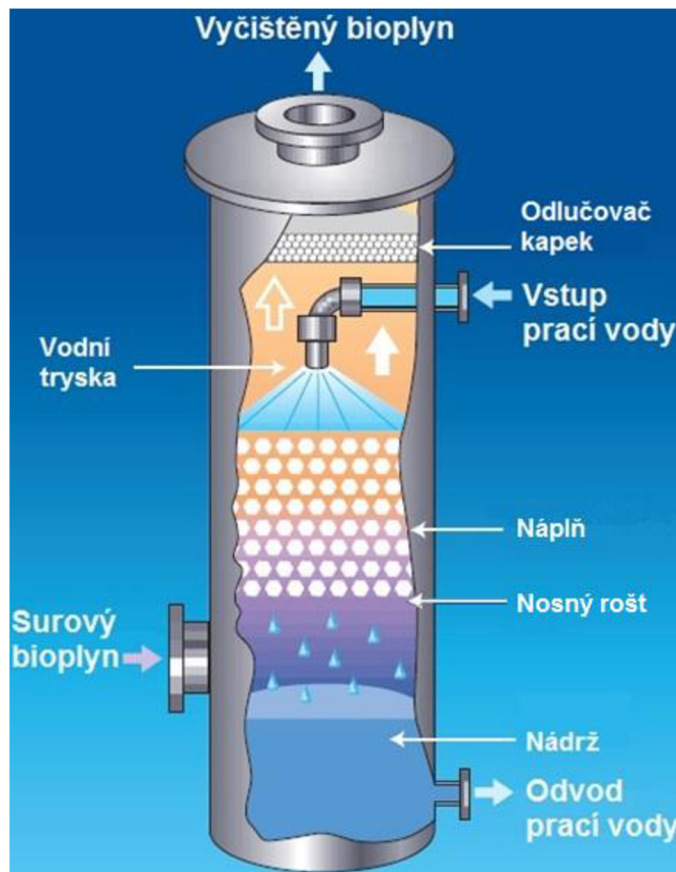
U absorpční kolony se jedná o dvoufázový tok dvou médií přes porézní přepážku. Ta obvykle vznikne vyplněním určitého objemu částicemi s definovaným objemem a povrchem. I když dojde ke vzájemným kontaktům mezi částicemi, existuje vždy určitá volná část objemu, který může být při průtoku tekutiny vyplněn spojitou fází. Přepážka představuje tedy určitou nehybnou vrstvu pevných částic. V průmyslové aplikaci slouží porézní přepážka k dosažení co největšího povrchu pevných částic (výplňová tělíska) v daném objemu. Částice, které tvoří porézní přepážku, se vytvářejí většinou uměle průmyslovým způsobem, aby se dosáhlo požadovaného účelu. Výplňová tělíska se postupně ustálila na určitých doporučovaných tvarech, pro které jejich výrobci uvádějí i potřebné geometrické charakteristiky. Nejznámější výplňová tělíska jsou znázorněna na obr. 14. Jako materiál se nejčastěji používají kamenina, porcelán, sklo, kov a plastické hmoty [38].



**Obr. 14** Příklady výplňových tělísek

V absorpční koloně kapalná fáze proudí shora dolů působením gravitační síly a plynná fáze je tlakovým spádem nucena proudit proti toku kapaliny. Smáčivá kapalina při průtoku přepážkou ulpívá na povrchu pevných částic, na kterých vytváří kapalinový film. Tím se zmenšuje volný průřez vrstvy. Plyn, který je nesmáčivý, neulpívá na povrchu pevných částic a volnými průduchy proudí protiproudě porézní přepážkou. Pokud je volný objem porézní přepážky zcela vyplněn kapalinou a plynná fáze nemá potřebný přetlak, který by kapalinu „vyfoukl“, pak kapalina může trvale zabránit průchodu plynu a dojde k nežádoucímu zahlcení. Nastane jednofázový tok kapaliny [38].

V průmyslové praxi se nejčastěji využívají náplňové a patrové kolony. Při volbě mezi těmito typy je třeba věnovat pozornost mnoha hlediskům. I přes některé nedostatky se pro čištění bioplynu zpravidla využívají náplňové kolony (obr. 15). Především z důvodu, že jsou levnější a tlaková ztráta je v nich menší než u patrových kolon. Práce je zaměřena především na návrh tohoto zařízení, proto budou dále jeho konstrukční prvky podrobněji popsány.



**Obr. 15 Náplňová absorpční kolona [39]**

#### 7.2.4.1. Náplň

Používá se rozmanitých náplní (obr. 14) a průměrů. V průmyslových zařízeních se však zřídka vyskytují kroužky průměru pod 15 mm. Při konstrukci aparátů s vysokou vrstvou náplně je třeba věnovat zvláštní pozornost mechanické pevnosti kroužků. Důležitým hlediskem je také chování materiálu při náhlých změnách teploty. Tělíska jsou buď volně sypaná (náhodné uspořádání), nebo skládaná (definované uspořádání). Kroužky nad 75 mm se téměř vždy ukládají pravidelně, jedna vrstva na druhou, a stavějí se svisle tak, aby se jejich vrstvy nekryly. Pravidelně skládané kroužky kladou menší odpor a lépe rozdělují smáčivou kapalinu. Je známo, že při vyšších výškách náplní kolon dochází k tvorbě kanálek, a to i tehdy, kdy horní část přepážky je rovnoměrně zatížena protékající kapalinou. Uvnitř přepážky mohou vzniknout kanálky náhodným spojením větších místních volných objemů a vytvořit tak cestu pro snadnější průtok kapaliny. Kapalina má také tendenci v důsledku větší mezerovitosti u stěn stékat po stěnách kolony. Teoretické odvození těchto problémů není prakticky možné a cesta vede přes konstrukční úpravy kolonové vestavby, jako je vytvoření sběrného a rozdělovacího patra (každá výplňová vrstva musí být umístěna na nosném roštu) [37], [38].

#### 7.2.4.2. Zkrápění

Velmi důležitým činitelem, který zásadně ovlivňuje správnou funkci absorbéru, je dobré zkrápění. Bohužel ani největší úsilí o rovnoměrné zkrápění nezaručuje zcela pravidelné rozdělení kapaliny po povrchu náplně. Aby se dosáhlo pokud možno rovnoměrného rozdělení kapaliny po celém průřezu kolony, používá se nejrozmanitějších zařízení (sprcha, síto, rozstříkovací talíře, atd.) [37].

Při velkém množství kapaliny se nejlépe osvědčuje sprcha, kde lze použít velkých otvorů a při jejich velkém počtu, takže nehrozí nebezpečí ucpání. V kolonách na tlakové vypírání CO<sub>2</sub>, z plynů se často setkáváme se sprchami, které mají otvory průměru 10 až 12 mm. Pokud kapalina vytéká z otvorů větší rychlostí, můžeme přiměřenou vypouklostí sprchy zaručit zkrápění značně velké plochy. Kolony do průměru 2 m i většího stačí vybavit jediným takovým zkrápěcím zařízením, umístěným v ose tělesa. Sprchy s malými otvory nejsou oblíbené a používá se jich pouze v případech, kdy je zaručeno, že se otvory nemohou ucpat a je k nim snadný přístup při čištění [37].

#### 7.2.4.3. Odlučovač kapek

Plyny odcházející z kolony strhují jemné kapičky kapaliny, vznikající převážně v prostoru mezi zkrápěcím zařízením a vrstvou náplně rozprašováním kapaliny. Obvykle je únos nežádoucí, a proto používáme zařízení na odlučování stržených kapiček. Může to být buď zvláštní odlučovač zařazený za kolonu (viz. obr. 10), nebo zařízení zamontované do kolony před výstupem plynu (obr. 15). Odlučovače pracují na principu náhlé změny směru nebo rychlosti proudícího plynu. Kolony jako jsou tlakové kolony CO<sub>2</sub>, jsou velmi zatížené jak plynem, tak kapalinou a pracují již na hranici zahlcení. Ty se opatřují přídatným odlučovačem ve formě prázdné nádrže větších rozměrů [37].

#### 7.2.4.4. Nosný rošt

Náplň kolon leží na nosném roštu. Kovové rošty bývají zhotoveny z pásů postavených na hranu. Pásky jsou určitým způsobem distancovány a podepřeny. Děrované desky se nedoporučují, protože jsou při větším průměru drahé a mají i menší průtočný průřez než rošty. Průtočný průřez nosné konstrukce by měl být menší než volný průřez náplně, aby se zabránilo zahlcení kolony v roštu. Všechny tyto pomocné vestavby kladou vždy odpor průtoku plynu a v některých případech mohou limitovat i průtočný průřez. Bez těchto zařízení však výplň nemůže plnit správně svou funkci a proto jsou její nedílnou součástí [38], [37].

#### 7.2.4.5. Plášť

O konstrukci pláště tak jednoduchého aparátu, jako je náplňová kolona, je třeba se zmínit jen u těžších tlakových aparátů. Kolony tohoto druhu podléhají předpisům pro pevnostní výpočet tlakových nádob stabilních. Přesto jsou v rámci těchto výpočtů určité úspory. Například u velmi vysokých kolon vede postupné zmenšování tloušťky stěny směrem vzhůru v souladu s klesajícím namáháním k významné úspoře materiálu. Zvláštní pozornost zasluhuje velikost dolní komory pod roštěm. U zařízení s recirkulací kapaliny, je nutné si uvědomit, že při zastavení čerpadla všechna kapalina zadržaná v náplni (10-15 % objemu) steče dolů. Vstup plynu musí být tak vysoko, aby se v tomto případě neocitl pod hladinou. Z toho vyplývá potřebná velikost dolní komory kolony [37].

### 7.2.5. Flash kolona

Flash kolona (expandér, odpařovací kolona) je z několika důvodů velmi důležitou součástí celého technického zařízení. Použitá recirkulační voda obsahuje rozpuštěné plyny, včetně malého množství metanu. Tlak vody je v ní snížen na 2-4 bary. Přitom se voda částečně odplyní a tento plyn je recirkulován zpět na vstup do technologie. Množství metanu, které je stále rozpuštěno ve vodě po opuštění flash kolony, způsobuje celkové ztráty v zařízení. Tyto ztráty musí být co nejnižší a jsou řízeny nastavením tlaku v koloně. Aby se uvolnilo maximální množství metanu z vody, mělo by se dosáhnout co nejnižšího tlaku ve flash koloně. Na druhé straně hnací silou pro dopravu vody v celém zařízení je tlak, a pokud je příliš nízký, není její doprava do desorpční kolony již možná. To má za následek pokles hladiny vody uvnitř stripovací kolony v důsledku pomalejší dopravy vody z flash kolony. Hladinoměr uvnitř desorpční kolony začne signalizovat nízkou hladinu vody a systém začne doplňovat vodu. To má za následek zaplavení a ukončení provozu z důvodu příliš vysokého množství vody uvnitř nádrží [23], [40].

### 7.2.6. Desorpční kolona

Desorpce dochází k odstranění plynů a těkavých látek z vody vhaněním jiného plynu. Stejně jako u absorpce se jedná o dvoufázový tok dvou médií rozdílných vlastností přes porézní přepážku tvořenou částicemi partikulární látky (viz. obr. 14). Když je obsah aktivní složky v plynu menší, než odpovídá rovnováze s kapalinou, bude tato složka přecházet z kapaliny do plynu. Desorpce je opakem absorpčního pochodu a využívají se při ní plyny jako vzduch (odvětrávání), vodní pára (propařování), dusík a kouřové plyny. Faktory ovlivňující desorpce je teplota kapaliny, tlak, rychlost přívodu plynu a doba kontaktu obou fází [37].

Voda je z flash kolony přiváděna do desorpční kolony (stripovací kolony) pro odstranění  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{S}$ . Jejich rozpustnost je závislá na teplotě a provozním tlaku. Zespod kolony je přiváděn vzduch, který se protiproudě setkává s vodou přiváděnou z vrchu kolony. Zředěný vzduch opouští vrchem desorpční kolonu s obsahem přibližně 30 % obj.  $\text{CO}_2$  a maximálně 0,1 % obj.  $\text{H}_2\text{S}$ . Takové množství síry nespĺňuje legislativní požadavky, proto musí být vzduch před vypuštěním do atmosféry čištěn. Recyklovaná voda je pomocí čerpadla čerpána a rozstřikována zpět do absorpční kolony. Aby byla hodnota pH vody v systému konstantní, je nezbytné přivádět neustále malý podíl čerstvé vody [35].

### 7.2.7. Sušárna

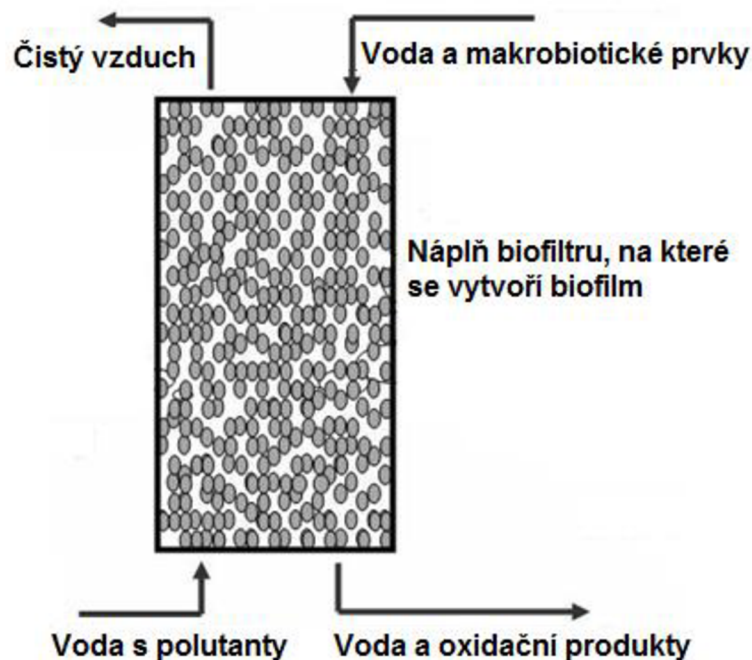
Adsorpční sušárna je instalována k odstranění vody z vyčištěného bioplynu. Je velmi účinná při dosahování nízkého rosného bodu. Sušárna se skládá ze dvou identických kolon pracujících střídavě. Každá z nich obsahuje lože s vysoušedlem, které umožňuje dosáhnout rosného bodu až do  $-80\text{ }^\circ\text{C}$ . Jako adsorpční činidla se používají silikagel, oxidy hliníku a molekulová síta. Tyto produkty jsou nabízeny ve formě granulí a kuliček. V procesu adsorpce prochází vlhký biometan filtrem, který zachytává vlhkost. Molekuly vody se zachytávají na specifickém povrchu vysoušedla, až do jeho nasycení. Poté se systém přepne do regenerace filtru. Proces je znám jako tepelná regenerace, kdy je 5-10 % vysušeného plynu přiváděno zpět do regenerované kolony. Před tím než je vysušený biometan přiveden do sušárny, zahřeje se ve výměníku tepla, který je ohříván bioplynem po kompresi. Zvýšení teploty umožní odstranění vlhkosti z vysoušedla. Regenerační tlak je přibližně 0,2 bar. Při tomto tlaku má biometan dobrou schopnost absorbovat vodu v absorpčním mediu. Ohřátý



regenerační plyn, který nyní obsahuje vlhkost je přiváděn zpět na vstup surového bioplynu [23], [41].

### 7.2.8. Biofiltr

Biofiltr je určen k čištění vzduchu a odpadní vody přicházejících z desorpční kolony pro odstranění zápachu a snížení koncentrace  $H_2S$  na požadované výstupní limity. Kromě biofiltrů s pevným ložem se pro některé druhy polutantů využívají náplňové biofiltry se zkrápěním, tzv. „trickling filtry“. Jde o válcovou nádobu vyplněnou inertními materiály (zeolit, umělohmotné prvky, aktivní uhlí, umělohmotné vestavby, apod.), které jsou nosným materiálem pro mikroorganismy. Odpadní voda je přiváděna z vrchu nádoby a znečištěný vzduch obsahující molekul organických polutantů a zápachových látek je přiváděn přes filtr paralelně nebo proti proudu vody (obr. 16). Ve filtru probíhá intenzivní míchání. Biofiltrace je založena na využití mikroorganismů, kdy na povrchu částic náplně nebo vestavby se v průběhu doby vytvoří biofilm, ve kterém probíhá biologický rozklad nebo transformace polutantů a zápachových látek. Biofilm je tvořen převážně bakteriemi, obsahuje však i nižší houby, prvoky a bezobratlé. Konečnými produkty při úplné oxidaci organických látek jsou oxid uhlíčitý, voda a mikrobiální biomasa. Odpadní plyn obsahuje okolo 0,1% obj.  $H_2S$  a asi 30 %  $CO_2$  [23], [42].



Obr. 16 Schéma náplňového biofiltru se zkrápěním [42]

## 8. NÁVRH ABSORPČNÍ KOLONY

### 8. 1. Složení bioplynu a vstupní podmínky

Absorpční kolona byla navrhována na typické složení bioplynu vyrobeného z biologického rozpadu organických látek za nepřítomnosti kyslíku. Složení bioplynu z anaerobní fermentace je uvedeno v tab. 7. Na základě přístupných dat a provozních zkušeností byla z literatury získána a zvolena vstupní data pro konkrétní absorpční kolonu.

| Složka                | Označení         | Obsah       | Zvoleno |
|-----------------------|------------------|-------------|---------|
| Metan                 | CH <sub>4</sub>  | 50-80 %     | 64,1 %  |
| Oxid uhličitý         | CO <sub>2</sub>  | 20-50 %     | 34,5 %  |
| Amoniak               | NH <sub>3</sub>  | 0-300 ppm   | -       |
| Sulfan                | H <sub>2</sub> S | 50-5000 ppm | 0,05 %  |
| Dusík                 | N <sub>2</sub> * | 1-4 %       | 0,95    |
| Kyslík                | O <sub>2</sub> * | < 1 %       | 0,4     |
| Vodní pára (nasycená) | H <sub>2</sub> O | 2-5 %       | -       |

Tab. 7. Typické složení bioplynu [11]

Při výpočtu uvažujeme bioplyn jako směs pouze dvou majoritních složek CO<sub>2</sub> a CH<sub>4</sub>, které tvoří přibližně 98 % bioplynu. Dalším předpokladem je, že směs uvažujeme jako ideální plyn. Rovnovážný tlak CO<sub>2</sub> nad roztokem je tedy nulový a veškerý CO<sub>2</sub> se absorbuje do kapaliny (tab. 8).

| Zadané hodnoty                        |   | Zvolené hodnoty                              |                                   |
|---------------------------------------|---|--|-----------------------------------|
| objemový průtok bioplynu              | $\dot{V}_{BP} = 1000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ | koncentrace CO <sub>2</sub> na výstupu       | $y_{NA} = 2 \text{ \% obj.}$      |
| koncentrace CO <sub>2</sub> na vstupu | $y_{DA} = 36 \text{ \% obj.}$               | koncentrace CO <sub>2</sub> ve vypírací vodě | $x_{NA} = 25 \text{ g/ml}$        |
| teplota bioplynu na vstupu            | $T = 36 \text{ }^\circ\text{C}$             | teplota vody na vstupu                       | $T_1 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| střední teplota v absorpční koloně    | $T_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$           |  |                                   |
| tlak bioplynu na vstupu do kolony     | $P = 9 \text{ bar}$                         |  |                                   |
| <b>Pall kroužky</b>                   |   | 50x50x5                                      | $\epsilon = 0,785$                |
|                                       |   | specifický povrch tělísek                    | $a = 100 \text{ m}^2/\text{m}^3$  |

Vysvětlivky: D...dole  
B ... CH<sub>4</sub>

N...nahore  
A...CO<sub>2</sub>

BP...bioplyn  
C.... H<sub>2</sub>O

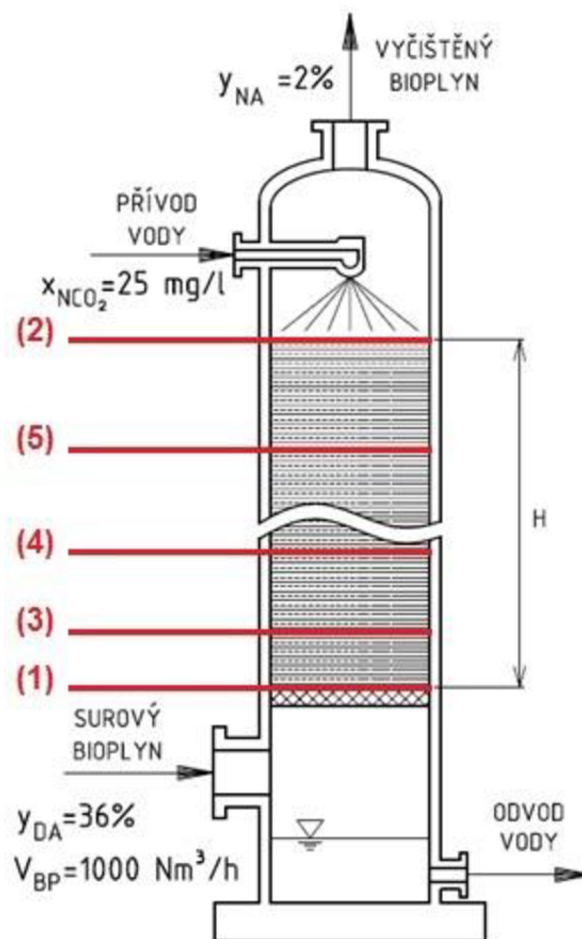
Tab. 8. Vstupní data

\* Přítomen pouze pokud je do fermentoru vstřikován vzduch k redukci H<sub>2</sub>S [11].

## 8. 2. Hmotová bilance absorpční kolony

V teoretických studiích se obvykle pracuje s molovými koncentracemi, souvisejícími s objemem dané fáze, a v tomto tvaru se nejčastěji píší diferenciální rovnice. Tato vyjádření koncentrací jsou přejata z fyziky a z fyzikální chemie. Pro inženýrské výpočty se však nehodí. Proto se při praktických propočtech absorpce používá hlavně molových zlomků [37].

Pro vyjádření koncentrace kapalně a plynně fáze rozlišujeme molové zlomky  $x$ ,  $y$  a relativní molové zlomky (molové poměry)  $X$ ,  $Y$ . U molového zlomku se koncentrace vztahuje na množství směsi. Častěji však vztahujeme koncentraci na množství rozpouštědla v kapalně fázi nebo na inertní složku ve fázi plynně vyjádřené relativním molovým zlomkem. Za jistých zjednodušujících předpokladů jsou molové proudy a plynně a kapalně fáze stejné. Tomuto předpokladu říkáme předpoklad ekvimolárního toku a pro zjednodušení u bilančních výpočtů patrových aparátů má velký význam. Vede k linearizaci bilančních vztahů, což se projeví tím, že pracovní (bilanční) čáry jsou přímky. Tento předpoklad je dodržen především u destilačních aparátů. Při absorpci předpoklad ekvimolárního toku uvažovat nemůžeme, jelikož počty molů plynně a kapalně fáze se při průchodu kolonou mění. Plynně fáze absorpcí ubývá směrem nahoru a kapalně fáze přibývá směrem dolů. Koncentraci tedy nemůžeme vztáhnout na proměnnou veličinu, a z tohoto důvodu je ke zjednodušení výpočtu použito relativních molových zlomků ( $X$ ,  $Y$ ). Koncentraci vztahujeme tedy na množství rozpouštědla v kapalně fázi (vody) a na inertní složku ve fázi plynně (metan). Za těchto předpokladů se bilanční rovnice nesmírně zjednoduší. Schéma absorpční kolony s obsahy složek na vstupu znázorňuje obr. 17.



Obr. 17 Schéma absorpční kolony

Abychom stanovili, do jaké míry se rozpouští inertní složka ( $\text{CH}_4$ ) během absorpce, bylo vypočteno množství složek na vstupu a na výstupu absorpční kolony. Předpokladem bilance bylo, že množství  $\text{CH}_4$  se po průchodu kolonou nezmění a  $\text{CO}_2$  je maximálně absorbováno do vypírací vody s ohledem na jeho koncentraci 2% na výstupu. Vyčíslení průtoků na vstupu a výstupu uvádí tab. 9.

| Složka        | Vstup do absorpční kolony        |                      |                    | Výstup z absorpční kolony        |                      |                    |
|---------------|----------------------------------|----------------------|--------------------|----------------------------------|----------------------|--------------------|
|               | průtok<br>[Nm <sup>3</sup> /hod] | průtok<br>[kmol/hod] | průtok<br>[kg/hod] | průtok<br>[Nm <sup>3</sup> /hod] | průtok<br>[kmol/hod] | průtok<br>[kg/hod] |
| $\text{CH}_4$ | 640                              | 28,554               | 458,057            | 640                              | 28,554               | 458,065            |
| $\text{CO}_2$ | 360                              | 16,061               | 706,846            | 7,2                              | 0,321                | 14,137             |
| <b>Celkem</b> | <b>1000</b>                      | <b>44,615</b>        | <b>1164,902</b>    | <b>647,2</b>                     | <b>28,875</b>        | <b>472,202</b>     |

**Tab. 9. Průtoky na vstupu a na výstupu absorpční kolony**

Z vypočítaných hodnot určíme odečtením hodnot na vstupu a výstupu množství absorbovaného  $\text{CO}_2$ . Toto množství činí přibližně 692,709 kg za hodinu ( $n_A = 15,740 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$ ). S respektováním 2 %  $\text{CO}_2$  na výstupu získáme vyčištěním biometan o obsahu 98,89 % obj.  $\text{CH}_4$ .

Teoretické minimální množství vypírací vody lze určit z rozpustnosti  $\text{CO}_2$  ve vodě v závislosti na tlaku. Rozpustnosti  $\text{CO}_2$  byly vypočítány pomocí matematického modelu a jsou uvedeny příloze této práce (PŘÍLOHA 1). Snahou je dosáhnout nejvyšší účinnosti vodní vypírky. Ze získaných hodnot je patrné, že nejvyšší účinnosti dosáhneme získáním co nejvyššího tlaku a co nejnižší teploty v absorpční koloně (s rostoucím tlakem a klesající teplotou hodnota rozpustnosti vzrůstá). Střední teplota absorpce byla zvolena 20 °C. Potřebná data pro tuto teplotu jsou obsažena v tab. 23 a jejich grafická závislost je uvedena na obr. 23 v příloze (PŘÍLOHA 1). Při určení množství vypírací vody opět vycházíme z předpokladu, že se jedná o plyn složený pouze z metanu a oxidu uhličitého. Parciální tlak složky  $\text{CO}_2$  je přibližně 3,24 barů (z hodnoty 9 barů v absorpční koloně). Při této hodnotě tlaku a teplotě 20 °C byla vypočtena ze závislostí uvedených v příloze hodnota rozpustnosti  $\text{CO}_2$ .

Pro teoretické určení minimálního množství vypírací vody vycházíme ze známého množství vstupujícího  $\text{CO}_2$  do absorpční kolony a určené hodnoty rozpustnosti  $\text{CO}_2$  při daných podmínkách. Dále je nutno provést přepočítání rozpustnosti na hodnotu  $\frac{\text{m}^3 \text{CO}_2}{\text{l H}_2\text{O}}$ . K tomu je třeba hodnota hustoty  $\text{CO}_2$  při daných podmínkách. Kvůli absenci těchto dat byla použita dostupná hodnota při 0 °C a atmosférického tlaku.

$$C_A = 5,569 \frac{\text{g CO}_2}{\text{l H}_2\text{O}} = 5,569 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}} = \frac{5,569 \text{ m}^3 \text{CO}_2}{1,965 \text{ m}^3 \text{H}_2\text{O}} = 2,834 \frac{\text{m}^3 \text{CO}_2}{\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}} \quad (1)$$

Nyní můžeme určit teoretické minimální množství vypírací vody:

$$V_{C_{\min}} = \frac{\dot{V}_A}{C_A} = \frac{360}{2,834} = 127,02 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 127,02 \cdot 998,2 \approx 126\,796 \frac{\text{l}}{\text{h}} \quad (2)$$



Na absorpci 36 % obj. CO<sub>2</sub> obsažených v bioplynu je teoreticky třeba minimálně 127 m<sup>3</sup>/h vody. Není však hodnotou konečnou. V praxi je při řešení této problematiky nutno počítat i s jinými faktory ovlivňující účinnost porézní přepážky. Aby byla zajištěno kvalitní vyprání CO<sub>2</sub>, bylo toto teoretické množství ještě vynásobeno násobkem minimální spotřeby vody. Hodnoty průtoku byly měněny do doby, než rovnovážná křivka odpovídala všem požadavkům, které budou popsány níže v textu. Násobek minimální spotřeby vody pak činil 1,4 a konečné množství vody vypírací  $177,84 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \approx 177\,520 \frac{\text{l}}{\text{h}}$ .

Dále určíme relativní molární koncentrace, z nichž sestojíme pracovní přímkou (souřadnice okrajových stavů absorbéru) a rovnovážnou křivku. Pracovní přímkou vyznačená přerušovanou čarou značí stav s minimální spotřebou absorpční vypírací vody (horní bod pracovní přímkou je na rovnovážné křivce). Budou uvedeny nejdůležitější rovnice výpočtu.

### Výstup:

$$Y_{A2} = \frac{\dot{n}_{NA}}{\dot{n}_{NB}} = \frac{0,321}{28,554} = 0,01125 \quad (3)$$

$$X_{A2} = \frac{x_{NA} \cdot MW_C}{MW_A \cdot \rho_c} = \frac{0,025 \cdot 18,02}{44,009 \cdot 998,2} = 1,025 \cdot 10^{-5} \quad (4)$$

### Vstup:

$$Y_{A1} = \frac{y_{DA}}{1 - y_{DA}} = \frac{\dot{n}_{DA}}{\dot{n}_{DB}} = \frac{0,36}{1 - 0,36} = \frac{16,061}{28,554} = 0,5625 \quad (5)$$

$$X_{A1} = \frac{\dot{n}_A}{\dot{n}_C} + X_{A2} = \frac{15,74}{9853,84} + 1,025 \cdot 10^{-5} = 1,608 \cdot 10^{-3} \quad (6)$$

Porovnáním vypočtených průtoků plynů pro řezy 1 a 2 se ukazuje, že hodnoty celkových průtoků na vstupu a na výstupu se různí. To je způsobeno změnou Reynoldsova čísla v plynné fázi a tedy i změnou součinitele přestupu hmoty. Je tedy nutno zavést do výpočtu hodnoty nejen pro řezy 1 a 2. Proces absorpce byl rozdělen na čtyři stupně, u nichž se vyměňuje hmota v množství  $\frac{\dot{m}_A}{4}$ . Odpovídající řezy budou označeny 3, 4 a 5. Z celkové bilance výměníku byly získány krajní koncentrace pro jednotlivé řezy (viz. obr. 17).

$$X_{A4} = \frac{X_{A1} + X_{A2}}{2} = \frac{1,608 \cdot 10^{-3} + 1,025 \cdot 10^{-5}}{2} = 8,09 \cdot 10^{-4} \quad (7)$$

$$Y_{A4} = \frac{Y_{A1} + Y_{A2}}{2} = \frac{0,5625 + 0,01125}{2} = 0,2868 \quad (8)$$

$$X_{A3} = \frac{X_{A1} + X_{A4}}{2} = \frac{1,608 \cdot 10^{-3} + 8,09 \cdot 10^{-4}}{2} = 1,21 \cdot 10^{-3} \quad (9)$$

$$Y_{A3} = \frac{Y_{A1} + Y_{A4}}{2} = \frac{0,5625 + 0,2868}{2} = 0,4247 \quad (10)$$

$$X_{A5} = \frac{X_{A4} + X_{A2}}{2} = \frac{8,09 \cdot 10^{-4} + 1,025 \cdot 10^{-5}}{2} = 4,1 \cdot 10^{-4} \quad (11)$$

$$Y_{A5} = \frac{Y_{A4} + Y_{A2}}{2} = \frac{0,2868 + 0,01125}{2} = 0,149 \quad (12)$$

Pro sestavení rovnovážné křivky je třeba na základě stanovených koncentrací  $X_{A1}$  a  $X_{A2}$  a dalších zvolených hodnot  $X_{Ai}$  v tomto intervalu vypočítat podle rovnice (16) rovnovážné koncentrace  $Y_{Ai}^*$ .

$$H_A = \frac{p_A^*}{x_A} \quad (13)$$

$$Y_A^* = \frac{p_A^*}{1 - p_A^*} \quad (14)$$

$$x_A = \frac{X_A}{1 + X_A} \quad (15)$$

$$Y_{Ai}^* = \frac{H_A \cdot x_{Ai}}{P - H_A \cdot x_{Ai}} = \frac{1}{\frac{P}{H_A \cdot x_{Ai}} + \frac{P}{H_A} - 1} \quad (16)$$

|      |            |  |       |
|------|------------|--|-------|
| kde: | $H_A$      | Henryho konstanta pro vodní roztoky $CO_2$ (při 20 °C) | [MPa] |
|      | $P$        | tlak v absorpční koloně                                | [MPa] |
|      | $p_A^*$    | parciální tlak složky                                  | [MPa] |
|      | $x_{Ai}$   | molový zlomek  | [-]   |
|      | $X_{Ai}$   | relativní molový zlomek                                | [-]   |
|      | $Y_{Ai}^*$ | rovnovážný relativní molový zlomek                     | [-]   |

Hodnota Henryho konstanty pro  $CO_2$  při teplotě 20 °C (střední teplota v absorpční koloně) byla odečtena z tab. 22 uvedené v příloze (PŘÍLOHA 1). Do výpočtu ji bylo třeba převést na jednotku MPa ( $H_A=142$  MPa).

Určíme

$$\frac{P}{H_A} = \frac{0,9}{142} = 631,29 \cdot 10^{-5} \quad (17)$$

Z toho:

$$Y_{A1}^* = \frac{1}{\frac{P}{H_A \cdot X_{A1}} + \frac{P}{H_A} - 1} = \frac{1}{\frac{631,29}{10^5 \cdot 1,608 \cdot 10^{-3}} + 631,29 \cdot 10^{-5} - 1} = 0,34092 \quad (18)$$

$$Y_{A2}^* = \frac{1}{\frac{P}{H_A \cdot X_{A2}} + \frac{P}{H_A} - 1} = \frac{1}{\frac{631,29}{10^5 \cdot 1,025 \cdot 10^{-5}} + 631,29 \cdot 10^{-5} - 1} = 0,00163 \quad (19)$$

$$Y_{A4}^* = \frac{1}{\frac{P}{H_A \cdot X_{A4}} + \frac{P}{H_A} - 1} = \frac{1}{\frac{631,29}{10^5 \cdot 8,09 \cdot 10^{-4}} + 631,29 \cdot 10^{-5} - 1} = 0,1468 \quad (20)$$

$$Y_{A3}^* = \frac{1}{\frac{P}{H_A \cdot X_{A3}} + \frac{P}{H_A} - 1} = \frac{1}{\frac{631,29}{10^5 \cdot 1,21 \cdot 10^{-3}} + 631,29 \cdot 10^{-5} - 1} = 0,2364 \quad (21)$$

$$Y_{A5}^* = \frac{1}{\frac{P}{H_A \cdot X_{A5}} + \frac{P}{H_A} - 1} = \frac{1}{\frac{631,29}{10^5 \cdot 4,1 \cdot 10^{-4}} + 631,29 \cdot 10^{-5} - 1} = 0,6935 \quad (22)$$

Pro úplné sestrojení rovnovážné křivky je třeba dopočítat rovnovážné koncentrace  $X_{A1}^*$  a  $X_{A2}^*$ . Úpravou rovnice (16) je získáme ze známých hodnot  $Y_{A1}$  a  $Y_{A2}$ .

$$X_{A1}^* = \frac{\frac{P}{H_A}}{\frac{1}{Y_{A1}} + \frac{P}{H_A} + 1} = \frac{631,29 \cdot 10^{-5}}{\frac{1}{0,5625} + 631,29 \cdot 10^{-5} + 1} = 2,28 \cdot 10^{-3} \quad (23)$$

$$X_{A2}^* = \frac{\frac{P}{H_A}}{\frac{1}{Y_{A2}} + \frac{P}{H_A} + 1} = \frac{631,29 \cdot 10^{-5}}{\frac{1}{0,01125} + 631,29 \cdot 10^{-5} + 1} = 7,02 \cdot 10^{-5} \quad (24)$$

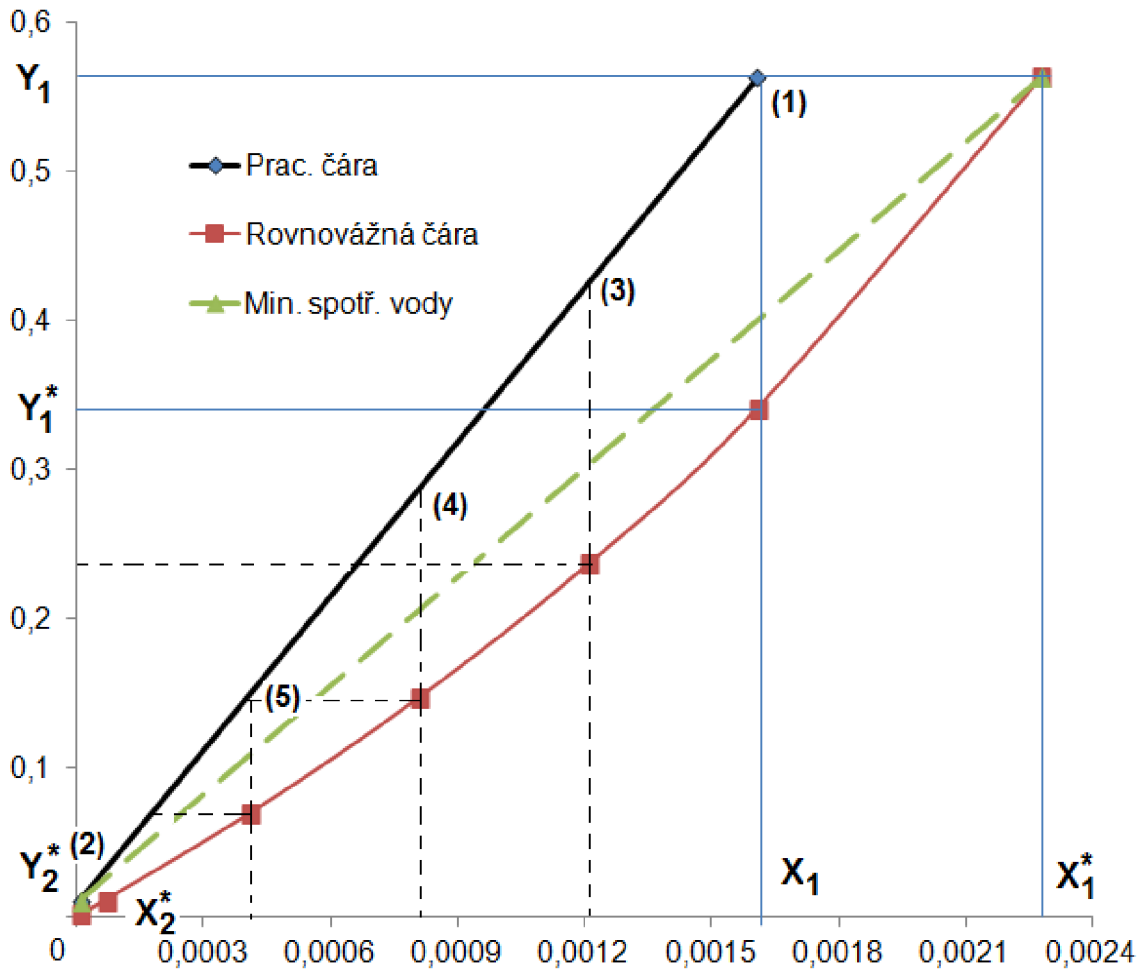
Vyčíslení dat pro sestrojení pracovní přímky a rovnovážné křivky znázorňuje tab. 10 a tab. 11. Grafické zpracování pracovní přímky a rovnovážné křivky pak obr. 18.

| Relativní koncentrace CO <sub>2</sub> |                 | Rovnovážné koncentrace CO <sub>2</sub> |                              |
|---------------------------------------|-----------------|--|------------------------------|
| X <sub>A1</sub>                       | Y <sub>A1</sub> | X <sub>A1</sub> <sup>*</sup>           | Y <sub>A1</sub> <sup>*</sup> |
| 1,608 · 10 <sup>-3</sup>              | 0,563           | 2,28 · 10 <sup>-3</sup>                | 0,3409                       |
| X <sub>A2</sub>                       | Y <sub>A2</sub> | X <sub>A2</sub> <sup>*</sup>           | Y <sub>A2</sub> <sup>*</sup> |
| 1,025 · 10 <sup>-5</sup>              | 0,01125         | 7,02 · 10 <sup>-5</sup>                | 1,63 · 10 <sup>-3</sup>      |

Tab. 10. Relativní a rovnovážné koncentrace

| Řez | $X_A$                | $Y_A$ | $X_A [10^{-5}]$ | $Y_A^*$ | $Ky=Y_A^*/X_A$ |
|-----|----------------------|-------|-----------------|---------|----------------|
| 1   | $1,61 \cdot 10^{-3}$ | 0,563 | 160,76          | 0,34092 | 212,1          |
| 3   | $1,21 \cdot 10^{-3}$ | 0,425 | 120,83          | 0,23635 | 195,6          |
| 4   | $8,09 \cdot 10^{-4}$ | 0,287 | 80,89           | 0,14684 | 181,5          |
| 5   | $4,10 \cdot 10^{-4}$ | 0,149 | 40,96           | 0,06935 | 169,3          |
| 2   | $1,03 \cdot 10^{-5}$ | 0,011 | 1,03            | 0,00163 | 158,7          |

Tab. 11. Přehled koncentrací


 Obr. 18 Graf koncentrací pro absorpční kolonu CO<sub>2</sub>

### 8. 3. Stanovení rozměrů absorpční kolony

Po provedené materiálové bilanci přistoupíme k určení plochy pro výměnu hmoty. Analogicky jako u výměny tepla rozlišujeme pojmy jako je přestup hmoty (z nitra fáze k fázovému rozhraní) a prostup hmoty (z nitra jedné fáze do druhé fáze).

Při převodu hmoty se v tomto případě zaměřujeme na pohyb molekul od rozhraní nebo k rozhraní, které rozděluje dvě fáze. Takovým fázovým rozhraním, je například hladina kapaliny schopná absorbovat určitou složku z plynu, který nad ní nebo kolem ní proudí. Při turbulentním toku plynného média se bude absorbovatelná složka převádět účinkem místních proudů a vírů média rychleji než při čisté difúzi. Stejně jako při tepelných jevech nevyskytuje se převod hmoty prouděním v čisté formě, tj. bez současné difúze. V hlavním proudu média bývá difúze při turbulentním režimu vedle proudění zanedbatelná. Ale rozvíření plynu, proudícího podél povrchu kapaliny nebo tuhého tělesa, nezasahuje až k samému fázovému rozhraní, nýbrž pouze k hraniční vrstvičce, která se pohybuje laminárně. Aby se dostaly k vlastnímu rozhraní, musí aktivní molekuly proniknout hraniční vrstvičkou složeným pohybem, jehož příčnou složkou je difúze a podélnou proudění. Celý tento kombinovaný pochod, skládající se z převodu hmoty z hlavního proudu plynné fáze k hraniční vrstvičce a odtud k fázovému rozhraní, se nazývá přestup hmoty [37].

#### 8.3.1. Součinitel přestupu hmoty v plynné fázi

Proudění plynu kolonou, tj. prostory mezi prvky náplně, je nucené, kdežto stékání kapaliny po náplni účinkem gravitace, kterým se tu nezabýváme, představuje volné proudění. Je-li toto nucené proudění plynu turbulentní, můžeme očekávat platnost podobných rovnic jako pro nucené turbulentní proudění trubkou. Skutečně se také ukázalo, že takové případy lze vystihnout pomocí Sherwoodova čísla a pro turbulentní tok plynu vrstvou kroužků platí vztah (25) [37]:

$$Sh = 0,11 \cdot Re^{0,8} \cdot Sc^{1/3} \quad (25)$$

|      |    |                   |     |
|------|----|-------------------|-----|
| kde: | Sh | Sherwoodovo číslo | [-] |
|      | Re | Reynoldsovo číslo | [-] |
|      | Sc | Schmidtovo číslo  | [-] |

Nejprve vypočítáme hmotnostní průtoky v jednotlivých řezech absorpční kolony. Pro řezy 1 a 2 byly hmotnostní průtoky  $\dot{m}_{g1}$  a  $\dot{m}_{g2}$  již vyčísleny (tab. 9). Pro pomocné řezy 3, 4 a 5 bylo použito středního průtoku inertů.

$$\dot{m}_{ig} = \frac{\dot{m}_{ig1} + \dot{m}_{ig2}}{2} = \frac{458,057 + 458,065}{2} = 458,06 \text{ kg/h} \quad (26)$$

$\dot{m}_A = 692,709 \text{ kg/h}$  je celkové absorbované  $\text{CO}_2$ . Přičemž v každém ze 4 stupňů se absorbuje:

$$\frac{\dot{m}_A}{4} = \frac{692,709}{2} = 173,18 \text{ kg/h} \quad (27)$$

Obsah CO<sub>2</sub> ve třetím řezu určíme ze známé hodnoty množství CO<sub>2</sub> v prvním řezu, pak:

$$706,846 - \frac{\dot{m}_A}{4} = 706,846 - 173,18 = 533,666 \text{ kg/h} \quad (28)$$

$$\dot{m}_{g3} = \dot{m}_{g1} + 533,666 = 458,06 + 533,666 = 991,729 \text{ kg/h} \quad (29)$$

$$\dot{m}_{g4} = \dot{m}_{g3} - \frac{\dot{m}_A}{4} = 991,729 - 173,18 = 818,552 \text{ kg/h} \quad (30)$$

$$\dot{m}_{g5} = \dot{m}_{g4} - \frac{\dot{m}_A}{4} = 818,552 - 173,18 = 645,375 \text{ kg/h} \quad (31)$$

Nyní z hmotnostních průtoků určíme hmotové rychlosti v jednotlivých řezech. K jejich určení je třeba znát průřez absorpční kolony. Z již sestaveného modelu v programu EXCEL byla hledána ideální závislost voleného násobku vypírací kapaliny  $L_{\min}$  (mění sklon pracovní přímky) a voleného průměru  $d$  absorpční kolony (ovlivňuje rychlost proudění plynu v koloně). Podmínkou bylo splnění požadavku co největší účinnosti kolony, tedy tak aby pracovala těsně pod mezí zahlcení a aby výsledná výška náplně neporušila požadavek ( $h < 7d$ ) i s přihlédnutím k rezervě. Průměr kolony byl nakonec stanoven na 2,18 m. Přehled průtoků hmoty a hmotových rychlostí plynu je uvedeno v tab. 12.

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 2,18^2}{4} = 3,733 \text{ m}^2 \quad (32)$$

$$G_1 = \frac{\dot{m}_{g1}}{S} = \frac{1164,9}{3,733} = 312,09 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h} \quad (33)$$

$$G_3 = \frac{\dot{m}_{g3}}{S} = \frac{991,729}{3,733} = 265,7 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h} \quad (34)$$

$$G_4 = \frac{\dot{m}_{g4}}{S} = \frac{818,552}{3,733} = 219,3 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h} \quad (35)$$

$$G_5 = \frac{\dot{m}_{g5}}{S} = \frac{645,375}{3,733} = 172,92 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h} \quad (36)$$

$$G_2 = \frac{\dot{m}_{g2}}{S} = \frac{472,2}{3,733} = 126,51 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h} \quad (37)$$

| Řez | Průtok [kg/h] | Hmot. Rychlost [kg/(m <sup>2</sup> .h)] |
|-----|---------------|---|
| 1   | 1164,90       | 312,09                                  |
| 3   | 991,729       | 265,70                                  |
| 4   | 818,552       | 219,30                                  |
| 5   | 645,375       | 172,91                                  |
| 2   | 472,20        | 126,51                                  |

**Tab. 12. Přehled průtoků hmoty a hmotových rychlostí plynu**

K určení hodnot Reynoldsova čísla je třeba určit dynamickou viskozitu bioplynu. Pro jednoduchost byla stanovena z literatury ( $\mu_{BP} = 1,297 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s} = 0,0466992 \text{ kg/m}\cdot\text{h}$ ). Předpokládáme tedy, že se její hodnota průchodem přes absorpční kolonu nemění.

$$Re_1 = \frac{G_1}{a \cdot \mu_{BP}} = \frac{312,09}{100 \cdot 0,0466992} = 66,84; \quad Re_1^{0,8} = 28,84 \quad (38)$$

$$Re_3 = \frac{G_3}{a \cdot \mu_{BP}} = \frac{265,7}{100 \cdot 0,0466992} = 56,9; \quad Re_3^{0,8} = 25,36 \quad (39)$$

$$Re_4 = \frac{G_4}{a \cdot \mu_{BP}} = \frac{219,3}{100 \cdot 0,0466992} = 46,97; \quad Re_4^{0,8} = 21,75 \quad (40)$$

$$Re_5 = \frac{G_5}{a \cdot \mu_{BP}} = \frac{172,91}{100 \cdot 0,0466992} = 37,03; \quad Re_5^{0,8} = 17,98 \quad (41)$$

$$Re_2 = \frac{G_2}{a \cdot \mu_{BP}} = \frac{126,51}{100 \cdot 0,0466992} = 27,094; \quad Re_2^{0,8} = 14 \quad (42)$$

V našem případě difúze jedné složky směsi inertů je množství inertů po dráze průtoku kolonou konstantní. Hodnota difuzivity je pak nezávislá na složení a může být vypočtena pro složení plynu v libovolném řezu absorpční kolony. Protože bereme bioplyn jako směs jeho dvou majoritních složek, postačí nám difuzivita  $\text{CO}_2 - \text{CH}_4$  určená z literatury;  $D_{As0} = 0,0551 \text{ m}^2/\text{h}$  (pro  $P = 760 \text{ torrů}$  a  $0^\circ\text{C}$ ). Hodnota hustoty  $\text{CO}_2$  byla také určena z literatury [37].

Modifikovaná difuzivita:

$$\delta_{As0} = D_{As0} \cdot \rho_A = 0,0551 \cdot 1,97 = 0,1085 \text{ kg/m}\cdot\text{h}; \quad \text{pro } t = 0^\circ\text{C} \text{ a libovolný tlak} \quad (43)$$

$$\delta_{A0} = \delta_{As0} \cdot \sqrt{\frac{T}{T_0}} = 0,1085 \cdot \sqrt{\frac{293,15}{273,15}} = 0,1125 \text{ kg/m}\cdot\text{h} \quad \text{pro } t = 20^\circ\text{C} \quad (44)$$

Hodnota Schmidtova čísla bude pro každý řez jiná, jestliže se bude měnit hodnota  $Z$ .

$$Sc_S = \frac{Z_S \cdot \mu_{BP}}{\delta_{A0}} \quad (45)$$

$$Z_S = \frac{M_A}{M_S} \quad (46)$$

$$M_1 = \frac{\dot{m}_{g1}}{\dot{n}_{g1}} = \frac{1164,902}{44,615} = 26,1101; \quad Z_1 = \frac{M_A}{M_1} = \frac{44,009}{26,11012} = 1,69 \quad (47)$$

$$M_2 = \frac{\dot{m}_{g2}}{\dot{n}_{g2}} = \frac{472,202}{28,875} = 16,353; \quad Z_2 = \frac{M_A}{M_2} = \frac{44,009}{16,353} = 2,69 \quad (48)$$



Pro ostatní řezy vypočteme střední molekulovou hmotnost podle následujícího vztahu:

$$M_S = \frac{1}{1 + Y_A} \cdot (Y_A \cdot M_A + M_i) \quad (49)$$

Pro řezy 1 a 2 z tab. 9 určíme:

$$M_{i1} = \frac{m_{ig1}}{n_{ig1}} = \frac{458,057}{28,554} = 16,042 \quad (50)$$

Z průtoků na vstupu a výstupu je patrné, že se průtok inertu se po průchodu kolonou téměř nezmění, proto vypočítanou hodnotu můžeme považovat za střední hodnotu  $M_i$ . Pak:

$$M_3 = \frac{1}{1 + Y_{A3}} \cdot (Y_{A3} \cdot M_A + M_i) = \frac{1}{1 + 0,425} \cdot (0,425 \cdot 44 + 16,042) = 24,379 \quad (51)$$

$$Z_3 = \frac{M_A}{M_3} = \frac{44,009}{24,379} = 1,81 \quad (52)$$

$$M_4 = \frac{1}{1 + Y_{A4}} \cdot (Y_{A4} \cdot M_A + M_i) = \frac{1}{1 + 0,287} \cdot (0,287 \cdot 44 + 16,042) = 22,27 \quad (53)$$

$$Z_4 = \frac{M_A}{M_4} = \frac{44,009}{22,27} = 1,976 \quad (54)$$

$$M_5 = \frac{1}{1 + Y_{A5}} \cdot (Y_{A5} \cdot M_A + M_i) = \frac{1}{1 + 0,149} \cdot (0,149 \cdot 44 + 16,042) = 19,67 \quad (55)$$

$$Z_5 = \frac{M_A}{M_5} = \frac{44,009}{19,67} = 2,23 \quad (56)$$

Nyní můžeme určit hodnoty Schmidtova čísla a následně pak součinitele prostupu v plynné fázi:

$$Sc_1 = \frac{Z_1 \cdot \mu_{BP}}{\delta_{A0}} = \frac{1,6855 \cdot 0,0467}{0,1125} = 0,7; \quad Sc_1^{0,,33} = 0,88 \quad (57)$$

$$Sc_3 = \frac{Z_3 \cdot \mu_{BP}}{\delta_{A0}} = \frac{1,805 \cdot 0,0467}{0,1125} = 0,75; \quad Sc_3^{0,,33} = 0,91 \quad (58)$$

$$Sc_4 = \frac{Z_4 \cdot \mu_{BP}}{\delta_{A0}} = \frac{1,975 \cdot 0,0467}{0,1125} = 0,82; \quad Sc_4^{0,,33} = 0,94 \quad (59)$$

$$Sc_5 = \frac{Z_5 \cdot \mu_{BP}}{\delta_{A0}} = \frac{2,23 \cdot 0,0467}{0,1125} = 0,93; \quad Sc_5^{0,,33} = 0,97 \quad (60)$$

$$Sc_2 = \frac{Z_2 \cdot \mu_{BP}}{\delta_{A0}} = \frac{2,69 \cdot 0,0467}{0,1125} = 1,12; \quad Sc_2^{0,,33} = 1,03 \quad (61)$$

$$\beta_{Ag1} = 0,11 \cdot \frac{\delta_{A0}}{d_t} \cdot Re_1^{0,8} \cdot Sc_1^{0,33} = 0,11 \cdot \frac{0,1125}{0,05} \cdot 28,84 \cdot 0,88 = 6,34 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h} \quad (62)$$

$$\beta_{Ag3} = 0,11 \cdot \frac{\delta_{A0}}{d_t} \cdot Re_3^{0,8} \cdot Sc_3^{0,33} = 0,11 \cdot \frac{0,1125}{0,05} \cdot 25,36 \cdot 0,91 = 5,69 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h} \quad (63)$$

$$\beta_{Ag4} = 0,11 \cdot \frac{\delta_{A0}}{d_t} \cdot Re_4^{0,8} \cdot Sc_4^{0,33} = 0,11 \cdot \frac{0,1125}{0,05} \cdot 21,74 \cdot 0,94 = 6,04 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h} \quad (64)$$

$$\beta_{Ag5} = 0,11 \cdot \frac{\delta_{A0}}{d_t} \cdot Re_5^{0,8} \cdot Sc_5^{0,33} = 0,11 \cdot \frac{0,1125}{0,05} \cdot 17,98 \cdot 0,98 = 4,34 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h} \quad (65)$$

$$\beta_{Ag2} = 0,11 \cdot \frac{\delta_{A0}}{d_t} \cdot Re_2^{0,8} \cdot Sc_2^{0,33} = 0,11 \cdot \frac{0,1125}{0,05} \cdot 14 \cdot 1,03 = 3,59 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h} \quad (66)$$

### 8.3.2. Součinitel přestupu hmoty v kapalně fázi

Přestupem hmoty v kapalně fázi budeme rozumět převod hmoty od fázového rozhraní do nitra kapalně vrstvy. Stejně jako u přestupu hmoty v plynně fázi i zde bylo použito Sherwoodovo číslo ve tvaru:

$$Sh = 0,015 \cdot Re^{0,66} \cdot Sc^{1/3} \quad (67)$$

Obsah CO<sub>2</sub> v nastříkované vodě je:

$$\dot{m}_{2A} = x_{NA} \cdot \dot{V}_{H_2O} = 0,025 \cdot 177,84 = 4,45 \text{ kg/h} \quad (68)$$

V odcházející vodě:

$$\dot{m}_{1A} = \dot{m}_{2A} + \dot{m}_A = 4,45 + 692,709 = 697,15 \text{ kg/h} \quad (69)$$

Odtud hmotový průtok v řezech 1 a 2

$$\dot{m}_{11} = \rho_{H_2O} \cdot \dot{V}_{H_2O} + \dot{m}_{1A} = 998,2 \cdot 177,84 + 697,15 = 1,78 \cdot 10^{-5} \text{ kg/h} \quad (70)$$

$$\dot{m}_{12} = \rho_{H_2O} \cdot \dot{V}_{H_2O} + \dot{m}_{2A} = 998,2 \cdot 177,84 + 4,45 = 1,78 \cdot 10^{-5} \text{ kg/h} \quad (71)$$

Obě hodnoty se příliš neliší, proto je můžeme považovat za střední hodnoty a není třeba dělat jejich aritmetický průměr (v programu EXCEL je pro upřesnění tato operace provedena). Hmotová rychlost kapaliny je pak:

$$G = \frac{\dot{m}_{11}}{S} = \frac{1,78 \cdot 10^{-5}}{3,733} = 47 \text{ 654 kg/m}^2 \cdot \text{h} \quad (72)$$

Dynamická viskozita pro vodu při střední teplotě v absorpční koloně je  $\mu_{H_2O} = 1,005 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s} = 3,62 \text{ kg/m} \cdot \text{h}$ . Určíme Reynoldsovo číslo:

$$Re = \frac{G}{a \cdot \mu_{H_2O}} = \frac{47\,654}{100 \cdot 3,62} = 131,71 \quad Re^{0,66} = 25,06 \quad (73)$$

$$Z = \frac{M_A}{M_s} \approx \frac{M_A}{M_i} = \frac{44,009}{18,015} = 2,44 \quad (74)$$

Difuzivita pro soustavu CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O při teplotě 20 °C byla opět určena z literatury [37].  
 $D_A = 0,637 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{h}$ .

$$\delta_A = D_A \cdot \frac{\rho_s}{M_s} \cdot M_A \approx D_A \cdot \frac{\rho_i}{M_i} \cdot M_A = 0,637 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{998,2}{18,015} \cdot 44 = 0,016 \text{ kg/m} \cdot \text{h} \quad (75)$$

Schmidtovo číslo

$$Sc = \frac{Z \cdot \mu_{H_2O}}{\delta_A} = \frac{2,44 \cdot 3,62}{0,016} = 569; \quad Sc^{0,33} = 8,29 \quad (76)$$

Abychom mohli určit součinitele přestupu hmoty v plynné fázi, je třeba ještě vypočítat charakteristický lineární rozměr  $\theta$  (vliv gravitace při stékání kapaliny po náplni).

$$\theta = \left( \frac{\eta_{H_2O}^2}{\rho_{H_2O}^2 \cdot g} \right)^{1/3} = \left( \frac{(1,005 \cdot 10^{-3})^2}{998,2^2 \cdot 9,81} \right)^{1/3} = 46,93 \cdot 10^{-6} \text{ m} \quad (77)$$

$$\beta_{A1} = 0,015 \cdot \frac{\delta_A}{\theta} \cdot Re_1^{0,66} \cdot Sc_1^{0,33} = 0,015 \cdot \frac{0,016}{46,93 \cdot 10^{-6}} \cdot 25,06 \cdot 8,29 =$$

$$= 1030,9 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$$

### 8.3.3. Součinitel prostupu hmoty

$$\frac{1}{K_{MA}} = \frac{1}{\beta_{Ag}} + \frac{\psi}{\beta_{A1}} \quad (79)$$

|      |              |   |                         |
|------|--------------|---|-------------------------|
| kde: | $K_{MA}$     | součinitel prostupu hmoty                               | [kg/m <sup>2</sup> · h] |
|      | $\beta_{Ag}$ | součinitel přestupu hmoty v plynné fázi                 | [kg/m <sup>2</sup> · h] |
|      | $\beta_{A1}$ | součinitel přestupu hmoty v plynné fázi                 | [kg/m <sup>2</sup> · h] |
|      | $\psi$       | součinitel k přepočtení hnacího potenciálu kapalně fáze | [-]                     |

V případech, kdy platí Henryův zákon a absorpce probíhá za přítomnosti inertů při použití koncentrací  $X_A$  a  $Y_A$ :

$$\psi = K_Y = \frac{Y_A^*}{X_A} \quad (80)$$

Hodnoty  $K_Y$  byly uvedeny v přehledu koncentrací (tab. 11). Pro jednotlivé řezy dostaneme:

$$\frac{1}{K_{MA1}} = \frac{1}{\beta_{Ag1}} + \frac{K_{Y1}}{\beta_{A1}} = \frac{1}{6,335} + \frac{212,1}{1030,9} = 0,3635; \quad K_{MA1} = 2,75 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h} \quad (81)$$

$$\frac{1}{K_{MA3}} = \frac{1}{\beta_{Ag3}} + \frac{K_{Y3}}{\beta_{A1}} = \frac{1}{5,69} + \frac{195,6}{1030,9} = 0,3652; \quad K_{MA3} = 2,73 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h} \quad (82)$$

$$\frac{1}{K_{MA4}} = \frac{1}{\beta_{Ag4}} + \frac{K_{Y4}}{\beta_{A1}} = \frac{1}{5,03} + \frac{181,5}{1030,9} = 0,3746; \quad K_{MA4} = 2,67 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h} \quad (83)$$

$$\frac{1}{K_{MA5}} = \frac{1}{\beta_{Ag5}} + \frac{K_{Y4}}{\beta_{A1}} = \frac{1}{4,34} + \frac{169,3}{1030,9} = 0,3946; \quad K_{MA5} = 2,53 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h} \quad (84)$$

$$\frac{1}{K_{MA2}} = \frac{1}{\beta_{Ag2}} + \frac{K_{Y2}}{\beta_{A1}} = \frac{1}{3,59} + \frac{158,7}{1030,9} = 0,4320; \quad K_{MA2} = 2,31 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h} \quad (85)$$

Obdobně jako v rovnicích tepla vystupuje jako hnací síla pochodu teplotní rozdíl  $\Delta t$ , má v difuzních jevech tuto úlohu veličina  $\Delta \pi_A$ , která nabývá různého tvaru podle druhu difuze a způsobu vyjadřování koncentrací. Vzhledem k vztahům mezi jednotlivými způsoby vyjadřování koncentrací se může potenciál  $\Delta \pi_A$  odvozovat z libovolně vyjádřených koncentrací, přičemž je většinou přechod z jednoho vyjádření do druhého velmi jednoduchý. Přehled hnacích potenciálů znázorňuje tab. 13 [37].

$$\Delta \pi_A = \frac{Y_A - Y_A^*}{(1 + Y_A)_m} \quad (86)$$

$$(1 + Y_A)_m = \frac{(1 + Y_A) + (1 + Y_A^*)}{2} \quad (87)$$

| Řez | YA    | YA*   | YA-YA* | 1+YA  | 1+YA* | (1+YA)m | $\Delta \pi_A$ |
|-----|-------|-------|--------|-------|-------|---------|----------------|
| 1   | 0,563 | 0,341 | 0,222  | 1,563 | 1,341 | 1,452   | 0,153          |
| 3   | 0,425 | 0,236 | 0,188  | 1,425 | 1,236 | 1,331   | 0,142          |
| 4   | 0,287 | 0,147 | 0,140  | 1,287 | 1,147 | 1,217   | 0,115          |
| 5   | 0,149 | 0,069 | 0,080  | 1,149 | 1,069 | 1,109   | 0,072          |
| 2   | 0,011 | 0,002 | 0,010  | 1,011 | 1,002 | 1,006   | 0,010          |

**Tab. 13. Přehled hnacích potenciálů**

### 8.3.4. Povrch výměny hmoty a výška a absorpční kolony

V každé části, na které je absorpční kolona rozdělena je předpokládána přímková závislost hnacího potenciálu na koncentraci. Vzhledem k malým rozdílům hodnot součinitelů prostupu hmoty v každé části pro každou z nich přijato  $K_{MAX} \approx \text{konst. rovnající se aritmetickému středu}$ . Vzhledem k malým rozdílům mezi krajovými hnacími potenciály v daném intervalu, je použito aritmetického středu. Pro jednotlivé intervaly platí:

$$[K_{MA}]_1^3 = \frac{K_{MA1} + K_{MA3}}{2} = \frac{2,75 + 2,73}{2} = 2,74 \quad (88)$$

$$[\Delta\pi_{Am}]_1^3 = \frac{\Delta\pi_{A1} + \Delta\pi_{A3}}{2} = \frac{0,153 + 0,142}{2} = 0,147 \quad (89)$$

$$[K_{MA}]_3^4 = \frac{K_{MA3} + K_{MA4}}{2} = \frac{2,73 + 2,67}{2} = 2,703 \quad (90)$$

$$[\Delta\pi_{Am}]_3^4 = \frac{\Delta\pi_{A3} + \Delta\pi_{A4}}{2} = \frac{0,142 + 0,115}{2} = 0,128 \quad (91)$$

$$[K_{MA}]_4^5 = \frac{K_{MA4} + K_{MA5}}{2} = \frac{2,67 + 2,53}{2} = 2,601 \quad (92)$$

$$[\Delta\pi_{Am}]_4^5 = \frac{\Delta\pi_{A4} + \Delta\pi_{A5}}{2} = \frac{0,115 + 0,072}{2} = 0,093 \quad (93)$$

$$[K_{MA}]_5^2 = \frac{K_{MA5} + K_{MA2}}{2} = \frac{2,53 + 2,31}{2} = 2,424 \quad (94)$$

$$[\Delta\pi_{Am}]_5^2 = \frac{\Delta\pi_{A5} + \Delta\pi_{A2}}{2} = \frac{0,072 + 0,01}{2} = 0,0309 \quad (95)$$

Celkový povrch výměny hmoty bude:

$$A = [A]_1^3 + [A]_3^4 + [A]_4^5 + [A]_5^2 \quad (96)$$

$$[A]_1^3 = \frac{\dot{m}_A}{4} \cdot \left( \frac{1}{[K_{MA}]_1^3 \cdot [\Delta\pi_{Am}]_1^3} \right) = \frac{692,709}{4} \cdot \left( \frac{1}{2,74 \cdot 0,147} \right) = 429,95 \text{ m}^2 \quad (97)$$

$$[A]_3^4 = \frac{\dot{m}_A}{4} \cdot \left( \frac{1}{[K_{MA}]_3^4 \cdot [\Delta\pi_{Am}]_3^4} \right) = \frac{692,709}{4} \cdot \left( \frac{1}{2,703 \cdot 0,128} \right) = 500,53 \text{ m}^2 \quad (98)$$

$$[A]_4^5 = \frac{\dot{m}_A}{4} \cdot \left( \frac{1}{[K_{MA}]_4^5 \cdot [\Delta\pi_{Am}]_4^5} \right) = \frac{692,709}{4} \cdot \left( \frac{1}{2,601 \cdot 0,093} \right) = 715,92 \text{ m}^2 \quad (99)$$

$$[A]_5^2 = \frac{\dot{m}_A}{4} \cdot \left( \frac{1}{[K_{MA}]_5^2 \cdot [\Delta\pi_{Am}]_5^2} \right) = \frac{692,709}{4} \cdot \left( \frac{1}{2,424 \cdot 0,0309} \right) = 2312,06 \text{ m}^2 \quad (100)$$

$$A = 3950,25 \text{ m}^2 \quad (101)$$

Objem výplně

$$V = \frac{A}{a} = \frac{3950,25}{100} = 39,5 \text{ m}^3 \quad (102)$$

Výška náplně

$$h = \frac{A}{a \cdot S} = \frac{3950,25}{100 \cdot 3,732} = 10,58 \text{ m}^3 \quad (103)$$

Za předpokladu plné účinnosti povrchu byla vypočtena výška náplně. S přihlédnutím k rezervě bylo zvoleno  $h = 11$  m. Předpoklad rovnoměrného rozdělení kapaliny v náplni  $h < 7d = 7 \cdot 2,18 = 15,26$  m je tedy dodržen i s přidáním rezervy. Shrnutí vypočítaných parametrů absorpční kolony s připočítáním uvažované rezervy je uvedeno v tab. 14.

|  |         |
|--|---------|
| <b>Průměr kolony [m]</b>                   | 2,18    |
| <b>Průřez kolony [m<sup>2</sup>]</b>       | 3,733   |
| <b>Rychlost bioplynu [m/s]</b>             | 0,07    |
| <b>Spotřeba vody [l/h]</b>                 | 177 521 |
| <b>Povrch výměny hmoty [m<sup>2</sup>]</b> | 4106    |
| <b>Objem náplně [m<sup>3</sup>]</b>        | 41,1    |
| <b>Výška kolony [m]</b>                    | 11      |

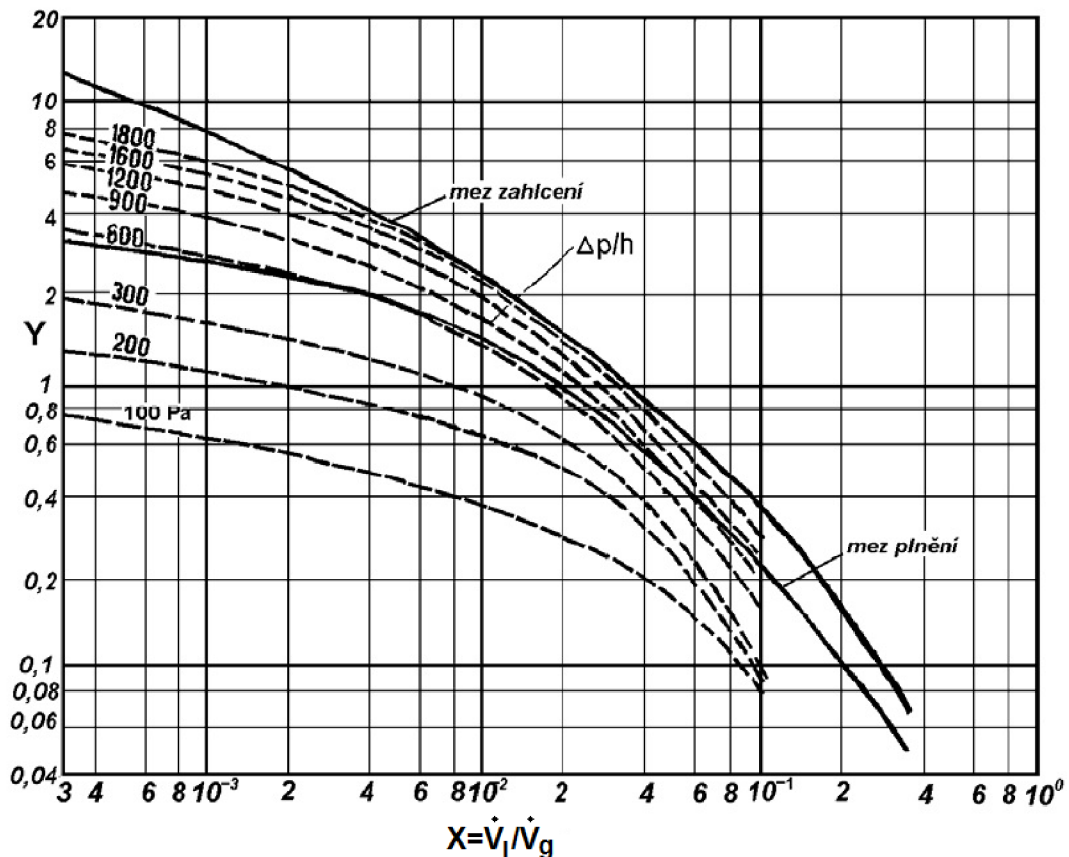
**Tab. 14. Parametry absorpční kolony**

## 8. 4. Hydrodynamické výpočty absorpční kolony

Většinou chceme navrhnout celý výplňový aparát, a proto je zapotřebí se zabývat hydraulikou celé vestavby komplexně a ne jen hydraulikou vlastní přepážky, vytvořené z výplňových tělísek. Podklady pro takové řešení jsou většinou pouze na firemní úrovni a běžně nedostupné z komerčních důvodů [38].

Optimální pracovní režim při protiproudém fázovém toku je těsně pod mezi zahlcení. Jestliže hmotová rychlost plynu, protékajícího náplňovou kolonou, nebo hmotová rychlost kapaliny, kterou je kapalina unášena, překročí určitou mez, vzroste jejich vzájemné tření natolik, že plyn začne kapalinu unášet. Tím, že plyn brání stékání kapaliny a ta se doplňuje novými podíly, vytvoří se více méně souvislá kapalinová zátka, kterou pak plyn vytlačí z kolony. Mluvíme o zahlcení kolony. Tento jev se opakuje a vede k nerovnoměrnosti průtoku a prudkým výkyvům tlaku. Je jasné, že je to porucha, která se nesmí připustit. Zejména při projekci kolon pracujících s velkým zatížením a za tlaku je bezpodmínečně nutno se přesvědčit výpočtem, zda předpokládané provozní podmínky jsou dostatečně hluboko pod mezními podmínkami. Kolony na vypírání CO<sub>2</sub> vodou bývají tak zatíženy, že stačí malé přetížení, aby se zahltily. Je pochopitelné, že to ohrožuje kompresory [37].

Jednou z možností jak dokázat, kdy dochází k zahlcení kolony je použití bezrozměrného kritéria např. podle Žavoronkova, Kafarova, Planovského apod. Ze všech těchto prací vyplynulo, že stav zahlcení je možno popsat funkční závislostí mezi dvěma bezrozměrnými argumenty. Jako další možné řešení je grafické zpracování podle Ramma (obr. 19). Graf má logaritmické souřadnice a parametrem křivek je jednotkový tlakový spád  $\frac{\Delta p}{h}$  [10], [38],



Obr. 19 Křivky zahlcení podle Ramma [38]



### 8.4.1. Pracovní oblast navržené absorpční kolony

Pokud známe potřebné hodnoty a chceme stanovit, v jaké pracovní oblasti se porézní přepážka nachází, vypočítáme obě souřadnice a jejich průsečík udává, zda jsme pod mezi zahlcení apod. Z rovnice může také stanovit hodnotu kritické rychlosti plynné fáze  $\bar{c}_g$  krit, odpovídající mezi zahlcení. Je zapotřebí stanovit tzv. poměr zkrápění, definovaný poměrem hmotnostních průtoků obou fází. Poměr zkrápění může být dán buď bilancí procesu, nebo se volí v rozmezí  $X \in (0,5; 2,5)$ . Nižší hodnoty se volí pro rektifikační kolony, vyšší pro absorpční [38].

Souřadnice na ose Y je dána:

$$Y = C \cdot \left( \frac{\bar{c}_g^2}{g \cdot d_p} \right) \cdot \left( \frac{\eta_k}{\bar{c}_g \cdot d_p \cdot \rho_g} \right)^{0,1} \cdot \left( \frac{\rho_{H_2O}}{\rho_k} \right)^2 \cdot \left( \frac{\rho_g}{\rho_{vzd}} \right)^{0,85} \quad (104)$$

|      |               |  |                      |
|------|---------------|--|----------------------|
| kde: | C             | konstanta tabelovaná pro různé typy výplní                   | [-]                  |
|      | $\bar{c}_g$   | mimovrstvová rychlost plynu                                  | [m/s]                |
|      | $d_p$         | charakteristický rozměr výplňových částic                    | [m]                  |
|      | $\eta_k$      | viskozita zkrápěcí kapaliny                                  | [Pa·s]               |
|      | $\eta_{H_2O}$ | viskozita vody   | [Pa·s]               |
|      | $\rho_g$      | hustota plynu (bioplynu) za podmínek v koloně (9 bar; 20 °C) | [kg/m <sup>3</sup> ] |
|      | $\rho_k$      | hustota zkrápěcí kapaliny za podmínek v koloně               | [kg/m <sup>3</sup> ] |
|      | $\rho_{H_2O}$ | hustota vody za daných podmínek v koloně                     | [kg/m <sup>3</sup> ] |
|      | $\dot{V}_k$   | objemový průtok kapaliny                                     | [m <sup>3</sup> /s]  |
|      | $\dot{V}_g$   | objemový průtok plynu  | [Nm <sup>3</sup> /s] |
|      | g             | gravitační zrychlení   | [m/s <sup>2</sup> ]  |

Pro další výpočet je třeba určit několik neznámých, které se v rovnici vyskytují. Hustoty vypočítáme využitím stavové rovnice (hodnotu tlaku je třeba uvádět v kPa):

$$\rho_{ig} = \frac{p \cdot MW_{BP}}{R \cdot T} = \frac{900 \cdot 26,1105}{8,314 \cdot 293,15} = 9,6418 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (105)$$

Stejným způsobem určíme hustotu vzduchu. Jeho molární hmotnost je za normálních podmínek 28,96 kg/kmol.

$$\rho_{vzd} = \frac{p \cdot MW_{vzd}}{R \cdot T} = \frac{900 \cdot 28,96}{8,314 \cdot 293,15} = 10,69 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (106)$$

Viskozita  $\eta_k$  v je v našem případě viskozita vody a při teplotě 20 °C a atmosférického tlaku je přibližně rovna 0,00105 Pa.s. Hustota vody  $\rho_k$  při 20 °C je 998,2 kg/kmol. Obě hodnoty byly odečteny z tabulek. Velikost rychlosti proudění bioplynu kolonou byla stanovena výpočtem v programu EXCEL na 0,0744 m/s. Hodnota konstanty C je v literatuře pro Rashigovy kroužky uváděna C=1. Pro Pall kroužky a další moderní výplňové materiály literatura

konstantu C neuvádí. Charakteristický rozměr výplňových částic je  $d_p = 50$  mm (tab. 8). Nyní můžeme dosadit do rovnice (104):

$$Y = 1 \cdot \left( \frac{0,0744^2}{9,81 \cdot 0,05} \right) \cdot \left( \frac{0,00105}{0,0744 \cdot 0,05 \cdot 9,6418} \right)^{0,1} \cdot \left( \frac{998,2}{998,2} \right)^2 \cdot \left( \frac{9,6418}{10,69} \right)^{0,85} \quad (107)$$

$$Y = 0,0072$$

Z předchozích výpočtů lze určit hodnotu souřadnice X.

$$X = \frac{\dot{V}_k}{\dot{V}_g} = \frac{\frac{m_C}{\rho_k}}{\frac{m_{lg}}{\rho_{lg}}} = \frac{177\,520,395 \cdot 9,6418}{1000 \cdot 998,2} = 1,71 \quad (108)$$

Z vypočítaných souřadnic [X,Y] je patrné, že Rammova diagramu v našem případě nelze použít. Diagram v těchto mezích není definován. Abychom určili, v jakém režimu se nachází, bylo použito regresních funkcí k určení bodů plnění a zahlcení  $Y_p$ ,  $Y_z$ . Konstanty pro jejich výpočet uvádí tab. 15.

| mez plnění |             | mez zahlcení |            |
|------------|-------------|--------------|------------|
| $A_0$      | -5,04913    | $A_0$        | -4,56306   |
| $A_1$      | -2,03131    | $A_1$        | -1,95296   |
| $A_2$      | -0,228      | $A_2$        | -0,219582  |
| $A_3$      | -0,00877013 | $A_3$        | -0,0107011 |

**Tab. 15. Konstanty regresních funkcí**

$$Y = e^{(A_0 + A_1 \cdot \ln X + A_2 \cdot \ln^2 X + A_3 \cdot \ln^3 X)} \quad (109)$$

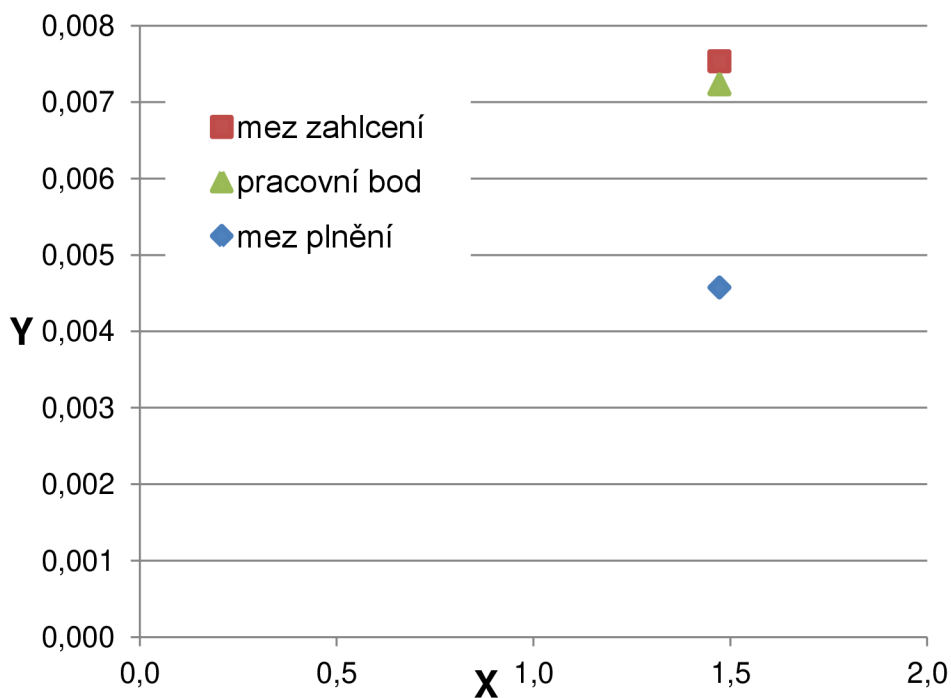
$$Y_p = e^{(-5,04913 + (-2,03131) \cdot \ln 1,71 + (-0,228) \cdot \ln^2 1,71 + (-0,00877 \cdot \ln^3 1,71))} \quad (110)$$

$$Y_z = 0,00457$$

$$Y_z = e^{(-5,04913 + (-2,03131) \cdot \ln 1,71 + (-0,228) \cdot \ln^2 1,71 + (-0,00877 \cdot \ln^3 1,71))} \quad (111)$$

$$Y_z = 0,00753$$

Pracovní oblast navržené absorpční kolony znázorňuje obr. 20 . Kolona byla navrhována tak, aby byla splněna podmínka práce těsně pod mezí zahlcení. V sestaveném výpočtu v programu EXCEL byly měněny parametry průměru  $d$  a násobku  $L_{min}$ , tak aby pracovní režim co nejvíce odpovídal této podmínce.



Obr. 20 Pracovní oblast absorpční kolony

V programu EXCEL byla také stanovena pomocí funkce „Řešitel“ kritická rychlost proudění bioplynu  $\bar{c}_{g \text{ krit}}$ . Rychlost odpovídá mezi zahlčení  $Y_Z$ . Tato hodnota byla dosazena do rovnice (104) a byla vypočtena neznámá hodnota kritické rychlosti. Aby absorpční kolona pracovala správně, nesmí bioplyn proudící přes náplň přesáhnout hodnotu  $\bar{c}_{g \text{ krit}} = 0,076$  m/s. Pracovní rychlost určená v programu EXCEL tvoří přibližně 97 % rychlosti kritické. Podle doporučení by však měla být pracovní rychlost 70 až 90 % rychlosti kritické. Tato skutečnost při prvotním výpočtu nebyla zohledněna a předejití problému zahlčení by mělo být ještě blíže prozkoumáno. Rychlost proudění nejvíce ovlivňuje průměr kolony. Například již při zvětšení průměru z 2,18 m na 2,28 m a zachování stávajících podmínek, klesne rychlost na 89 % rychlosti kritické.

#### 8.4.2. Tlaková ztráta

Jednou z důležitých veličin, kterou musí navrhovatel důkladně zvážit při projektování náplňové kolony, je tlaková ztráta protékajícího plynu. Je-li hlavní difuzní odpor na plynné straně, bude se projektant snažit zvětšit rychlost plynu, aby zvětšil výměnu plochy, a použije náplně menších rozměrů, aby zvětšil výměnný povrch. Pro zajištění dobrého smáčení povrchu náplně bude dále volit větší rychlost kapaliny. Všechny tyto zásady však vedou ke vzrůstu tlakové ztráty plynu, což vyžaduje vynaložení mechanické práce navíc. Často však, zejména při malých průtocích, určuje přípustnou tlakovou ztrátu jiný činitel, a to volba typu dmyhadla nebo ventilátoru, jehož výkon je omezen konstrukčními podmínkami [37].

Pro určení tlakové ztráty při dvoufázovém protiproudém toku lze využít Rammova diagramu. Stanovený pracovní bod leží vždy na určité parametrické křivce a lze tedy odečíst hodnotu jednotkového tlakového spádu. Skutečnou tlakovou ztrátu „mokré“ přepážky vypočítáme z následujícího vztahu [38]:

$$\Delta p_m = \frac{\Delta p}{h} \cdot h \quad (112)$$

Kvůli omezenému rozsahu Rammova diagramu není nemožné pro výpočet tlakové ztráty z něho vycházet. Proto i zde bylo k určení tlakové ztráty užito regresní funkce. Konstanty jsou uvedeny v tab. 16.

|       |       |       |          |
|-------|-------|-------|----------|
| $A_0$ | 18,00 | $A_4$ | -0,1188  |
| $A_1$ | 5,16  | $A_5$ | 0,035159 |
| $A_2$ | 1,49  | $A_6$ | 0,005751 |
| $A_3$ | 0,72  |       |          |

**Tab. 16. Konstanty regresní funkce pro ztrátu tlaku**

Pro výpočet tlakové ztráty v 1 m náplně, tedy jednotkový tlakový spád  $\frac{\Delta p}{h}$ , byla použita rovnice (113).

$$\frac{\Delta p}{h} = e^{(A_0 + A_1 \cdot \ln X + A_2 \cdot \ln Y + A_3 \cdot \ln^2 X + A_4 \cdot \ln^2 Y + A_5 \cdot \ln^3 X + A_6 \cdot \ln^3 Y)} \quad (113)$$

$$\frac{\Delta p}{h} = e^{(18 + 5,16 \cdot \ln 1,47 + 1,49 \cdot \ln 0,072 + 0,72 \cdot \ln^2 1,47 + (-0,1188) \cdot \ln^2 0,072 + 0,0035 \cdot \ln^3 1,47 + 0,005751 \cdot \ln^3 0,072)}$$

$$\frac{\Delta p}{h} = 9644,43 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}$$

Celkovou tlakovou ztrátu vypočítáme dosazením vypočítané výšky náplně do rovnice (112):

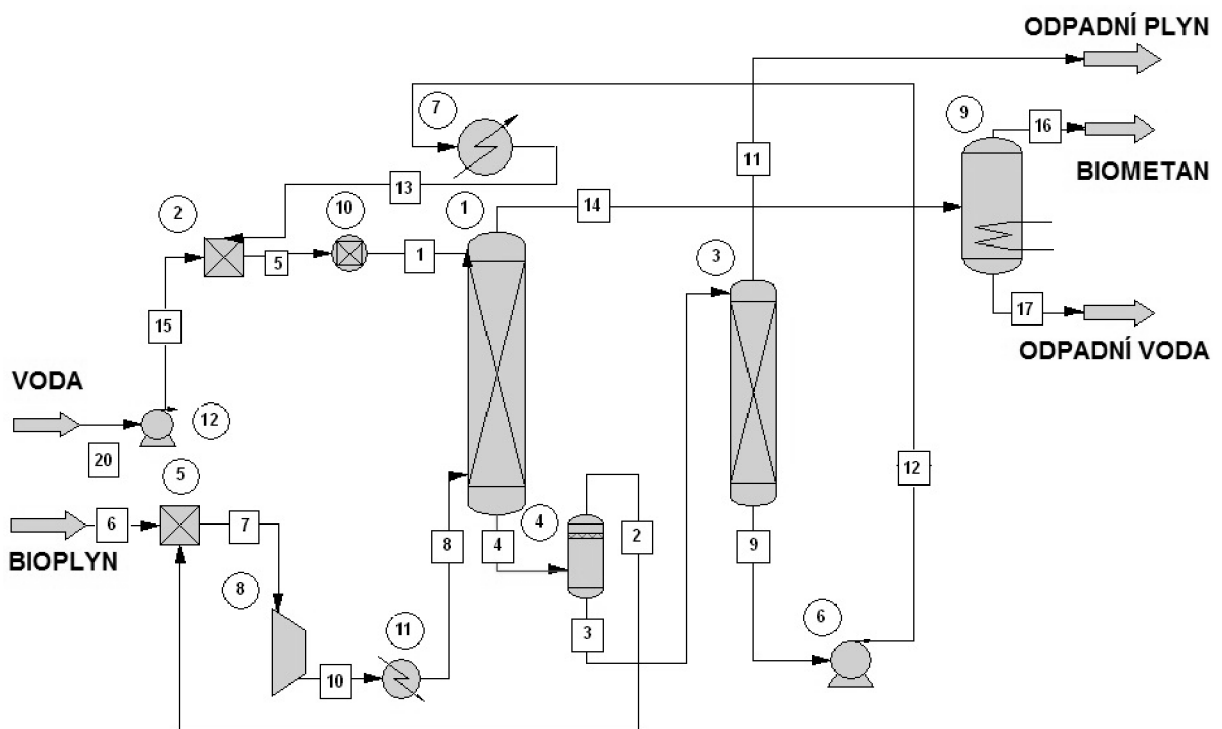
$$\Delta p_m = \frac{\Delta p}{h} \cdot h = 9644,43 \cdot 10,58 \approx 102\,038 \text{ Pa} \approx 1,02 \text{ bar} \quad (114)$$

S přihlédnutím k připočítané rezervě ( $h = 11 \text{ m}$ ) pak celková tlaková ztráta činí 1,06 barů. Tlakovou ztrátu stejně jako rychlost proudění bioplynu ovlivňuje při výpočtech průměr kolony. Jak bylo zmíněno v předešlé kapitole, tak i zde zvětšení průměru na 2,28 m silně ovlivní tlakovou ztrátu, jejíž hodnota klesne téměř na polovinu. Při zachování výšky 11 m činí 0,62 barů.

## 9. SIMULAČNÍ MODEL MOKRÉ VYPÍRKY

Simulace procesu byla provedena pomocí programu CHEMCAD. Tento program slouží především k simulování chemických procesů a jde pouze o názornou ukázkou. Program neslouží k návrhářským výpočtům zařízení a nelze pomocí něj stanovit rozměry zařízení jako v předešlých výpočtech. Při simulacích jsou však především ceněny bilanční výpočty procesů. Program pracuje na sekvenčním principu výpočtu. Musí být tedy zadány všechny informace týkající se vstupních proudů a všechny parametry operací v jednotlivých zařízeních. Cílem je stanovit všechny parametry výstupních proudů z celého procesu.

Nejprve bylo sestaveno schéma celého procesu (obr. 21 tab. 17) s připuštěním určitých zjednodušení. Například využití komponent separátoru namísto adsorpčního sušení biometanu z důvodu obtížné simulace procesu adsorpce. Dále byla nadefinována jednotlivá zařízení především pracovní tlaky a teploty v kolonách. V absorpční koloně byly nastaveny parametry vycházející s předešlých výpočtů, jako průřez kolony, typ tělísk, jejich specifický povrch a výška náplně. Po zadání vstupních dat bioplynu vycházejících z tab. 7 a nastavení regulačního prvku, aby do absorpční kolony bylo přiváděno stanovené množství vody 9854 kmol/h (nastaveno 10 000 kmol/h), byl spuštěn výpočet. Výsledky bilančního výpočtu znázorňuje tab. 18. Nejdůležitějším výstupem je biometan, proto nejsou ostatní výstupní proudy uváděny.



Obr. 21 Schéma procesu mokré vypírky

|   |                  |    |           |
|---|------------------|----|-----------|
| 1 | absorpční kolona | 7  | výměník   |
| 2 | směšovač         | 8  | kompresor |
| 3 | desorpční kolona | 9  | separátor |
| 4 | flash kolona     | 10 | regulátor |
| 5 | směšovač         | 11 | výměník   |
| 6 | čerpadlo         | 12 | čerpadlo  |

Tab. 17. Specifikace zařízení (v kroužku)

| Proud č.                         | 6         | 20        | 16        |
|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Název proudu                     | Bioplyn   | Voda      | Biometan  |
| Molární průtok [kmol/h]          | 44,6157   | 200,0636  | 29,3911   |
| Hmotnostní průtok [kg/h]         | 1154,5718 | 3604,1457 | 495,6092  |
| Teplota [°C]                     | 36        | 20        | 20        |
| Tlak [bar]                       | 1,01325   | 1,01325   | 9         |
| Objemové složení [%]             |           |           |           |
| Metan [CH <sub>4</sub> ]         | 64,1      | 0         | 95,987737 |
| Oxid uhličitý [CO <sub>2</sub> ] | 34,5      | 0         | 1,970866  |
| Dusík [N <sub>2</sub> ]          | 0,95      | 0         | 1,439649  |
| Kyslík [O <sub>2</sub> ]         | 0,4       | 0         | 0,601668  |
| Voda [H <sub>2</sub> O]          | 0         | 100       | 0         |
| Sulfan [H <sub>2</sub> S]        | 0,05      | 0         | 0,000073  |

**Tab. 18. Hodnoty ze simulačního modelu**

Z výsledků je patrné, že i když bylo dosaženo požadovaných 2% obj. CO<sub>2</sub> v biometanu, tak výsledná hodnota CH<sub>4</sub> byla 96 % obj. To je způsobeno nárůstem množství kyslíku a dusíku po průchodu technologií. Pro úspěšné řešení technologie, kdy může být biometan použit jako náhrada zemního plynu (<95 %) nebo jako palivo pro vozidla (>97 % CH<sub>4</sub>), je proto nutné stanovit postupy snížení nežádoucích příměsí (CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, atd.) ve výsledném produktu a navrhnout účinná a investičně dostupná zařízení na jeho dočištění. Pro srovnání jsou v tab. 19 uvedeny požadavky na kvalitu biometanu pro možnost jeho dodávky do plynárenských sítí v ČR dle TPG 902 02.

| Složka                        | Obsah                      | Složka                  | Obsah                          |
|-------------------------------|----------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| Metan CH <sub>4</sub>         | > 95 % obj.                | Kyslík O <sub>2</sub>   | <0,5 % obj.                    |
| Oxid uhličitý CO <sub>2</sub> | < 5 % obj.                 | Voda H <sub>2</sub> O   | < 10 ppm                       |
| Dusík N <sub>2</sub>          | < 2 % obj.                 | Vodík H <sub>2</sub>    | < 0,2 % obj.                   |
| Sulfan H <sub>2</sub> S       | < 7 mg/m <sup>3</sup>      | Amoniak NH <sub>3</sub> | nepřítomen                     |
| Síra (bez odorantů)           | < 30 mg/m <sup>3</sup>     | Halogenové sloučeniny   | < 1,5 mg (Cl+F)/m <sup>3</sup> |
| Merkaptanová síra             | < 5 mg/m <sup>3</sup>      | Mlha, prach, kondenzáty | nepřítomny                     |
| Organické sloučeniny křemíku  | < 6 mg (Si)/m <sup>3</sup> |                         |                                |

**Tab. 19. Požadavky dle TPG 902 02**



## 10. EKONOMICKÉ NÁKLADY

Protože v České republice doposud nebylo instalováno žádné zařízení na úpravu bioplynu tlakovou vodní vypírkou, budou zde uvedeny pouze teoretické provozní náklady simulovaného procesu na provoz zařízení a pro srovnání investiční a provozní náklady zařízení získaných z provozů běžně používaných v zahraničí. Všechnu údaje lze brát pouze jako orientační, protože roční náklady se u každé konkrétní bioplynové stanice liší v závislosti na druhu a získávání surovin na výrobu bioplynu a následně jeho získané kvality.

### 10. 1. Teoretické náklady simulovaného procesu

Ze simulované technologie vodní vypírky byly získány příkony jednotlivých zařízení, tepelné výkony výměníků a množství vody dodávané do technologie. Všechny uvedené hodnoty (tab. 20) se podílí na provozních nákladech.

| Příkon zařízení                           |                                   |
|---|-----------------------------------|
| Komprese bioplynu                         | 125,641 kW                        |
| Čerpadlo recyklované vody                 | 31,303 kW                         |
| Čerpadlo surové vody                      | 0,9433 kW                         |
| <b>Celkový příkon zařízení</b>            | ≈ 158 kW                          |
| <b>Množství odebraného tepla výměníky</b> | 668,945 MJ/h                      |
| <b>Množství doplňované vody</b>           | 3604 l/h (3,61 m <sup>3</sup> /h) |

**Tab. 20. Provozní náklady zařízení**

Při uvažování provozu 8600 hodin ročně, ceně 4,5 Kč/kWh<sup>1</sup> elektrické energie a 35 Kč/m<sup>3</sup> vody<sup>2</sup>, činí teoretické roční náklady na provoz těchto zařízení přibližně 14 388 200 Kč. Protože se jedná pouze o teoretický model, kde není uvažována kogenerace, která je běžně na bioplynových stanicích využívána pro snížení nákladů na elektrickou a tepelnou energii, jsou provozní náklady enormně vysoké a nejsou srovnatelné s provozními náklady uváděnými výrobcí na trhu. Je to také do určité míry dáno rozdílnou cenou za elektrickou energii na trhu, kterou např. německá firma DMT Dirkse Milieutechniek uvádí 0,05€/kWh (≈1,25 Kč/kWh<sup>3</sup>). K celkovým ročním nákladům na čištění bioplynu je také třeba ještě přičíst investiční náklady a náklady na obsluhu a údržbu zařízení. Vzhledem k nedostatkům těchto informací nebyly tyto náklady u simulovaného procesu počítány.

### 10. 2. Náklady na reálná zařízení

Jako příklad budou uvedeny náklady firmy DMT Dirkse Milieutechniek na provoz zařízení tlakové vodní vypírky DMT TS-PWS® PROCESS o různých kapacitách vstupního bioplynu (tab. 21). Cena za elektrickou energii je uvedena 0,05 €/ kWh (≈1,25 Kč/kWh), za vodu 1,50 €/m<sup>3</sup> (≈37,5Kč/kWh). Provozní doba zařízení je uvažována 8600 h ročně. Z tabulky vyplývá, že celková cena zahrnující investiční i provozní náklady pro zařízení o kapacitě 1000 m<sup>3</sup>/h ročně je 383 500 € (≈9 537 645 Kč). Nutno také uvést, že v je tomto procesu , jak

<sup>1</sup> Průměrná cena za kWh elektrické energie v ČR (mění se v závislosti na regionu a dodavateli)

<sup>2</sup> Průměrná cena za m<sup>3</sup> vody v ČR (mění se v závislosti na regionu a dodavateli)

<sup>3</sup> Kurz – 24.870 Kč/1 € (Česká národní banka)

uvádí výrobce, 60-70% elektrické energie získáno rekuperací tepla. Tudiž náklady na elektrickou energii výrazně poklesnou. Z tabulky je také patrné, že se vzrůstající kapacitou zařízení, klesá cena za vyrobený m<sup>3</sup> biometanu a v našem případě by to bylo 0,069 €/ kWh (≈1,71Kč/kWh). Výhodnější je tedy instalovat vodní vypírku na bioplynové stanice s vyšším výkonem. Toto obecně platí pro všechny technologie odstraňování CO<sub>2</sub> z bioplynu.

| Kapacita bioplynu   | 250 m <sup>3</sup> /h | 500 m <sup>3</sup> /h | 750 m <sup>3</sup> /h | 1000 m <sup>3</sup> /h | 2000 m <sup>3</sup> /h |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| <b>Investiční náklady [€]</b>   | 72 500                | 97 000                | 120 000               | <b>145 000</b>         | 195 000                |
| <b>Údržba [€]</b>   | 25 000                | 40 000                | 60 000                | <b>75 000</b>          | 100 000                |
| <b>Obsluha [€]</b>  | 10 000                | 12 000                | 15 000                | <b>17 500</b>          | 20 000                 |
| <b>El. energie [€]</b>  | 30 000                | 55 000                | 86 000                | <b>107 500</b>         | 193 500                |
| <b>Voda [€]</b>   | 8 050                 | 16 125                | 24 188                | <b>32 250</b>          | 64 500                 |
| <b>Chemikálie [€]</b>   | 1 250                 | 2 500                 | 3 750                 | <b>5 000</b>           | 10 000                 |
| <b>Živiny [€]</b>   | 350                   | 625                   | 950                   | <b>1 250</b>           | 2 500                  |
| <b>Celkové roční náklady [€]</b>                                      | 147 150               | 223 250               | 309 888               | <b>383 500</b>         | 585 500                |
| <b>Celkové náklady za m<sup>3</sup> vyprodukovaného biometanu [€]</b> | 0,105                 | 0,0799                | 0,0739                | <b>0,06886</b>         | 0,0523                 |

**Tab. 21. Ekonomika čištění bioplynu procesem DMT ® TS-PWS [23]**

V českých podmínkách by se nákladová výrobní cena biometanu u optimálně dimenzovaných zařízení mohla pohybovat okolo 1,5 až 2,5 Kč/kWh spalného tepla, což je 2-3 krát více než je cena zemního plynu jako komodity. V Evropě se obecně prosazuje přístup podpory formou financování části investice výrobního zařízení a tím přiblížit cenu na úroveň blízkou zemnímu plynu [49] .

## 11. ZÁVĚR

Diplomová práce je zaměřena na problematiku čištění bioplynu na kvalitu zemního plynu. Nejprve bylo nutné se seznámit, za jakých podmínek biometan vzniká a jakým způsobem dosáhnout kvality pro jeho další čištění. Dle požadavků byla vytvořena obecná rešerše technologií na jeho čištění, kde byly přiblíženy nejvíce komerčně používané technologie a některé inovativní, které si stále hledají většího uplatnění na trhu. Dále byl kladen důraz na podrobnější popis technologie mokré vypírky, která byla vybrána pro podrobnější řešení.

Aby bylo možné plyn využívat jako náhradu zemního plynu, bylo nutné se seznámit s platnou legislativou a normami, které stanovují podmínky pro jeho další využití. V ČR se jedná především o normy a předpisy přejaté ze skandinávských zemí.

Hlavní částí práce byl návrh technologie mokré vypírky. Na základě provozních zkušeností získaných z literatury byl sestaven PFD diagram pro zadané podmínky a tato konkrétní technologie spolu s nejdůležitějšími aparáty vyskytujícími se v ní podrobněji popsány. Získány tak byly alespoň teoretické znalosti funkčnosti zařízení vyskytujících se v procesu mokré vypírky. Následně byl proveden návrh a výpočet hlavního aparátu, tedy absorpční kolony. Stanoven byl průtok  $1000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ . Kolona byla navrhována na typické složení bioplynu z anaerobní fermentace. V programu EXCEL byl sestaven výpočet, v němž na základě voleného minimálního množství vypírací vody a průměru absorpční kolony byl hledán optimální pracovní režim při několika omezeních vstupujících do výpočtu. Jednotlivé kroky jsou v práci podrobně popsány. Výsledkem byly hlavní rozměry náplně a potřebné množství vypírací vody k získání požadované kvality vyčištěného bioplynu. Z těchto dat byl vytvořen výkres basic design absorpční kolony. Výpočet byl sestaven z modelových situací uváděných v literatuře týkající se výpočtu a návrhu absorpčních kolon, nicméně není možné brát získané výsledky jako konečné a v praxi ověřené.

Simulace procesu byla provedena pomocí programu CHEMCAD, který slouží k simulování chemických procesů. Jde pouze o názornou ukázkou, jak by daná technologie mohla pracovat. V sestaveném modelu byly využity některé údaje získané z návrhu absorpční kolony. Cílem bylo stanovit parametry výstupních proudů procesu. Oblastí zájmu byl hlavně výstup vyčištěného bioplynu. Získaný produkt obsahoval poměrně vysoké hodnoty  $\text{CH}_4$  (cca 96% obj.), nicméně k jeho dalšímu použití by bylo třeba v něm snížit vhodnou metodou množství kyslíku a dusíku. Ze získaných dat ze simulovaného procesu byla získána data, z nichž byly vypočítány teoretické provozní náklady. Protože se jednalo pouze o ilustrativní případ, kde nebylo uvažováno další využití vznikajícího tepla, vyšly tyto náklady enormně vysoké. Proto byly pro srovnání uvedeny provozní a investiční náklady z reálných provozů.

Jako doplnění diplomové práce a získání dat k výpočtům, byl vytvořen matematický výpočet rozpustností  $\text{CO}_2$  a  $\text{CH}_4$  v závislosti na teplotě a tlaku.

V dnešní době, kdy je v moderním světě kladen důraz na získávání alternativních paliv z obnovitelných zdrojů, je problematika čištění bioplynu více než aktuální. Prozatím je v Evropě výsadou zejména ve skandinávských zemích, Německu a ve Švýcarsku. V době tvorby této práce vetoval prezident České republiky navrhovaný zákon o podporovaných zdrojích energie, který by vytvořil vhodnější podmínky k čištění bioplynu v ČR.

Aktuální informací je, že 10. 5. 2012 Sněmovna přehlasovala veto prezidenta a setrvala tak na zákonu o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů. Nový zákon pro bioplynové stanice zavádí podporu, kterou by investoři mohli získat již od příštího roku, pokud ERÚ stanoví pro biometan konkrétní výši zvýhodněné výkupní ceny či zeleného bonusu.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ČERMÁKOVÁ, J; TENKRÁT, D. *Biomethan jako alternativní palivo pro pohon motorových vozidel. Aproxem 2010 - Sborník přednášek 1. díl.* 2010. 1433-1437 s. ISBN: 978-80-02-02212-1.
- [2] SCHULZ, Heinz. *Bioplyn v praxi: teorie - projektování - stavba zařízení - příklady.* 1. české vyd. Ostrava: HEL, 2004, 167 s. ISBN 80-861-6721-6.
- [3] PETERSON, A; WELLINGER, A. *Biogas upgrading technologies : developments and innovations.* In [online]. [s.l.]: IMPRESSUM, 2009 [cit. 2011-12-18]. Dostupné z: <[http://www.iea-biogas.net/\\_content/publications/publications.php](http://www.iea-biogas.net/_content/publications/publications.php)>.
- [4] STRAKA, F. a kol. *Bioplyn: [příručka pro výuku, projekci a provoz bioplynových systémů].* 2., rozš. a dopl. vyd. Praha [i.e. Říčany u Prahy]: GAS, 2006, 706 s. [cit. 2011-23-12]. ISBN: 80-7328-090-6.
- [5] DEUBLEIN, D; STEINHAUSER, A. *Biogas from waste and renewable resources an introduction.* Weinheim [Germany]: Wiley-VCH, 2008, s. 52 [cit. 2011-12-22]. ISBN: 978-3-527-31841-4.
- [6] DOHÁNYOS M. a kol., *Anaerobní čistírenské technologie*, NOEL, Brno (1998), [cit. 2012-1-1]. ISBN 80-86020-19-3.
- [7] PROCHÁZKOVÁ, A.; CIAHOTNÝ, K.; VRBOVÁ, V.; POSPĚCH, L. *Separace CO<sub>2</sub> z bioplynu na kvalitu zemního plynu. Aproxem 2010 - Sborník přednášek 1. díl.* 2010. 1455-1462 s. ISBN: 978-80-02-02212-1.
- [8] WELLINGER, A; LINDBERG, A. *Biogas upgrading and utilisaton: Energy from biological conversion of organic waste. IEA Bioenergy* [online]. 2001, s. 1-20 [cit. 2011-12-21]. Dostupné z: <[http://www.iea-biogas.net/\\_download/publi-task37/Biogas\\_upgrading.pdf](http://www.iea-biogas.net/_download/publi-task37/Biogas_upgrading.pdf)>.
- [9] ZÁBRANSKÁ, J. Externí biologické odsiřování bioplynu. *Bioplyn 2011: Mezinárodní konference.* Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, s. 11 [cit. 2012-3-9].
- [10] LICHTFOUSE, E. *Environmental chemistry for a sustainable world* [online]. Volume 2. New York: Springer, 2011 [cit. 2012-03-15]. ISBN 978-940-0724-389. Dostupné z: <<http://books.google.cz/books?id=-M0IRBMuWygC&printsec=frontcover&hl=cs#v=onepage&q&f=false>>.
- [11] ELECTRIGAZ. *Biogas upgrading and grid injection in the Fraser Valley, British Columbia.* [online]. 2008, 1-152 [cit. 2012-01-07]. Dostupné z: <<http://www.catalystpower.ca/studies.html>>.
- [12] PROCHÁZKOVÁ, A; CIAHOTNÝ, K; VRBOVÁ, V a POSPĚCH, L. *Eliminace obsahu organokřemičitých látek z bioplynu: provozní zkušenosti z ÚČOV Praha* [online]. Praha: PCHE - PetroCHemEng, 2010 [cit. 2012-03-14]. ISBN 978-80-02-02212-1.



- Dostupné z: <[http://www.isvav.cz/resultDetail.do;jsessionid=CD8FA31C4510611188227AE8E84669C3?rowId=RIV%2F60461373%3A22320%2F10%3A00023959!RIV11-MSM-22320\\_\\_\\_](http://www.isvav.cz/resultDetail.do;jsessionid=CD8FA31C4510611188227AE8E84669C3?rowId=RIV%2F60461373%3A22320%2F10%3A00023959!RIV11-MSM-22320___)>.
- [13] Strategická výzkumná agenda: dokument národní technologické platformy. [online]. České Budějovice: Asociace NGV o. s., 2011 [cit. 2012-03-16]. Dostupné z: <[http://www.ngva.cz/file/NGVA\\_SVA\\_ver\\_final.pdf](http://www.ngva.cz/file/NGVA_SVA_ver_final.pdf)>.
- [14] TZIMAS, E.; PETEVES, S.. INSTITUTE FOR ENERGY. Controlling carbon emissions: the option of carbon sequestration. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2003. ISBN 92-894-5751-1.
- [15] PERSSON, M. Evaluation of Upgrading Techniques for Biogas: Rapport SGC / Svenskt gastekniskt center. 2003. ISSN 1102-7371. Dostupné z: <http://www.sgc.se/uk/index.asp>
- [16] MEZEL, S. Biogas to biomethane a proven option for on-farm energy production, [online]. QuestAir [cit. 2012-03-16]. Dostupné z: <<http://www.epa.gov/agstar/documents/conf07/mcdonald.pdf>>.
- [17] VRBOVÁ, V.; CIAHOTNÝ, K. *Separace CO<sub>2</sub> z bioplynu na kvalitu zemního plynu. Aprochem 2010 - Sborník přednášek 1. díl.* 2010. 5 s. ISBN: 978-80-02-02212-1.
- [18] PERSSON, M. Rapport SGC / Svenskt gastekniskt center. 2003, s. 75. ISSN 1102-7371. Dostupné z: <<http://www.sgc.se/display.asp?ID=1225&Typ=Rapport&Menu=Rapporter>>.
- [19] BIEL, M., HOFFSTEDTE, U. ISET, Division Bio-energy Systems Technology “European Biomethane Fuel Conference”, Göteborg/Sweden, 2009. [cit. 2012-01-06]. Dostupné z: <[http://www.biogasmax.eu/media/3t3\\_overview\\_on\\_upgrading\\_iset\\_\\_062510600\\_0654\\_30092009.pdf](http://www.biogasmax.eu/media/3t3_overview_on_upgrading_iset__062510600_0654_30092009.pdf)>.
- [20] BENJAMINSSON, J. *New biogas upgrading techniques: 2nd Nordic Biogas Conference* [online]. BioMil AB, 2008 [cit. 2012-01-06]. Dostupné z: <<http://www.sgc.se/nordicbiogas/programme.asp>>.
- [21] SCOTT, S. *Biogas Clean-Up Technologies: Anaerobic Digestion – A New Market Opportunity* [online]. 2011 [cit. 2012-01-06]. Dostupné z: <[http://www.uk-cpi.com/2\\_files/PDF/anaerobic-igestion/Xebec%20Steven%20Scott.pdf](http://www.uk-cpi.com/2_files/PDF/anaerobic-igestion/Xebec%20Steven%20Scott.pdf)>
- [22] DE HULLU, J. a kol. Comparing different biogas upgrading techniques: Interim report. [online]. Eindhoven University of Technology, 3. dubna 2008, 1-23 [cit. 2012-01-07]. Dostupné z: <<http://students.chem.tue.nl/ifp24/Interim%20report%20Biogas.pdf>>.
- [23] The DMT Carborex® PWS biogas upgrading system. DMT: Environmental Technology [online]. [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: <[http://www.dirkse-milieutechniek.com/dmt/do/webPages/200941/DMT\\_TS-PWS\\_Biogas\\_upgrading.html](http://www.dirkse-milieutechniek.com/dmt/do/webPages/200941/DMT_TS-PWS_Biogas_upgrading.html)>.
- [24] ČERMÁKOVÁ, J., TENKRÁT, D. Efektivní zhodnocení bioplynu. *Biom.cz* [online]. 2011-08-22 [cit. 2012-01-24]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/efektivni-zhodnoceni-bioplynu>>. ISSN: 1801-2655.

- [25] ČERMÁKOVÁ, Jiřina: Nové trendy ve využití bioplynu. Sborník příspěvků ze semináře „Energie z biomasy X“, VUT v Brně, 2009, ISBN 978-80-214-4027-2
- [26] Bioplyn. *RWE: Energy to lead* [online]. [cit. 2012-01-24]. Dostupné z: <<http://www.rwe-gasnet.cz/cs/bioplyn/>>.
- [27] ČTK. V Česku přibývá bioplynových stanic, je jich přes 230. *Zemědělský týdeník* [online]. [cit. 2012-01-23]. Dostupné z: <<http://www.zemedelskytydenik.cz/hlavni-strana/3134-3>>.
- [28] SCHAUHUBEROVÁ, M. Alternativní pohon vozidel: CNG a bioplyn [online]. Kouty nad Desnou: OZE 2011 [cit. 2012-01-24]. Dostupné z: <<http://www.cemc.cz/OZE2011/112.pdf>>.
- [29] ŠIKOLA, L. Nový zákon o OZE schválený Senátem přináší řadu pozitivních změn. *Ekolist.cz* [online]. 2012 [cit. 2012-01-26]. Dostupné z: <<http://ekolist.cz/cz/zpravodajstvi/tiskove-zpravy/novy-zakon-o-oze-schvaleny-senatem-prinasi-radu-pozitivnich-zmen>>.
- [30] Tisková zpráva: CzBA nesouhlasí s tvrzením ERÚ, že podpora biometanu je hrozbou. *CzBA* [online]. 8. 1. 2012 [cit. 2012-01-24]. Dostupné z: <<http://www.czba.cz/index.php?art=novinky&parent=tiskova-zprava-czba-nesouhlasis-tvrzenim-eru-ze-podpora-biometanu-je-hrozbou>>.
- [31] Biogas Products Ltd: Biogas Refining. [online]. 2012 [cit. 2012-04-06]. Dostupné z: <<http://www.biogasproducts.co.uk/index.php>>.
- [32] ENVIRONTEC. Condensate Pot CP [online]. [cit. 2012-04-12]. Dostupné z: <[http://environtec.at/frontend/scripts/index.php?groupId=30052&setMainAreaTemplatePath=maimaina\\_productlist.html](http://environtec.at/frontend/scripts/index.php?groupId=30052&setMainAreaTemplatePath=maimaina_productlist.html)>.
- [33] BIBUS. *Lamelové kompresory a vývěvy*. BIBUS [online]. 2011 [cit. 2012-04-17]. Dostupné z: <<http://www.bibus.cz/cs/prehled-produktu/environmentalni-technologie/aeracni-zarizeni/lamelove-kompresory-a-vyvevy/>>.
- [34] Design Detail. Ro-Flow: Compressors, LCC [online]. [cit. 2012-04-17]. Dostupné z: <[http://www.roflocompressors.com/index.php?option=om\\_content&view=article&id=92&Itemid=158](http://www.roflocompressors.com/index.php?option=om_content&view=article&id=92&Itemid=158)>.
- [35] FLOTECH. *Biogas Upgrading* [online]. BDA Communications, 2010 [cit. 2012-04-17]. Dostupné z: <<http://www.flotech.com/biogas.htm>>.
- [36] Heat Exchangers Biogas - Water. INTERFLOW CO., Ltd. INTERFLOW CO., LTD.: steam/ air/ water/ oil heating & cooling products [online]. 2008 [cit. 2012-04-27]. Dostupné z: <[http://www.interflow-th.com/newup\\_plateheatexchanger\\_shell-tube\\_conflo.html#BIO](http://www.interflow-th.com/newup_plateheatexchanger_shell-tube_conflo.html#BIO)>.
- [37] HOBLER, Tadeusz. Absorpce. Praha: SNTL, 1967, 449 s.



- [38] MEDEK, Jaroslav. *Hydraulické pochody*. Vyd. 4., V Akademickém nakl. CERM 1. Brno: CERM, 2004, 339 s. ISBN 80-214-2640-3.
- [39] AIR POLLUTION CONTROL SYSTEMS. CROLL REYNOLDS. Croll Reynolds: *Process Vacuum/Air Pollution Control* [online]. 2011 [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: <<http://www.croll.com/airpollutioncontrol.php>>.
- [40] WEILAND, P a T AHRENS. Demonstration of an optimised production system for biogas from biological waste and agricultural feedstock: Report from the technical evaluation. AGROPTI-Gas. 2006, EU-Project NNE5/2000/484, s. 49. Dostupné z: <<http://www.vafabmiljo.se/filarkiv/agroptigas/pdf/deliverable%20nr%2018.pdf>>.
- [41] Adsorption drying systems made by SILOXA. SILOXA: Take out what doesn't belong [online]. 1998 [cit. 2012-04-23]. Dostupné z: <<http://www.siloxa.com/index.php?id=45&L=1&cHash=3170f5ddcdbcbeecde55f5046575a7f890&PHPSESSID=0mgmki5bkd8mv2he7eoe9cc621>>.
- [42] MATĚJŮ, Vít: Biofiltrace vzduchu. *Biom.cz* [online]. 2005-01-31 [cit. 2012-04-27]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/biofiltrace-vzduchu>>. ISSN: 1801-2655.
- [43] Dohnal, J.: *Základní pochody chemické a potravinářské výroby, pochody hydraulické*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964. 266s.
- [44] WR ATV/VKS, Recovery, Processing and Utilization of Biogas, Working report of ATV/VKS Expert Comitee 3.8 „Biogas“, Korreesponz Abwasser, 1989, 153-164 s.
- [45] SANDER, R. *Compilation of Henry's Law Constants for Inorganic and Organic Species of Potential Importance in Environmental Chemistry* (Version 3) [online], 1999 [cit. 2012-3-11]. Dostupné na: <<http://www.henrys-law.org>>.
- [46] Česká republika. *Návrh zákona o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů*. Senát, 2011, senátní tisk č.252. Dostupné z: <<http://www.senat.cz/xqw/xervlet/pssenat/historie?action=detail&value=3036>>.
- [47] TRAMBA, D. Senát řízl do zelených dotací. Omezil biometan. *Lidovky.cz* [online]. 2012 [cit. 2012-01-24]. Dostupné z: <[http://byznys.lidovky.cz/senat-rizl-do-zelenych-dotaci-omezil-biometan-foe-/statni-pokladna.asp?c=A120112\\_164213\\_statni-pokladna\\_nev](http://byznys.lidovky.cz/senat-rizl-do-zelenych-dotaci-omezil-biometan-foe-/statni-pokladna.asp?c=A120112_164213_statni-pokladna_nev)>.
- [48] CzBA: *Česká bioplynová asociace* [online]. 2009 [cit. 2012-01-25]. Dostupné z: <<http://www.czba.cz/>>.
- [49] VOŘÍŠEK, Tomáš: Resuscitace biopaliv - biometanem. *Biom.cz* [online]. 2009-10-12 [cit. 2012-05-23]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/resuscitace-biopaliv-biometanem>>. ISSN: 1801-2655.

## SEZNAM PŘÍLOH

### PŘÍLOHA 1. Rozpustnosti CH<sub>4</sub> a CO<sub>2</sub> ve vodě

Rozpustnosti CH<sub>4</sub> a CO<sub>2</sub> ve vodě byly vypočítány na základě matematického modelu a neodpovídají přesně naměřeným hodnotám v laboratorních podmínkách, ke kterým nebyl přístup. Odchytky v těchto hodnotách jsou však minimální a pro výpočty v diplomové práci zcela postačující.

Hodnoty Henryho konstanty v závislosti na teplotě byly vypočítány podle rovnice (115) [45]:

$$k_H = k_H^\theta \times \exp\left(\frac{d \ln k_H}{d(1/T)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T^\theta}\right)\right) \quad (115)$$

|      |                            |  |  |
|------|----------------------------|--|--|
| kde: | $k_H$                      | Henryho konstanta při dané teplotě                     | $\left[\frac{\text{mol}}{\text{kg}\cdot\text{atm}}\right]$ |
|      | $k_H^\theta$               | Henryho konstanta při standardních podmínkách          | $\left[\frac{\text{mol}}{\text{atm}}\right]$               |
|      | $\frac{d \ln k_H}{d(1/T)}$ | teplotní závislost Henryho konstanty (směrnice přímky) | [K]  |
|      | T                          | teplota  | [K]  |
|      | T <sup>θ</sup>             | teplota při standardních podmínkách (298,15 K)         | [K]  |

**zdroj:** Dean [1992]

**CO<sub>2</sub>:**  $k_H^\theta = 0,034 \frac{\text{mol}}{\text{atm}}$   
 $\frac{d \ln k_H}{d(1/T)} = 2600 \text{ K}$

**zdroj:** Mackay and Shiu [1981]

**CH<sub>4</sub>:**  $k_H^\theta = 0,00132 \frac{\text{mol}}{\text{atm}}$   
 $\frac{d \ln k_H}{d(1/T)} = 2100 \text{ K}$

Pomocí Henryho zákona (rozpustnost plynné složky v rozpouštědle je přímo úměrná parciálnímu tlaku této složky nad roztokem) byly vypočítány rozpustnosti ve vodě v závislosti na teplotě při tlaku 1 atm (tab. 22). Grafickou závislost rozpustností znázorňuje obr. 22.

$$c = p \cdot k_H \quad (116)$$

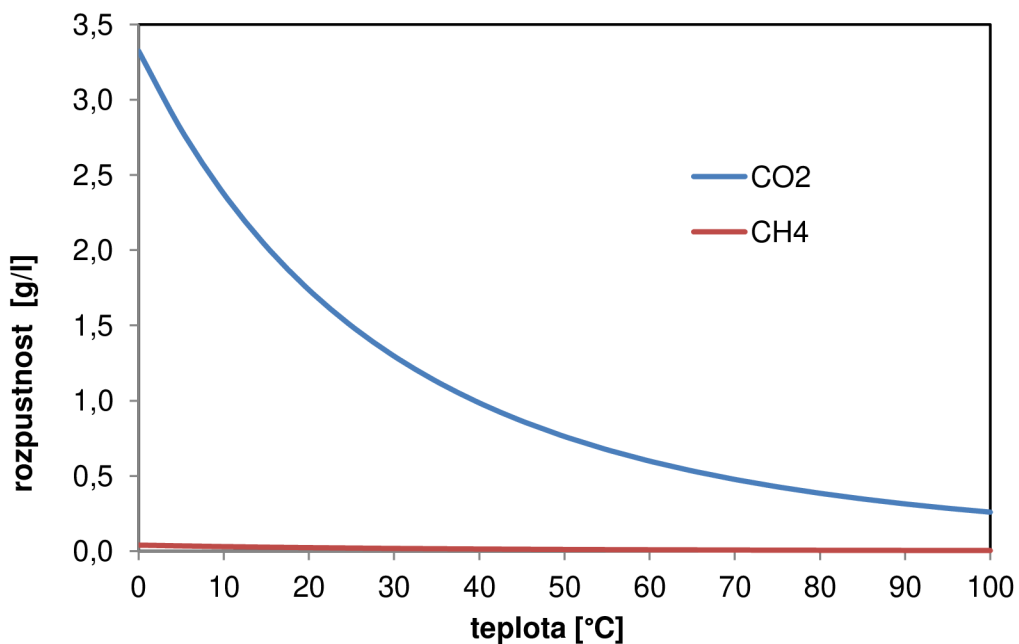
|      |       |                                    |   |
|------|-------|------------------------------------|---|
| kde: | p     | parciální tlak                     | [atm]   |
|      | $k_H$ | Henryho konstanta při dané teplotě | $\left[\frac{\text{mol}}{\text{g}\cdot\text{atm}}\right]$ |
|      | c     | rozpustnost                        | $\left[\frac{\text{mol}}{\text{kg}}\right]$               |

Rozpustnosti vypočítané podle předešlé rovnice vyjdou v jednotkách  $\frac{\text{mol}}{\text{kg}}$ . Abychom získali rozpustnosti v jednotce  $\frac{\text{g (plyn)}}{\text{l (vody)}}$ , musíme vypočítanou rozpustnost vynásobit molekulovou hmotností látky ( $\text{CO}_2 = 44,01 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$ ;  $\text{CH}_4 = 16,042 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$ ). Kilogram vody zhruba odpovídá 1 litru vody, proto je u vody jednotka kilogram nahrazena litrem.

| T [°C] | T [K]  | $k_H \left[ \frac{\text{mmol}}{\text{kg} \cdot \text{atm}} \right]$ | $c \left[ \frac{\text{g (CO}_2\text{)}}{\text{l (vody)}} \right]$ |
|--------|--------|---|---|
| 0      | 273,15 | 75,53   | 3,334   |
| 10     | 283,15 | 53,96   | 2,382   |
| 20     | 293,15 | 39,45   | 1,742   |
| 30     | 303,15 | 29,45   | 1,300   |
| 40     | 313,15 | 22,39   | 0,988   |
| 50     | 323,15 | 17,32   | 0,764   |
| 60     | 333,15 | 13,60   | 0,600   |
| 70     | 343,15 | 10,83   | 0,478   |
| 80     | 353,15 | 8,74  | 0,386   |
| 90     | 363,15 | 7,14  | 0,315   |
| 100    | 373,15 | 5,89  | 0,260   |

| T [°C] | T [K]  | $k_H \left[ \frac{\text{mmol}}{\text{kg} \cdot \text{atm}} \right]$ | $c \left[ \frac{\text{g (CH}_4\text{)}}{\text{l (vody)}} \right]$ |
|--------|--------|---|---|
| 0      | 273,15 | 2,523   | 0,0405  |
| 10     | 283,15 | 1,923   | 0,0308  |
| 20     | 293,15 | 1,493   | 0,0240  |
| 30     | 303,15 | 1,179   | 0,0189  |
| 40     | 313,15 | 0,945   | 0,0152  |
| 50     | 323,15 | 0,768   | 0,0123  |
| 60     | 333,15 | 0,632   | 0,0101  |
| 70     | 343,15 | 0,526   | 0,0084  |
| 80     | 353,15 | 0,442   | 0,0071  |
| 90     | 363,15 | 0,375   | 0,0060  |
| 100    | 373,15 | 0,321   | 0,0052  |

Tab. 22. Henryho konstanty a rozpustnosti CO<sub>2</sub> a CH<sub>4</sub> v závislosti na teplotě

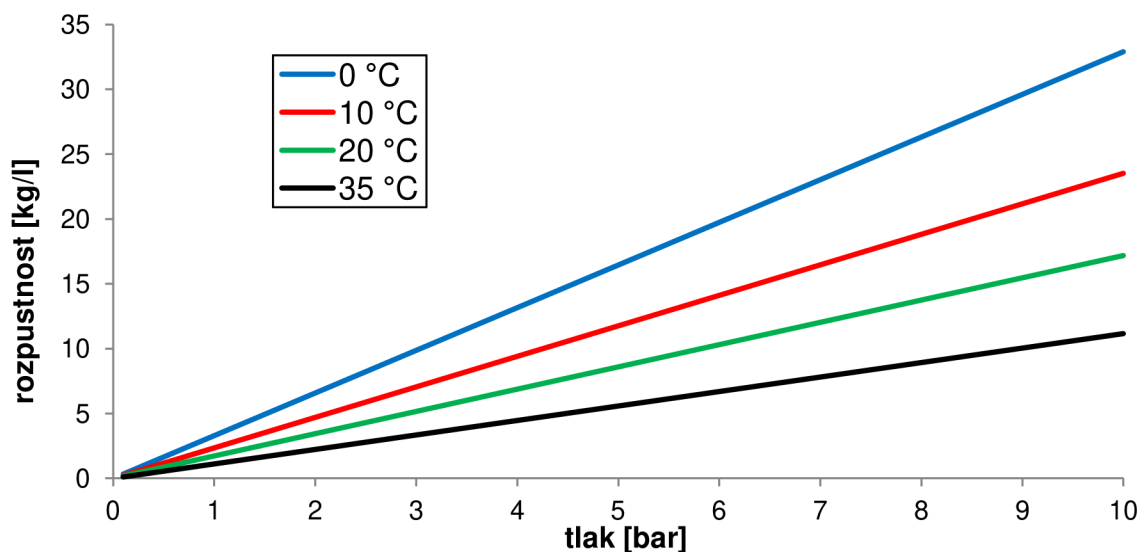


Obr. 22 Grafická závislost rozpustnosti CO<sub>2</sub> a CH<sub>4</sub> na teplotě

Rozpustnosti v závislosti na tlaku byly opět vypočítány z Henryho zákona a převedeny z hodnot tlaku v atmosférách na tlak v barech. Výsledky znázorňují tab. 23 a tab. 24 a jejich grafické závislosti pak obr. 23 a obr. 24.

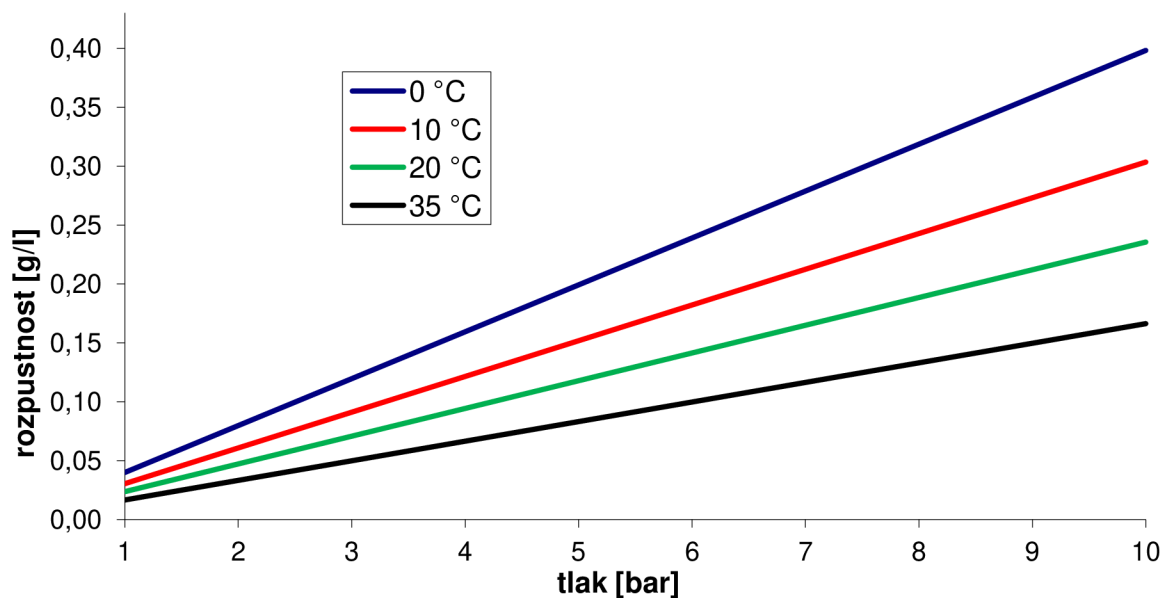
| Tlak [bar] | 1     | 2     | 3     | 3,24   | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
|------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0 °C       | 3,290 | 6,581 | 9,871 | 10,661 | 13,161 | 16,452 | 19,742 | 23,032 | 26,323 | 29,613 | 32,903 |
| 5 °C       | 2,773 | 5,546 | 8,319 | 8,984  | 11,091 | 13,864 | 16,637 | 19,410 | 22,183 | 24,956 | 27,729 |
| 10 °C      | 2,351 | 4,702 | 7,053 | 7,617  | 9,404  | 11,755 | 14,106 | 16,457 | 18,808 | 21,159 | 23,510 |
| 15 °C      | 2,005 | 4,009 | 6,014 | 6,495  | 8,019  | 10,023 | 12,028 | 14,033 | 16,037 | 18,042 | 20,047 |
| 20 °C      | 1,719 | 3,437 | 5,156 | 5,569  | 6,875  | 8,594  | 10,312 | 12,031 | 13,750 | 15,469 | 17,187 |
| 25 °C      | 1,481 | 2,962 | 4,444 | 4,799  | 5,925  | 7,406  | 8,887  | 10,368 | 11,850 | 13,331 | 14,812 |
| 30 °C      | 1,283 | 2,566 | 3,848 | 4,156  | 5,131  | 6,414  | 7,697  | 8,979  | 10,262 | 11,545 | 12,828 |
| 35 °C      | 1,116 | 2,232 | 3,348 | 3,616  | 4,464  | 5,581  | 6,697  | 7,813  | 8,929  | 10,045 | 11,161 |
| 40 °C      | 0,975 | 1,951 | 2,926 | 3,160  | 3,902  | 4,877  | 5,853  | 6,828  | 7,804  | 8,779  | 9,754  |
| 45 °C      | 0,856 | 1,712 | 2,568 | 2,774  | 3,424  | 4,281  | 5,137  | 5,993  | 6,849  | 7,705  | 8,561  |
| 50 °C      | 0,754 | 1,509 | 2,263 | 2,444  | 3,018  | 3,772  | 4,527  | 5,281  | 6,035  | 6,790  | 7,544  |
| 55 °C      | 0,667 | 1,335 | 2,002 | 2,162  | 2,670  | 3,337  | 4,004  | 4,672  | 5,339  | 6,006  | 6,674  |
| 60 °C      | 0,593 | 1,185 | 1,778 | 1,920  | 2,370  | 2,963  | 3,555  | 4,148  | 4,741  | 5,333  | 5,926  |
| 65 °C      | 0,528 | 1,056 | 1,584 | 1,711  | 2,112  | 2,640  | 3,168  | 3,696  | 4,224  | 4,752  | 5,280  |
| 70 °C      | 0,472 | 0,944 | 1,416 | 1,529  | 1,888  | 2,360  | 2,832  | 3,304  | 3,776  | 4,248  | 4,720  |
| 75 °C      | 0,423 | 0,847 | 1,270 | 1,372  | 1,693  | 2,117  | 2,540  | 2,963  | 3,387  | 3,810  | 4,234  |
| 80 °C      | 0,381 | 0,762 | 1,143 | 1,234  | 1,524  | 1,904  | 2,285  | 2,666  | 3,047  | 3,428  | 3,809  |
| 85 °C      | 0,344 | 0,687 | 1,031 | 1,114  | 1,375  | 1,718  | 2,062  | 2,406  | 2,749  | 3,093  | 3,437  |
| 90 °C      | 0,311 | 0,622 | 0,933 | 1,008  | 1,244  | 1,555  | 1,866  | 2,177  | 2,488  | 2,799  | 3,110  |
| 95 °C      | 0,282 | 0,564 | 0,847 | 0,914  | 1,129  | 1,411  | 1,693  | 1,975  | 2,257  | 2,540  | 2,822  |
| 100 °C     | 0,257 | 0,513 | 0,770 | 0,832  | 1,027  | 1,283  | 1,540  | 1,797  | 2,054  | 2,310  | 2,567  |

Tab. 23. Rozpustnost CO<sub>2</sub> v závislosti na tlaku v g/l



Obr. 23 Grafická závislost rozpustnosti CO<sub>2</sub> v závislosti na tlaku

| Tlak [bar] | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0 °C       | 0,0399 | 0,0799 | 0,1198 | 0,1598 | 0,1997 | 0,2396 | 0,2796 | 0,3195 | 0,3595 | 0,3994 |
| 5 °C       | 0,0348 | 0,0696 | 0,1044 | 0,1391 | 0,1739 | 0,2087 | 0,2435 | 0,2783 | 0,3131 | 0,3478 |
| 10 °C      | 0,0304 | 0,0609 | 0,0913 | 0,1218 | 0,1522 | 0,1827 | 0,2131 | 0,2435 | 0,2740 | 0,3044 |
| 15 °C      | 0,0268 | 0,0535 | 0,0803 | 0,1071 | 0,1338 | 0,1606 | 0,1874 | 0,2141 | 0,2409 | 0,2677 |
| 20 °C      | 0,0236 | 0,0473 | 0,0709 | 0,0946 | 0,1182 | 0,1418 | 0,1655 | 0,1891 | 0,2127 | 0,2364 |
| 25 °C      | 0,0210 | 0,0419 | 0,0629 | 0,0838 | 0,1048 | 0,1258 | 0,1467 | 0,1677 | 0,1887 | 0,2096 |
| 30 °C      | 0,0187 | 0,0373 | 0,0560 | 0,0747 | 0,0933 | 0,1120 | 0,1306 | 0,1493 | 0,1680 | 0,1866 |
| 35 °C      | 0,0167 | 0,0334 | 0,0500 | 0,0667 | 0,0834 | 0,1001 | 0,1168 | 0,1334 | 0,1501 | 0,1668 |
| 40 °C      | 0,0150 | 0,0299 | 0,0449 | 0,0598 | 0,0748 | 0,0898 | 0,1047 | 0,1197 | 0,1346 | 0,1496 |
| 45 °C      | 0,0135 | 0,0269 | 0,0404 | 0,0539 | 0,0673 | 0,0808 | 0,0942 | 0,1077 | 0,1212 | 0,1346 |
| 50 °C      | 0,0122 | 0,0243 | 0,0365 | 0,0486 | 0,0608 | 0,0729 | 0,0851 | 0,0972 | 0,1094 | 0,1216 |
| 55 °C      | 0,0110 | 0,0220 | 0,0330 | 0,0440 | 0,0550 | 0,0661 | 0,0771 | 0,0881 | 0,0991 | 0,1101 |
| 60 °C      | 0,0100 | 0,0200 | 0,0300 | 0,0400 | 0,0500 | 0,0600 | 0,0700 | 0,0800 | 0,0900 | 0,1000 |
| 65 °C      | 0,0091 | 0,0182 | 0,0273 | 0,0364 | 0,0456 | 0,0547 | 0,0638 | 0,0729 | 0,0820 | 0,0911 |
| 70 °C      | 0,0083 | 0,0166 | 0,0250 | 0,0333 | 0,0416 | 0,0499 | 0,0583 | 0,0666 | 0,0749 | 0,0832 |
| 75 °C      | 0,0076 | 0,0152 | 0,0229 | 0,0305 | 0,0381 | 0,0457 | 0,0534 | 0,0610 | 0,0686 | 0,0762 |
| 80 °C      | 0,0070 | 0,0140 | 0,0210 | 0,0280 | 0,0350 | 0,0420 | 0,0490 | 0,0560 | 0,0630 | 0,0700 |
| 85 °C      | 0,0064 | 0,0129 | 0,0193 | 0,0258 | 0,0322 | 0,0386 | 0,0451 | 0,0515 | 0,0580 | 0,0644 |
| 90 °C      | 0,0059 | 0,0119 | 0,0178 | 0,0238 | 0,0297 | 0,0357 | 0,0416 | 0,0475 | 0,0535 | 0,0594 |
| 95 °C      | 0,0055 | 0,0110 | 0,0165 | 0,0220 | 0,0275 | 0,0330 | 0,0385 | 0,0439 | 0,0494 | 0,0549 |
| 100 °C     | 0,0051 | 0,0102 | 0,0153 | 0,0204 | 0,0254 | 0,0305 | 0,0356 | 0,0407 | 0,0458 | 0,0509 |

 Tab. 24. Rozpustnost CH<sub>4</sub> v závislosti na tlaku v g/l

 Obr. 24 Grafická závislost rozpustnosti CH<sub>4</sub> v závislosti na tlaku

## PŘÍLOHA 2. Označování čidel na obecném konstrukčním schématu

| Značení podle druhu čidla |         |             |
|---------------------------|---------|-------------|
| označení měřené veličiny  | význam  | poznámka    |
| <b>P</b>                  | tlak    | pressure    |
| <b>T</b>                  | teplota | temperature |
| <b>F</b>                  | průtok  | flow        |
| <b>L</b>                  | hladina | Level       |
| <b>Q</b>                  | Analýza | quaility    |

| Značení podle způsobu indikace |                            |                  |
|--------------------------------|----------------------------|------------------|
| označení měřené veličiny       | význam                     | poznámka         |
| <b>I</b>                       | indikuje okamžitou hodnotu | indicate         |
| <b>R</b>                       | záznam hodnot              | record, register |

| Značení podle formy návazného využití signálu |                                 |                                      |
|---|---------------------------------|--------------------------------------|
| označení měřené veličiny                      | význam                          | poznámka                             |
| <b>C</b>                                      | návazná regulační vazba         | control, vazba s ovládaným elementem |
| <b>A</b>                                      | varovný signál                  | alarm                                |
|   | H – při nastavené horní hranici |                                      |
|   | L – při nastavené dolní hranici |                                      |

| Značení podle přístupu k informaci |                            |          |
|------------------------------------|----------------------------|----------|
| označení měřené veličiny           | význam                     | poznámka |
| <b>dělicí čára</b>                 | jen místní informace       |          |
| <b>bez dělicí čáry</b>             | přenos informace do velína |          |

### PŘÍLOHA 3. PFD diagram mokré vypírky

Přiloženo na zadní straně desek.

### PŘÍLOHA 4. Obecné technologické schéma mokré vypírky

Přiloženo na zadní straně desek.

### PŘÍLOHA 5. Basic Design absorpční kolony

Přiloženo na zadní straně desek.

### PŘÍLOHA 6. Elektronická příloha Rozpustnosti\_CO2\_a\_CH4.xls

Obsahuje přiložené CD

### PŘÍLOHA 7. Elektronická příloha Vypocet\_kolona.xls

Obsahuje přiložené CD