



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

## ZUŠLECHŤOVÁNÍ BIOPLYNU METODOU PSA

UPGRADING BIOGAS BY PSA

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Štěpán Krhut

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vojtěch Zejda

BRNO 2017

## **ABSTRAKT**

Tato práce řeší zušlechťování bioplynu metodou PSA a zmodernizování laboratorní jednotky. Surový bioplyn obsahuje mnoho nežádoucích složek, které snižují jeho energetický potenciál, a to v nejvyšší míře oxid uhličitý. Pro rozšíření možností využití bioplynu je třeba tuto složku odstranit. Jednou z rozšířených metod pro odstranění CO<sub>2</sub> z bioplynu je metoda Pressure Swing Adsorption (PSA – česky adsorpce za měnícího se tlaku). Tato práce popisuje tuto metodu a porovnává ji s jinými metodami čištění bioplynu.

V další části práce je představena původní laboratorní jednotka PSA, která je v laboratoři Ústavu procesního inženýrství pro výzkumné aktivity. Byla provedena její modernizace nahrazením ručních ventilů elektromagnetickými a byl vytvořen nový systém ovládání celé jednotky. Ten je koncipován jako dvou-režimový – manuální a automatický. Podstata spočívá ve vzdáleném ovládání ventilů pomocí přepínačů nebo programu. Pro obě tyto varianty byl navržen elektrický ovládací panel. Řízení automatizace procesu obstarávala programovací platforma Arduino integrovaná do panelu.

Pro případ dalšího měření byl vypracován podrobný popis obsluhy ovládacího panelu a komentář programu automatizace.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Bioplyn, PSA, aktivní uhlí, adsorpce, čištění bioplynu

## **ABSTRACT**

This work deals with bio gas cleaning by a PSA method and modernizing of a laboratory unit. Raw bio gas contains many unwanted elements like carbon dioxide mostly which lowers its energy potential then. To extend the possibilities of usage of bio gas it is necessary to remove such elements. One of the well-known method for eliminating CO<sub>2</sub> out of the bio gas is the method called Pressure Swing Adsorption (PSA). This work describes PSA method and compares it with other methods for cleaning the bio gas.

In the following part of my work I am introducing the original laboratory PSA unit which is placed in the laboratory of UPI institution for research purposes. The modernization of the method was made by changing the manual valves for electromagnetic ones and there was also designed a new control system unit for two control modes. For manual and for automatic. The essential function is based on remote controlling the valves either by switches or by a program. The electric control panel was created for such required modes. The automated process was controlled by Arduino programming platform which was integrated into the panel.

In the case of the next measurement and reading there was created a detailed description for user on how to operate the control panel and also the comments for control program of automatization.

## **KEY WORDS**

Biogas, PSA, activated carbon, adsorption, biogas cleaning

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

KRHUT, Š. *Zušlechťování bioplynu metodou PSA*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 65 s.

Vedoucí diplomové práce Ing. Vojtěch Zejda.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Vojtěcha Zejdy a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 25. května 2017

.....  
Štěpán Krhut

# PODĚKOVÁNÍ

Rád bych zde poděkoval celé své rodině a především rodičům, kteří mě po celou dobu studia všestranně podporovali a měli se mnou trpělivost. Dále bych chtěl poděkoval vedoucímu Ing. Vojtěchu Zejdovi za vstřícnou a otevřenou pomoc při psaní této práce a při provádění experimentu.

Tato práce vznikla za podpory a na přístrojovém vybavení NETME Centre, regionálního výzkumného a vývojového centra vybudovaného z finančních prostředků Operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace v rámci projektu NETME Centre (Nové technologie pro strojírenství), Reg. č.: CZ.1.05/2.1.00/01.0002 a podporovaného v navazující fázi udržitelnosti prostřednictvím projektu NETME CENTRE PLUS (LO1202) za finančního přispění Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory programu „Národní program udržitelnosti I“.

This thesis was elaborated with support and by using research equipment of NETME Centre, regional research and development centre, built with the financial support from the Operational Programme Research and Development for Innovations within the project NETME Centre (New Technologies for Mechanical Engineering), Reg. No. CZ.1.05/2.1.00/01.0002 and in the follow-up sustainability stage, financially supported through NETME CENTRE PLUS (LO1202) by the Ministry of Education, Youth and Sports under the „National Sustainability Programme I“.

# OBSAH

<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ .....</b>	<b>10</b>
<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
<b>2 BIOPLYN.....</b>	<b>12</b>
<b>2.1 VZNIK BIOPLYNU .....</b>	<b>12</b>
<b>2.2 VÝROBA BIOPLYNU V BIOPLYNOVÝCH STANICÍCH .....</b>	<b>13</b>
2.2.1 PROVOZ BIOPLYNOVÝCH STANIC .....	13
2.2.2 VLIV PROVOZU STANIC NA OKOLÍ .....	14
2.2.3 DRUHY VSTUPNÍCH SUROVIN A JEJICH VÝTĚŽNOST .....	15
<b>2.3 SLOŽKY BIOPLYNU .....</b>	<b>16</b>
<b>2.4 ENERGETICKÉ VYUŽITÍ BIOPLYNU .....</b>	<b>17</b>
2.4.1 SPALOVÁNÍ V KOTLÍCH .....	17
2.4.2 VÝROBA ELEKTRINY A TEPLA V KOGENERAČNÍ JEDNOTCE .....	17
2.4.3 POHON MOBILNÍCH ENERGETICKÝCH PROSTŘEDKŮ .....	19
<b>3 METODY ČIŠTĚNÍ BIOPLYNU .....</b>	<b>21</b>
<b>3.1 METODA PSA .....</b>	<b>21</b>
<b>3.2 FYZIKÁLNÍ A CHEMICKÁ ABSORPCE.....</b>	<b>21</b>
<b>3.3 MEMBRÁNOVÁ SEPARACE .....</b>	<b>22</b>
<b>3.4 KRYOGENNÍ SEPARACE .....</b>	<b>23</b>
<b>3.5 BIOLOGICKÁ KONVERZE .....</b>	<b>23</b>
<b>3.6 POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH TECHNOLOGIÍ.....</b>	<b>24</b>
<b>4 PRINCIP METODY PSA.....</b>	<b>25</b>
<b>4.1 ADSORPCE .....</b>	<b>26</b>
4.1.1 FYZIKÁLNÍ ADSORPCE.....	26
4.1.2 CHEMISORPCE.....	26
<b>4.2 PRŮRAZOVÉ KŘIVKY .....</b>	<b>26</b>
<b>4.3 ADSORBENTY .....</b>	<b>28</b>
4.3.1 SILIKAGEL .....	28
4.3.2 ZEOLITY .....	29
4.3.3 AKTIVNÍ UHLÍ.....	29
<b>5 PŮVODNÍ PODOBA SESTAVY.....</b>	<b>30</b>
<b>6 METODY AUTOMATIZACE PROCESU .....</b>	<b>31</b>
<b>6.1 KARTA ARDUINO .....</b>	<b>31</b>
6.1.1 HISTORIE.....	32
6.1.2 TYPY DESEK.....	32
6.1.3 PROGRAMOVACÍ JAZYK WIRING .....	33
<b>6.2 PROGRAMOVATELNÝ AUTOMAT PLC.....</b>	<b>34</b>
6.2.1 CENTRÁLNÍ JEDNOTKA.....	34
<b>7 POPIS MODERNIZOVANÉ LABORATORNÍ JEDNOTKY PSA.....</b>	<b>35</b>
<b>7.1 POPIS MECHANICKÉHO ZAPOJENÍ .....</b>	<b>35</b>

<b>7.2 MECHANICKÁ ZAŘÍZENÍ.....</b>	<b>36</b>
7.2.1 ADSORBÉR.....	36
7.2.2 VENTILY.....	36
<b>7.3 PŘÍSLUŠENSTVÍ .....</b>	<b>37</b>
7.3.1 TLAKOVÁ LÁHEV .....	37
7.3.2 ANALYZÁTOR.....	37
7.3.3 VÝVĚVA .....	37
<b>7.4 MĚŘÍCÍ PRVKY .....</b>	<b>38</b>
7.4.1 ROTAMETR.....	38
7.4.2 TEPLOMĚR.....	38
7.4.3 MANOMETRY .....	38
<b>7.5 POPIS ELEKTRICKÉHO ZAPOJENÍ.....</b>	<b>39</b>
<b>7.6 POPIS OBSLUHY OVLÁDACÍHO PANELU .....</b>	<b>43</b>
7.6.1 MANUÁLNÍ OBSLUHA .....	43
7.6.2 AUTOMATICKÁ OBSLUHA.....	44
<b>8 EXPERIMENT .....</b>	<b>48</b>
<b>8.1 PŘÍPRAVA MĚŘENÍ.....</b>	<b>48</b>
8.1.1 INSTALACE ANALYZÁTORU .....	48
8.1.2 ZKOUŠKA TĚSNOSTI JEDNOTKY .....	48
8.1.3 PŘÍPRAVA ADSORBENTU .....	48
8.1.4 PROPOJENÍ OVLÁDACÍHO PANELU .....	48
<b>8.2 POPIS POSTUPU MĚŘENÍ .....</b>	<b>49</b>
8.2.1 MĚŘENÍ ČASU ADSORPCE A DESORPCE .....	49
<b>8.3 VYHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH DAT.....</b>	<b>50</b>
8.3.1 PRŮRAZOVÉ KŘIVKY ADSORPCE.....	50
8.3.2 KŘIVKY DESORPCE .....	52
8.3.3 AUTOMATICKÝ PROVOZ .....	53
<b>9 ZÁVĚR.....</b>	<b>54</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>55</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>59</b>



## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Symbol	Význam	Jednotka
$t$	Teplota	$^{\circ}\text{C}$
$t_b$	Čas průrazu adsorpční vrstvy	s
$t_s$	Čas saturace adsorpční vrstvy	s
$c_{\max}$	Maximální relativní koncentrace na výstupu jednotky	-
$c_1$	Relativní koncentrace na začátku početního intervalu	-
$c_2$	Relativní koncentrace na konci početního intervalu	-
$Q_v$	Objemový průtok směsi adsorbérem	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
$MW_a$	Molární hmotnost sledované látky	$\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$
$m_{\text{au}}$	Hmotnost adsorbéru na začátku adsorpce	kg
$V_g$	Molární objem ideálního plynu	$\text{m}^3 \text{mol}^{-1}$
$\Delta t$	Časový interval záznamu	s
$p$	Tlak	Pa
$C_{\text{CO}_2}$	Koncentrace na výstupu z adsorbéru	% vol.
$C_{\text{RCO}_2}$	Relativní koncentrace na výstupu z adsorbéru	-

# 1 ÚVOD

Do popředí všeobecného zájmu společnosti se stále více dostává snaha získávat nezávislost na fosilních palivech. Tato skutečnost vede ke hledání a zdokonalování možností využití obnovitelných zdrojů energie. Jedním z takových zdrojů je i bioplyn vznikající při anaerobní fermentaci organických látek. Jako výchozí suroviny se nejčastěji využívají produkty zemědělského průmyslu či chovu dobytka. Využití těchto materiálů je výhodné nejen z hlediska výroby bioplynu, ale i pro uplatnění produktů vznikajících spolu s bioplynem. Jedním z těchto hodnotných produktů je tzv. digestát. Jedná se o stabilizovaný materiál, který už nelze dále využít pro získání bioplynu. Nejčastěji se používá pro hnojení zemědělských ploch. [1]

Důvodem využívání bioplynu je jeho vysoký obsah metanu, který je závislý na druhu použitých surovin, způsobu a technologii fermentace. Pro odstranění nežádoucích látek se v současnosti používá řada metod jako např. fyzikální absorpce nebo membránová separace. Tyto způsoby zušlechťování by mohly v budoucnu přispět k náhradě zemního plynu bioplynem. [2]

Metoda PSA (Pressure swing adsorption – metoda střídání tlaků), které je věnována tato práce, patří mezi adsorpční technologie, která se využívá z důvodů nízkých energetických potřeb a investičních nákladů ve srovnání s jinými separačními metodami. [26]

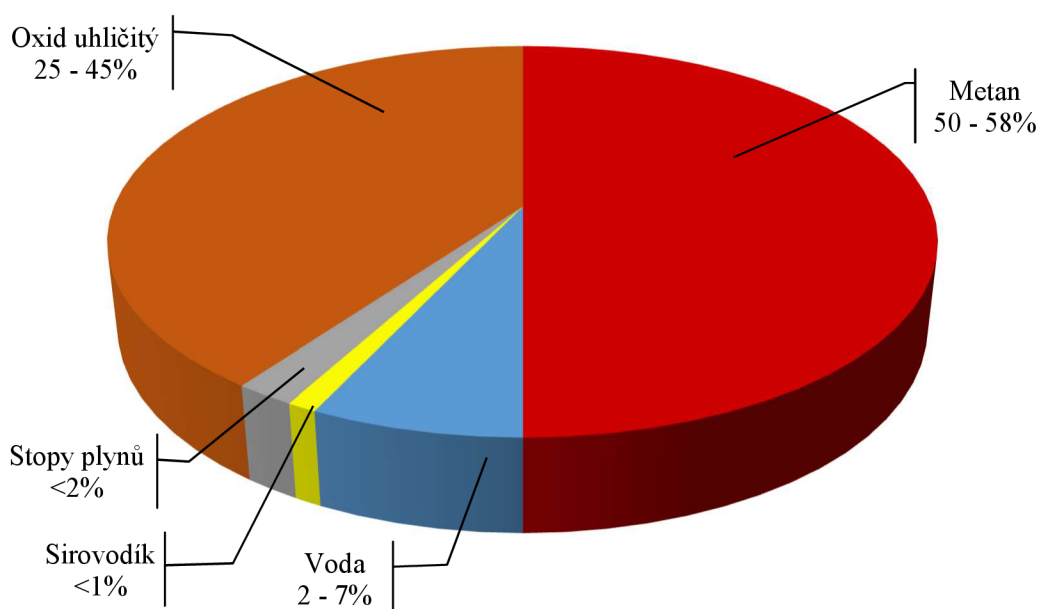
Na Ústavu procesního inženýrství Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně byla v minulosti postavena laboratorní PSA jednotka. Na rozdíl od předešlého výzkumu, kdy hlavním cílem bylo docílit potřebnou čistotu zušlechtěného plynu, je cílem této práce zvýšit výkonnost jednotky. Pro tento požadavek se rozhodlo ovládní jednotky zautomatizovat, čímž dojde ke zdokonalení celé laboratorní jednotky. Způsobu provedení automatizace se věnuje samostatná kapitola práce.

V závěru této práce je proveden experiment na laboratorní jednotce PSA se směsí plynu dusíku a oxidu uhličitého v poměru simulující složení bioplynu. Ze získaných dat je potřeba vykreslit průběh průřezových křivek, ze kterých jsme schopni určit množství adsorbovaného plynu za časový interval, a tudíž výkonnost jednotky.

## 2 BIOPLYN

Bioplyn a bioplynové systémy představují energetické zdroje s vysoce pozitivními přínosy pro ochranu a tvorbu životního prostředí. Přestože bioplyn zatím není schopen vytlačit fosilní paliva z jejich dominantního postavení na trhu s energiemi, má na rozdíl od nich zcela neomezené perspektivy pro budoucí využití. [2]

Pojem bioplyn je v současnosti používán pro označení plyného produktu vzniklého při anaerobní metanové fermentaci organických látek. Zjednodušeně lze říci, že bioplyn je směs metanu a oxidu uhličitého, která ovšem obsahuje i další plynné složky, které jsou zastoupené v minoritním poměru. Tyto složky jsou buď organické či anorganické povahy. Poměr obsažených látek ve vzniklé směsi závisí nejen na vstupních surovinách, ale také na způsobu fermentace, ve kterém hrají roli jak procesní, tak i materiálové parametry, jako je například složení materiálu, podíl vlhkosti, teplota prostředí, kyselost či zásaditost. Následující graf zobrazuje obecný rozsah koncentrací složek v bioplynu. [5]



Obr. 1 Obecné složení bioplynu [15]

### 2.1 VZNIK BIOPLYNU

Plyn, který jsme schopni dále energeticky využívat, je vyráběn v bioplynových stanicích, čistírnách odpadních vod či na komunálních skládkách. Nejvhodnější surovinou je špatně spalitelný materiál, získaný zejména ze zemědělského průmyslu. Jedná se především o zbytkovou či cíleně pěstovanou biomasu (rychle rostoucí plodiny). Fermentace se však neúčastní pouze biologické složky, ale také suroviny živočišného charakteru, jako jsou exkrementy hospodářských zvířat. Dále pak jsou důležitým zdrojem odpady z údržby zeleně a kaly z čistíren odpadních vod. [1]

Biologický rozklad vstupních surovin je vícestupňový proces, při němž hrají zásadní roli metanogenní, acetotrofní a hydrogenotrofní mikroorganismy. Tyto organismy produkují

metan jsou považovány za jedny z nejstarších životních forem na naší planetě. Protože sebemenší přítomnost kyslíku pro ně znamená záhubu, musely se při vzniku kyslíku v zemské atmosféře přizpůsobit novým podmínkám. Dokázaly přežít jen díky své těsné symbióze s jinými aerobními organizmy zajišťujícími pro ně energetický zdroj a bezkyslíkaté (anaerobní) prostředí. Proto lze tyto mikroorganismy v současné době nalézt pouze ve směsných kulturách, a nikoliv v čistém stavu. [18]

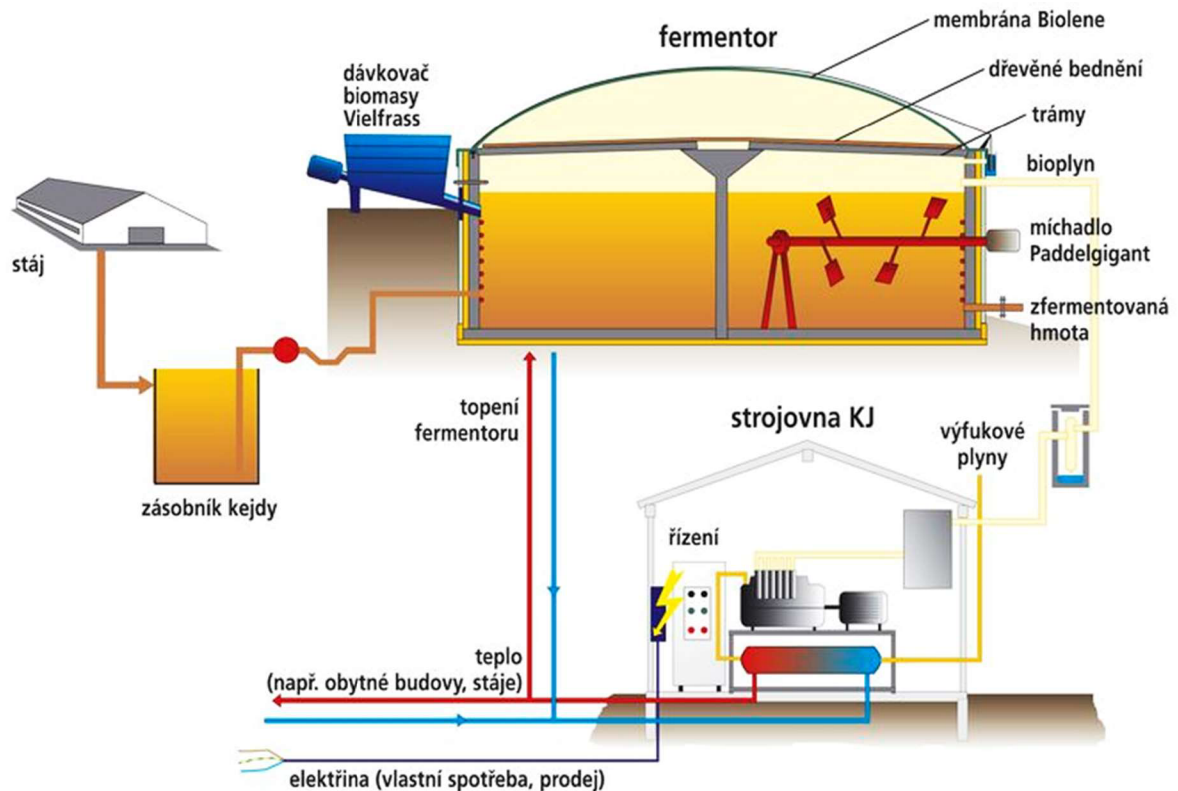
## **2.2 VÝROBA BIOPLYNU V BIOPLYNOVÝCH STANICÍCH**

Bioplynové stanice patří mezi obnovitelné zdroje energie a mají již své pevné místo v rámci moderní energetiky 21. století. Zajišťují stabilní dodávky elektřiny a tepla, bez zatěžování životního prostředí emisemi. Tyto projekty se podílejí na ochraně životního prostředí, a to nejen svým příspěvkem ke snížení skleníkových plynů, ale také likvidací odpadů ze zemědělské produkce nebo biologicky rozložitelných komunálních odpadů. Díky státním podporám v podobě investičních dotací nebo garantovaných výkupních cen jsou i výhodnou ekonomickou investicí. [1]

### **2.2.1 PROVOZ BIOPLYNOVÝCH STANIC**

Srdcem celého zařízení je fermentor, ve kterém se biomasa přeměňuje na bioplyn a digestát. Počet těchto fermentorů se obvykle pohybuje od dvou do čtyř, záleží také na zdrojích biomasy v dané lokalitě. Jak bylo již dříve zmiňováno, bioplyn obsahuje především metan, který je nosičem energie, a oxid uhličitý. Bioplyn z výstupu fermentoru je pak následně upravován a využíván pro pohon kogeneračních jednotek vyrábějících elektrickou energii a teplo. Lze jej také dále čistit na parametry tzv. biometanu, který lze použít pro pohon automobilů. Způsoby čištění bioplynu budou uvedeny níže. Další produkt vzniklý anaerobní fermentací se nazývá digestát, směs nehodící se již dalšímu získávání bioplynu. Obsahuje pouze živiny a humus, který se dále nerozkládá a tudíž nezapáchá. Uplatňuje se zejména jako hnojivo pro zemědělské plodiny. [9]

Provoz bioplynových stanic je z větší části automatizovaný a obsluha plní spíše kontrolní funkci. Každé jednotkové zařízení obsahuje množství čidel a bezpečnostních opatření, které jsou propojeny s kontrolní místností. Důležitý je kontinuální přísun surovin pro zajištění stabilní produkce bioplynu, a tudíž v mnoha případech i produkce elektrické energie. Vzniklý fermentační zbytek se skladuje v externím kruhovém nekrytém zásobníku, který se vyprazdňuje zpravidla dvakrát za rok vyvážením na pole. Aby byl zajištěn nepřetržitý provoz stanice, používá se jako surovina kukuřičná, řepná či travní siláž uskladněná v areálu stanice pomocí silážních vaků. Výjimku tvoří exkrementy hospodářského dobytka, tzv. kejda, která je produkována nepřetržitě a kterou je obtížné uskladnit, proto se dávkuje přímo z cisterny auta. Tyto zdroje poskytují zpravidla zemědělská družstva v okolí bioplynové stanice či Správy luk a lesů. Na Obr. 2 můžeme vidět schéma bioplynové stanice. [14]



Obr. 2. Popis principu bioplynové stanice [10]

## 2.2.2 VLIV PROVOZU STANIC NA OKOLÍ

Organický rozklad hmoty – fermentace je kompletně přírodním procesem, který se v přírodě běžně vyskytuje a probíhá při teplotě přibližně 36 °C bez přístupu vzduchu. V případě bioplynových stanic probíhá v uzavřených nádobách, odkud je plyn čerpán přímo do kogeneračních jednotek. Proto při havárii nehrozí žádné trvalé chemické či biologické zamoření okolí.

Nejdiskutovanějším tématem, týkající se výstavby bioplynových stanic, bývá zpravidla výskyt zápachu. Provozovatelé však uvádějí, že správně provozovaná bioplynová stanice nezapáchá a proti úniku zápachu je zabezpečena. Významným zdrojem zápachu může být i uskladněná siláž, připravená k dávkování do fermentoru. Aby nedocházelo k tomuto nežádoucímu jevu a ke znehodnocování skladované siláže, musí být zamezeno přístupu vzduchu. Proto se tento materiál přikrývá plachtou nebo je přímo „zabalen“ do speciálních podlouhlých vaků, viz Obr. 3. Tyto vaky vyrábí např. firma PLASTAR či finská firma RANI PLAST. Jsou obvykle zhotoveny z polyethylenu. Eliminace zápachu také spočívá ve fermentaci vsádky živočišné povahy, jako je kejda nebo hnůj. Proces tyto materiály rozloží a při pozdější aplikaci do půdy při hnojení již nezapáchají jako v případě aplikace „surové“ kejdy. [8] [14]

Další nepříznivý vliv na okolní prostředí může znamenat hluk z provozu kogenerační jednotky, která je tvořena zpravidla upravenými spalovacími motory. Toto zařízení je však situováno do uzavřené odhlučňené budovy splňující příslušné hlukové normy.



Obr. 3. Uskladnění siláže [17]

### 2.2.3 DRUHY VSTUPNÍCH SUROVIN A JEJICH VÝTĚŽNOST

Nejdůležitější vlastností při zjišťování produkce bioplynu je množství sušiny materiálu. Měrná produkce bioplynu se zpravidla udává v metrech krychlových na tunu sušiny. Především u exkrementů a odpadů nelze spoléhat na tabulkové hodnoty v původní hmotě, ale je třeba zjistit obsah sušiny konkrétního materiálu, např. obsah sušiny kejdy může v závislosti na použité technologii kolísat mezi 3-8 %, což může znamenat násobný rozdíl produkce bioplynu na jednotku hmotnosti v původní hmotě. Produkce bioplynu z jednotlivých druhů vstupů do bioplynové stanice se výrazně liší. Tabulka 1 uvádí srovnání výtěžnosti bioplynu z různých druhů substrátů. Výtěžnost bioplynu významně závisí jednak na vlastnostech a kvalitě vstupního materiálu, ale také na použité technologii fermentace. Z tohoto důvodu dochází i u stejných substrátů ke značným rozptylům hodnot ve výtěžnosti bioplynu. Z tabulky je zřejmé, že nejhodnotnější surovinou pro výrobu bioplynu se jeví kuchyňské odpady bohaté na tuky, které se ovšem nedají pořídit v takovém měřítku jako například travní siláž nebo prasečí kejda.

Tab. 1: Produkce bioplynu pro některé vybrané substráty [18]

Substrát	Obsah sušiny	Produkce bioplynu	Koncentrace metanu v bioplynu
<i>Jednotka</i>	[%]	[m <sup>3</sup> .t <sup>-1</sup> ] org. sušiny	[%]
<i>Prasečí kejda</i>	6	400	60
<i>Silážní kukuřice</i>	33	586	52
<i>Travní siláž</i>	35	583	54
<i>Podestýlka – Pšeničná sláma</i>	86	369	51
<i>Žito - zrno</i>	87	702	52
<i>Kuchyňské odpady bohaté na tuky</i>	18	761	62

Mimo materiály uvedené v tabulce se také mohou využívat například bioodpady z údržby veřejné zeleně (tráva, listí, ale nikoli dřevo), prošlé potraviny a bioodpady ze supermarketů nebo bioodpady z podnikatelských provozů (pekárny, lihovary, pivovary).

Účelné pěstování zemědělské biomasy k energetickým účelům má samozřejmě své klady i zápory. Mezi pozitiva lze řadit zadržení vody v krajině, protierozní opatření, snižování emisí i nezaměstnanosti v regionu a efektivní nakládání se zemědělskými odpady. Určitá rizika představuje úbytek zemědělské půdy pro potravinářské využití, změna potravních vazeb v ekosystému, větší počáteční investice, velká spotřeba vody a komplikace s distribucí energetických přebytků. [13]

## 2.3 SLOŽKY BIOPLYNU

Jak již bylo výše zmiňováno, bioplyn je složen z metanu, jehož koncentrace se pohybuje od 50 do 75 %. V ideálním případě jej doplní oxid uhličitý o koncentraci 25 až 50 %. V praxi však surový bioplyn obsahuje mnoho dalších minoritních plynů a jejich množství může signalizovat přítomnost některých chemických prvků v materiálu nebo chyby v průběhu fermentace. Například vysoká koncentrace oxidu uhličitého ( $\text{CO}_2$ ) znamená, že na začátku anaerobní fermentace nebyly vytvořeny optimální podmínky. Další ukazatel, mimo počáteční fázi procesu, je přítomnost volného kyslíku ( $\text{O}_2$ ), který poukazuje na zavzdušňování pracovního prostoru. Tato porucha je nežádoucí z hlediska požární bezpečnosti, protože se může vytvořit výbušná směs metanu a kyslíku. Také může vznikat oxid uhelnatý ( $\text{CO}$ ), který indikuje lokální vznik ložisek požáru při suché anaerobní fermentaci. Tato situace se však vyskytuje především na skládkách komunálního odpadu, a nikoliv v adsorbérech. [18]

Následující tabulka uvádí některé základní technické údaje a vlastnosti metanu.

Tab. 2. Požárně technická charakteristika MV č. 21/1996 [18]

Teplota vznícení	537 °C
Teplotní třída	T 1
Mez výbušnosti	4,4 – 17 % obj. 29 – 113 $\text{mg.l}^{-1}$
Skupina výbušnosti	II A
Relativní hustota (ve vztahu ke vzduchu)	0,55

Mezi významný minoritní plyn patří také sulfan ( $\text{H}_2\text{S}$ ) pocházející zpravidla z biochemických procesů při rozkladu bílkovin. Jeho obsah v bioplynu je velmi proměnlivý, a především závisí na druhu zpracovávaného materiálu. Například při zpracování exkrementů z chovu skotu je jeho obsah zanedbatelný. Jiná situace je ovšem v případě chovu prasat a drůbeže, kdy jeho vysoký obsah působí potíže při následném zpracování bioplynu, např. usazování elementární síry na stěnách potrubí, vysoké opotřebení součástí kogenerační

jednotky nebo poškození oxidačních katalyzátorů kogeneračních jednotek. Všechny tyto důvody kladou vyšší nároky na údržbu. Z těchto důvodů je věnována zvýšená pozornost čištění bioplynu od této látky.

## **2.4 ENERGETICKÉ VYUŽITÍ BIOPLYNU**

Energetické využívání bioplynu nabízí velmi široké spektrum různých technologií, prakticky shodných jako pro využívání zemního plynu anebo jiných topných plynů. Tradiční a základní způsoby využití bioplynu jsou spalování v plynových kotlích pro vytápění, pohon plynového pístového motoru generátorů elektrického proudu včetně motorů kogeneračních zajišťujících i využití odpadního tepla. Další, méně časté, způsoby využití bioplynu jsou pohon plynových turbín, motorů chladicích systémů či relativně nový způsob výroby biovodíku. Vodík jako alternativní palivo je dlouhodobě diskutovaným tématem. Jednou z možností, jak jej vyrobit je i úprava bioplynu. Tento vývoj probíhá především v USA, Japonsku a Německu. Negativním prvkem při možném využití vodíku je jeho těkavost (nebezpečí výbuchu) a finančně nákladná výroba. Nejčastěji se však v praxi můžeme setkat se dvěma způsoby využití bioplynu, a to konkrétně spalování v kotlích a využití v kogenerační jednotce. [12] [13] [18]

### **2.4.1 SPALOVÁNÍ V KOTLÍCH**

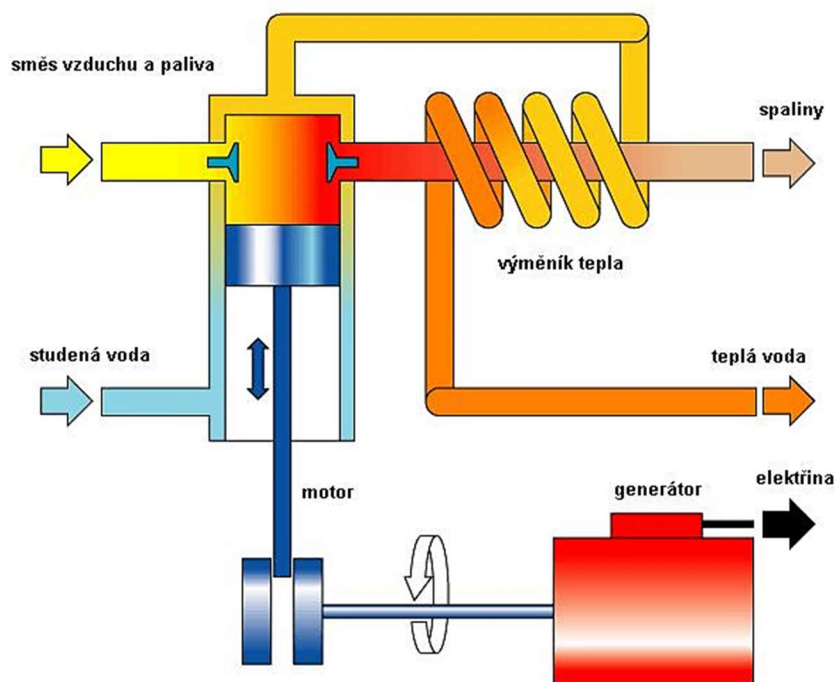
Hořáky pro spalování bioplynu jsou v podstatě modifikace plynových hořáků a běžné typy kotlů žádné další speciální úpravy nepotřebují. K produkci tepelné energie lze bioplyn spalovat buď přímo na místě jeho vzniku, nebo může být přepravován potrubím ke koncovým uživatelům. Zde se opět vyskytuje riziko zvýšeného množství sirnatých sloučenin, především sulfanu. Tyto látky je třeba odstranit a provádět častou kontrolu teplosměnných ploch kotle a komínů, aby se zamezilo nežádoucím reakcím mezi některými složkami bioplynu a keramickou výplní radiačních kotlů. Z těchto informací vyplývá, že při spalování bioplynu hraje zásadní roli jeho složení a energetická stálost.

### **2.4.2 VÝROBA ELEKTŘINY A TEPLA V KOGENERAČNÍ JEDNOTCE**

Nejčastější využití bioplynu je výroba elektrické energie a tepla v kogenerační jednotce. Kogenerací nazýváme výrobu, při které se současně produkuje elektrická energie a teplo. Tato metoda využívající bioplyn dosahuje vysoké účinnosti využití energie z plynu a to 80 až 90 % na elektrickou a tepelnou energii. [18]

Princip kogenerace spočívá v pohonu elektrického generátoru o účinnosti přibližně 35 %. Teplo, které se při tom uvolní, je prostřednictvím chlazení spalovacího motoru a výfukových plynů efektivně využito, což účinnost kogenerační jednotky zvyšuje až na 90 %. Toto odpadní teplo je využito např. k ohřevu teplé vody, k vytápění budov či k zahřívání fermentoru bioplynové stanice. Kogenerační jednotky jsou ideálním záložním zdrojem energie. V případě nadprodukce elektřiny je vhodné přebytky dodávat na základě smlouvy s distributorem do elektrické sítě. Na Obr. 4. je uvedeno zjednodušené schéma principu kogenerační jednotky. [13]





Obr. 4. Schéma principu kogenerační jednotky [16]

Kogenerace se podle elektrického výkonu dělí na tři skupiny:

- 1) Mikro kogenerace – do 50 kWe
- 2) Malá a střední kogenerace – do 2 GWe
- 3) Velká kogenerace – nad 2 GWe

První skupina je schopna pokrýt spotřebu malých rodinných domů, naproti tomu velká kogenerace dokáže zálohovat i větší města. [13]

Jak již bylo zmiňováno v kapitole 2.3, je nutné ještě před vstupem bioplynu do jednotky, z něj odstranit sulfan ( $H_2S$ ). V bioplynové stanici s kogenerační jednotkou se zpravidla používá více stupňů čištění. První stupeň odstraňování sulfanu ze surového bioplynu je aerační, kdy je do fermentoru trvale přiváděno nepatrné množství vzduchu pro sulfanredukující bakterie. Volná síra z jejich činnosti zůstává v digestátu ve fermentoru. Dále je možné chemické odsíření pomocí chloridu železnatého (obchodní název Desulfan). Tato látka na sebe okamžitě váže síru za vzniku nerozpustného a dále nereaktivního sulfidu železnatého. Sulfid železnatý poté zůstává v digestátu a je tak zdrojem síry pro rostlinnou biomasu. Částečně odsířený bioplyn dále pokračuje do zpravidla posledního stupně čištění pomocí aktivního uhlí. Zde se obsah sulfanu v bioplynu sníží až na  $20\text{--}100\text{ mg/m}_n^3$ . Odloučená síra ze sulfanu zůstává v adsorpční náplni, která se mění přibližně v intervalu půl roku. Tabulka 3 uvádí obsah sulfanu pro různé druhy odpadu. [32] [37]

Tab. 3. Obsah sulfanu v bioplynu z různých odpadů [18]

Druh zpracovávaného materiálu	Obsah H <sub>2</sub> S [mg.m <sup>-3</sup> ]
<i>dřevní odpad, papír, celulóza, škrob, rostlinná hmota</i>	do 80
<i>kaly z městských ČOV</i>	50–300
<i>živočišné odpady z chovu skotu</i>	50–600
<i>živočišné odpady z chovu prasat nebo drůbeže, potravinářské odpady</i>	500–6000

### 2.4.3 POHON MOBILNÍCH ENERGETICKÝCH PROSTŘEDKŮ

Další možností, která se v dnešní době díky významným úsporám provozních nákladů dostává stále více do popředí, je zušlechtnění bioplynu na čistý metan, tzv. biometan. Náklady jsou zhruba o 40 % nižší oproti benzinovému či dieslovému palivu. To činí z biometanu jednu z nejlevnějších alternativních pohonných hmot současnosti. Při zušlechtnění jde především o odstranění oxidu uhličitého (CO<sub>2</sub>) z bioplynu. Poté stlačený biometan, který nese označení CNG, dosahuje srovnatelných kvalit jako zemní plyn využívaný běžně pro pohon vozidel. [24]

Česká republika má bohaté zkušenosti s využitím plynu v dopravě a řadí se mezi evropské země s velkou dynamikou rozvoje tohoto druhu alternativního paliva. Proto je také potřeba budovat síť plnicích stanic stlačeného zemního plynu. Rozvoj infrastruktury plnicích stanic zajišťuje v České republice více než deset firem a v současné době mají motoristé k dispozici více než 140 stanic, jak je uvedeno v následující tabulce, která obsahuje aktuální data týkající se počtu plnicích stanic a vozidel využívající CNG. [24]

Tab. 4. Počet plnicích stanic v České republice [23]

	2015	2016	1.Q/2017
<i>Plnicí stanice CNG veřejné</i>	108	143	145
<i>Plnicí zařízení – domácí</i>	155	186	200
<i>Vozidla CNG – celkem</i>	12 000	15 500	16 400
<i>Auta osobní a dodávková</i>	10 750	13 970	14 820
<i>Autobusy</i>	820	1 020	1 047
<i>Komunální vozidla</i>	130	150	150
<i>Ostatní vozidla (offroad)</i>	300	360	383

Poměrně dobré vyhlídky na rozšíření aplikací bioplynu v dopravě jsou docela možné ve velkých městech s rozvinutou městskou hromadnou dopravou. Zde lze, za poměrně nízkých investic do čerpací stanice, využívat už dnes bioplyn produkovaný na městské ČOV pro pohon autobusů MHD, vozidel technických služeb, apod.

### 3 METODY ČIŠTĚNÍ BIOPLYNU

Biometan používaný jako palivo pro motorová vozidla a pro vtláčení do distribuční sítě musí po úpravě obsahovat dle technického předpisu TPG 902 02 „Jakost a zkoušení plyných paliv s vysokým obsahem metanu“ více než 95 % metanu. Takto upravený biometan může být využit jako náhrada za zemní plyn v distribučních plynovodech nebo v dopravě.

Nežádoucí látky se mohou z bioplynu odstraňovat různými metodami, které se liší použitou technologií a pracovními podmínkami čištěného bioplynu. Tyto metody mají za cíl umožnit zvýšení energetického podílu v produkovaném bioplynu odstraněním především oxidu uhličitého. Pro čištění bioplynu jsou nejčastěji používány především adsorpce na pevných adsorpčních materiálech a chemická či fyzikální absorpce. Do popředí se díky svým energetickým a prostorovým nárokům také dostává membránová separace, která má již několik komerčních využití. Další perspektivní metodou může být kryogenní separace oxidu uhličitého, která je zatím ve stádiu vývoje. [4][25]

#### 3.1 METODA PSA

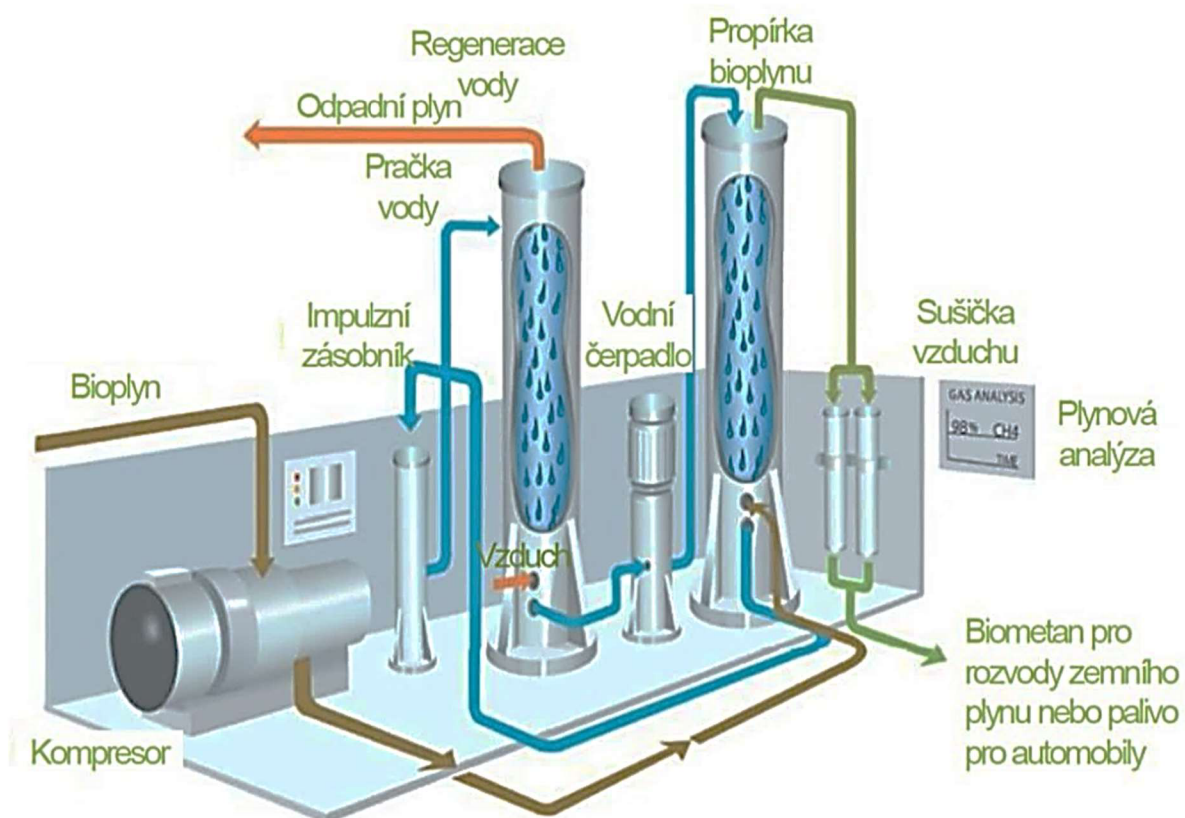
Jedná se o metodu adsorpce za střídajícího se tlaku (pressure swing adsorption). PSA se řadí mezi adsorpční technologie, která je využívána díky svým nízkým energetickým potřebám a investičním nákladům ve srovnání s ostatními separačními metodami, například destilací nebo absorpcí. Metoda je založena na adsorpci nežádoucích plyných složek na porézním sorbentu při zvýšeném tlaku a zároveň desorpci při tlaku nízkém. Při poklesu tlaku se sorbent regeneruje a je schopen adsorbovat nežádoucí složky v dalším cyklu. Výhoda adsorpčních materiálů tkví především v jejich jednoduchosti, možnosti aplikace při různých tlacích, snadné regulaci procesu a jednoduché regeneraci adsorbentů. Jelikož je tato metoda stěžejním tématem této práce, bude jí věnována samostatná kapitola.

#### 3.2 FYZIKÁLNÍ A CHEMICKÁ ABSORPCE

Fyzikální vypírka vodou či jinými kapalinami využívá principu rozdílné rozpustnosti plynů v kapalinách. Výhoda této technologie tkví v současném odstranění sulfanu a amoniaku z důvodu jejich vyšší rozpustnosti než oxidu uhličitého. Proces absorpce probíhá za zvýšeného tlaku v rozpětí 0,6–0,8 MPa a teplotě 10 °C. Zvýšením teploty se sníží rozpustnost plynu v kapalině a nastane regenerace nasyceného pracovního roztoku. Tato metoda umožňuje získání biometanu s čistotou 97–99 % CH<sub>4</sub>.

Proces se uskutečňuje v absorpční koloně, která je naplněna výplní tak, aby se navýšila plocha fázového rozhraní mezi kapalinou a plynnou fází. Jedná se například o volně sypané kroužky různého typu, jako např. Raschigovy kroužky nebo tvarovaná sedla, které jsou volně nasypány na perforovaný rošt umístěný ve spodní části kolony. Z horní části kolony odchází plyn s vysokou koncentrací metanu a před dalším zpracováním je sušen a odorizován. Odcházející voda ze spodní části kolony obsahuje nejen rozpuštěný oxid uhličitý a sulfan, ale i metan, který je také částečně rozpustný ve vodě. Proto se v některých případech tato voda recykluje snížením tlaku na atmosférický, kdy dojde k desorpci CO<sub>2</sub>. Poté se voda ochladí a je znovu využita v dalším procesu. [27]

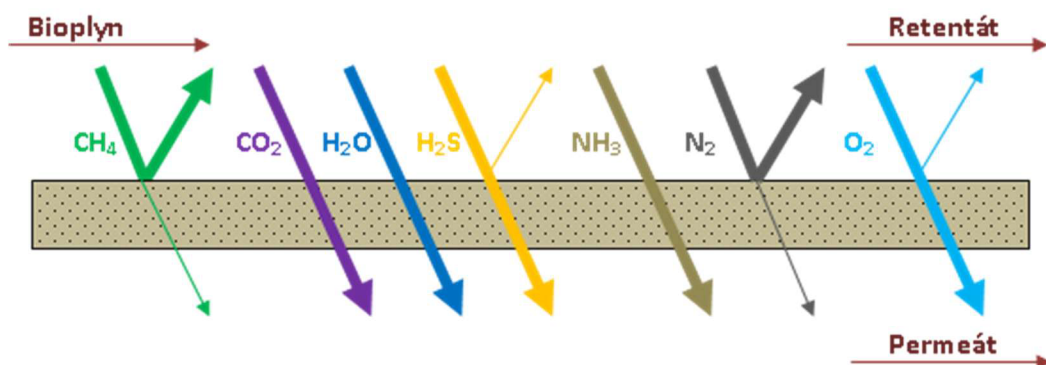
Princip absorpce je znázorněn na následujícím obrázku.



Obr. 5. Absorpční kolona [28]

### 3.3 MEMBRÁNOVÁ SEPARACE

Tato metoda je založena na selektivní propustnosti molekul přes membránu. Jak můžeme vidět na Obr. 6, některé molekuly, např.  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , prochází membránou na tzv. permeátovou stranu membrány. Metan membránou neprochází, a proto zůstává na retentátové straně (retence – zadrž). Membrána je zhotovena zpravidla ze silikonového kaučuku nebo acetátu celulózy. Membránová separace má vysokou efektivitu, ale není schopna odolávat agresivním složkám v bioplynu.



Obr. 6. Princip membránové separace [30]

Pro odstranění menších molekul polárního charakteru a vlhkosti se používá membrána z acetátu celulózy, kdy je surový plyn v jednom kroku předčištěn až na 94 % CH<sub>4</sub> a použitím dvou až tří dalších kroků může být dosaženo koncentrace až 96 % a více.

Další slibnou metodou z rodiny membránových separací se jeví kapalně membrány s iontovými kapalinami. Jedná se o zakotvení iontové kapaliny v pórech vhodného porézního podkladu, např. polyvinyliden fluorid, který má průměr pórů 0,1 μm. Výhodou těchto membrán je využití vysokých toků hmoty membránou, jejich vysoká selektivita zejména pro směs metanu a oxidu uhličitého a stabilní výkon při různých teplotách.

Bohužel jsou tyto iontové kapaliny zatím příliš drahé pro průmyslové použití. Také díky svým hydrofobickým vlastnostem tyto membrány ztrácejí ve vlhkém prostředí své vlastnosti a nejsou schopny zamezit zanášení membrán nežádoucími látkami, které obsahuje bioplyn, byť jen ve stopovém množství. Proto se iontové membrány pro obohacení bioplynu v průmyslové praxi zatím nevyužívají. [27] [29] [31]

### 3.4 KRYOGENNÍ SEPARACE

Metoda využívá k separaci CO<sub>2</sub> a CH<sub>4</sub> různé teploty varu. Metan má za atmosférického tlaku bod varu -161 °C a oxid uhličitý -78 °C. Nejprve se surový bioplyn stlačí na 8 MPa ve více stupních s chlazením plynu mezi jednotlivými stupni. Je také nutné plyn předem vysušit, aby se zamezilo vymrazování vody v jednotlivých stupních. Takto upravený bioplyn je ochlazen na -45 °C, oxid uhličitý z kondenzuje a je odstraněn. V dalším kroku je plyn ochlazen až na -55 °C a poté expanduje na tlak 800–100 kPa v expanzní nádobě, čímž se změní teplota plynu až na -110°C. Při těchto podmínkách je oxid uhličitý ve formě pevné fáze a plynná fáze obsahuje více než 97 % metanu. Před opuštěním zařízení je potřeba takto obohacený plyn zahřát. Výhodou tohoto procesu je další využití zkapalněného CO<sub>2</sub> a vysoká čistota metanu, která činí 99 %. [27]

### 3.5 BIOLOGICKÁ KONVERZE

Pro uskutečnění biologické konverze oxidu uhličitého se používají různé metanogeny využívající CO<sub>2</sub> jako zdroj uhlíku a vodík jako zdroj energie. U této reakce hraje zásadní roli teplota, a proto záleží na volbě mezofilního nebo termofilního procesu. Termofilní metanogeny urychlují rychlost vzniku metanu. Doposud se testovala bakterie zvaná *Methanobacterium thermoautotrophicum*, která pracuje optimálně při teplotách 65 až 70°C. Tímto způsobem upravený bioplyn obsahuje přibližně 96 % metanu a 4 % oxidu uhličitého. [27]

### 3.6 POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH TECHNOLOGIÍ

Základní parametry jednotlivých čistících procesů jsou srovnány v následující tabulce. Nejdůležitějším kritériem pro porovnání metod je jejich energetická náročnost a čistota výsledného produktu. Z hlediska spotřeby energie je nejušpornější metoda PSA, zatímco nejnáročnější provoz zastupuje metoda kryogenní. Vzhledem k čistotě získaného produktu lze tvrdit, že všechny metody, s výjimkou membránové separace, dosahují rovnocenných výsledků.

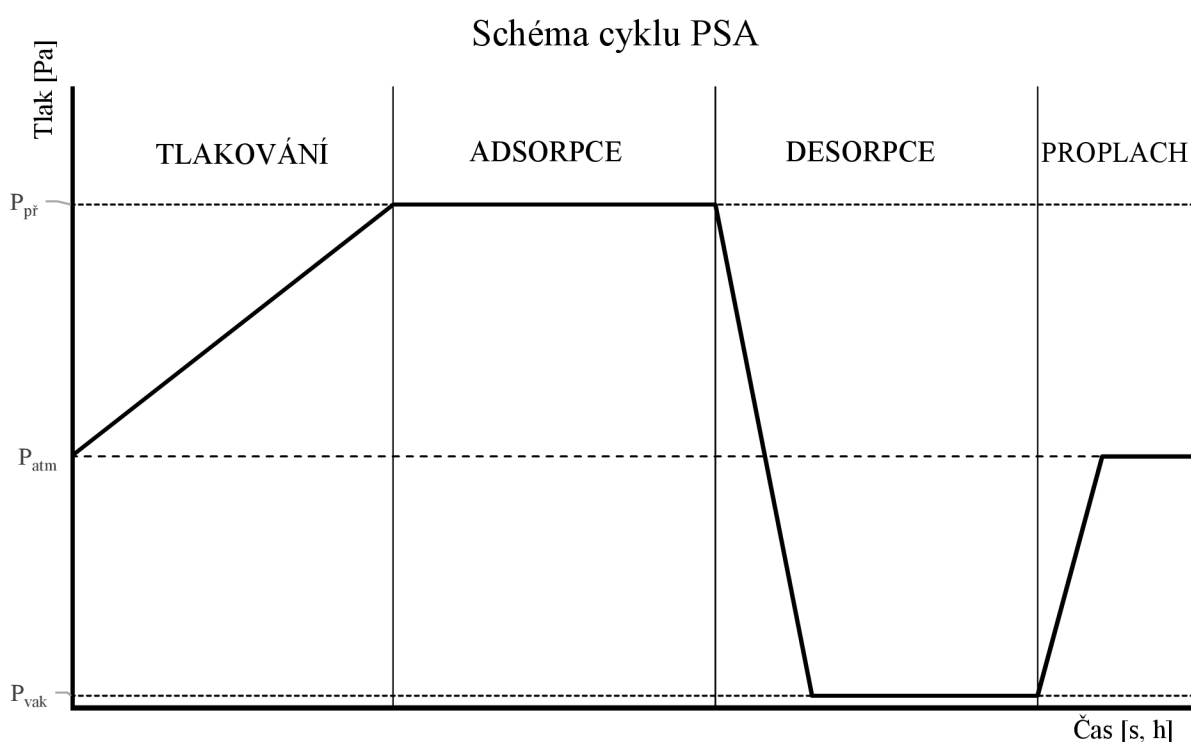
Tab. 5. Srovnání metod čištění bioplynu [26]

Parametr	Jednotky	PSA	vodní vypírka	Chemická vypírka	Membránová separace	Kryogenní metody
Spotřeba energie	[kWh.m <sup>3</sup> ]	0,23	0,3–0,6	0,67		0,8–1,8
Plyn-výstup	[% CH <sub>4</sub> ]	97–99	99	99	95	99
Provozní teplota	[°C]	–	–	160		–80
Provozní tlak	[Mpa]	0,4–0,7	0,4–0,7	atmosférický	vysokotlaké>2 nízkotlaké 0,8-1	
Částečné odstranění H <sub>2</sub> S	[-]	ne	možné	ano	možné	možné
Odstranění vodní páry	[-]	ano	ne	ano	ano	ano
Odstranění N <sub>2</sub> a O <sub>2</sub>	[-]	částečně	ne	ne	částečně	N <sub>2</sub> – možné

## 4 PRINCIP METODY PSA

Selektovaná plynná složka, kterou je potřeba odstranit, je na molekulární úrovni zachytávána na povrchu adsorbentu pomocí Van der Waalsových sil. Tato technologie dokáže separovat z bioplynu nejen oxid uhličitý, ale i kyslík nebo dusík. Selektivita adsorpce závisí na velikosti pórů a použití různých tlaků pro separaci. Jedná se o cyklický proces, při kterém adsorpce probíhá za vyššího tlaku než desorpce – regenerace. Pro vyšší účinnost separace nežádoucí složky je nutné surový plyn vysušit a odstranit především sulfan ( $\text{H}_2\text{S}$ ).

Metoda se dá rozdělit na čtyři základní kroky. Prvním je komprese, kde probíhá zhuštění bioplynu tlakem, který se pohybuje mezi šesti až osmi bary. Dále následuje adsorpce, kde je v našem případě oxid uhličitý pohlcován až do nasycení molekulární sítě  $\text{CO}_2$ . Po nasycení adsorbentu je potřeba odčerpat nepohlčený plyn. Jedná se zpravidla o zbylou složku plynu, např. metan. Celý cyklus je ukončen desorpcí, při které dochází k regeneraci adsorbentu, tzn. odčerpání plynu z pórů adsorbentu a takto ho uschopňuje k přijetí dalších molekul v následujícím cyklu. Zjednodušené schéma procesu je uvedeno na Obr. 7. Kapacitu zachycované látky lze navýšit snížením teploty a zvýšením tlaku. Vliv teploty však není zásadní, a proto není nutné přes vývin tepla během adsorpce proces chladit. Vzhledem k výskytu metanu se ale doporučuje teplotu kontrolovat z důvodu prevence požáru a mělo by být připraveno nouzové chlazení. V laboratorních podmínkách poslouží pro odvod plynu digestoř vybavená ventilátorem v nevýbušném provedení. [25] [26]



Obr. 7. Zjednodušené schéma cyklu PSA



## 4.1 ADSORPCE

Adsorpce je jev obrovské technologické důležitosti, který nastává vždy, když se povrch tuhé látky dostane do kontaktu s plynem či kapalinou. Můžeme jej definovat jako vzrůst hustoty tekutiny (plynu nebo kapaliny) či koncentrace jisté složky směsi tekutin v blízkosti mezifázového rozhraní (v případě tuhých látek v blízkosti jejich povrchu). Celkový účinek jevu je tedy závislý na velikosti mezifázového rozhraní. Z tohoto důvodu je povrch tuhých látek užívaných v adsorpčních aplikacích obvykle velký (dosahující často hodnot vyšších než 100 m<sup>2</sup> /g), čehož je dosahováno vysokou mírou porozity materiálu či užitím velmi malých částic tuhé látky. Adsorpce patří mezi děje exotermní. Při tomto ději dochází k uvolnění tepla. Proto také adsorbované množství látky při konstantním tlaku klesá s rostoucí teplotou. [38]

### 4.1.1 FYZIKÁLNÍ ADSORPCE

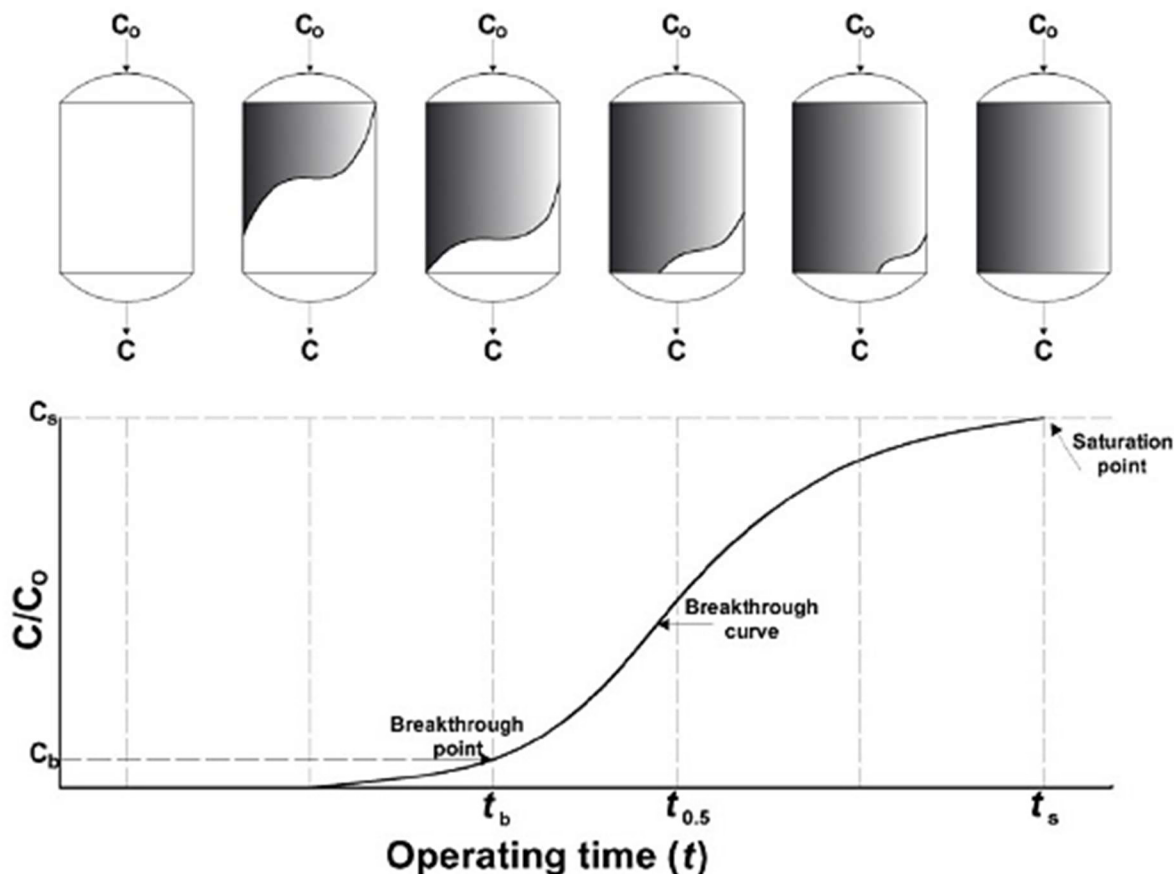
Adsorpční síly působící mezi molekulou a povrchem pevné látky mohou dosahovat velmi rozdílných hodnot a mohou být způsobeny rozdílnými typy sil. Podle charakteru sil způsobujících adsorpční jev rozlišujeme dva základní druhy procesů: fyzikální adsorpci a chemickou adsorpci (zkráceně chemisorpci). Síly způsobující fyzikální adsorpci jsou stejného druhu jako síly zodpovědné za kondenzaci par a existenci kondenzovaného stavu látek nebo za odchylky ve stavovém chování reálných plynů od ideálního stavového chování. Takové síly označujeme jako van der Waalovy. Naproti tomu je chemická adsorpce způsobena pomocí chemických vazeb. [43]

### 4.1.2 CHEMISORPCE

Chemická adsorpce, taktéž označovaná v některých publikacích jako nevratná, je charakterizována velkým interakčním potenciálem, tedy vysokou intenzitou vzájemného působení molekuly a povrchu pevné látky, která se projevuje vysokými hodnotami adsorpčních tepel uvolňovaných v průběhu adsorpce. Tento způsob je omezený jen pro určité druhy molekul. Adsorpce tohoto typu probíhá jen na určitých, tzv. adsorpčních místech povrchu adsorbentu vykazujících specifickou reaktivitu. Ve srovnání s fyzikální adsorpcí probíhá chemisorpce, zvláště za nižších teplot, mnohem pomaleji. Tvoří totiž pouze jednu vrstvu a adsorpční teplo se řádově shoduje s teplem reakčním. [43]

## 4.2 PRŮRAZOVÉ KŘIVKY

K popisu kinetiky procesu nám slouží tzv. průrazová křivka (angl. breakthrough curves). Jedná se o zobrazení závislosti poměru koncentrace adsorbované látky na vstupu a výstupu z adsorpční kolony na čase. Z těchto křivek lze určit adsorbované množství jednotlivých komponent za daných podmínek (teplota, složení plyné směsi) a vypočítat tak složení adsorbované fáze a z něj pak adsorpční účinnost. [39]



Obr. 8. Příklad průrazové křivky [19]

Překlad:

*Breakthrough point* – bod průrazu

*Breakthrough curve* – průrazová křivka

*Saturation point* – bod nasycení

*Operating time* – čas procesu

Na Obr. 8 můžeme vidět typickou podobu průrazové křivky. Ve schématickém zobrazení jsou vyznačeny dva důležité časové okamžiky. První je bod průrazu v čase  $t_b$ . Do tohoto času je adsorbent schopen dokonale přijímat adsorbovanou složku směsi. Jakmile proces dostoupí do tohoto bodu, začne se na výstupu z kolony objevovat koncentrace adsorbované složky. Jako smluvní hodnota pro objektivní posouzení různých průrazových křivek se uvažuje relativní koncentrace 0,05 (5 %). Dalším významným bodem je bod nasycení  $t_s$ , kdy je na výstupu z kolony shodná koncentrace složky jako na jejím vstupu. Složka se v tento okamžik téměř neadsorbuje. Opět, jako u bodu průrazu, zde existuje smluvní hodnota relativní koncentrace 0,95 (95 %). Mezi těmito uvedenými časy dochází ke skokové změně, kdy v relativně malém časovém intervalu dochází ke změně relativní koncentrace z 0 na 100 %.

Po získání (naměření) grafické podoby průrazové křivky je možné dopočítat množství plynu zachyceného od počátku experimentu na adsorbentu. Jeho hodnota koresponduje s plochou ohraničenou průrazovou křivkou a shora omezenou maximální relativní koncentrací. Pro vyčíslení adsorpční kapacity lože (množství zachyceného adsorbátu) lze použít například lichoběžníkovou integrační metodu podle rovnice (1).

$$m_a = \sum_{i=0}^{i=t_{max}} \left[ \left( c_{max} - \frac{c_1 + c_2}{2} \right) \cdot \frac{Q_v \cdot MW_a}{m_{au} \cdot V_g} \cdot \Delta t \right]_i \quad (1)$$

kde	index a	označení pro konkrétní sledovanou látku (-)
	$c_{max}$	nejvyšší výstupní koncentrace (-)
	$Q_v$	objemový průtok ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )
	$MW_a$	molární hmotnost ( $kg \cdot mol^{-1}$ )
	$m_{AU}$	hmotnost adsorbentu na počátku (kg)
	$V_g$	molární objem ideálního plynu ( $m^3 \cdot mol^{-1}$ )
	$\Delta t$	časový interval (s)
	$c_1$	hodnota koncentrace na začátku početního intervalu (-)
	$c_2$	hodnota koncentrace na konci početního intervalu (-)

$MW_a$  je molární hmotnost konkrétní sledované látky,  $c_{max}$  představuje bod na křivce, odpovídající nejvyšší výstupní koncentraci a času  $t_s$ . Koncentrace  $c_1$  a  $c_2$  jsou hodnoty na začátku a konci početního intervalu o délce odpovídající časovému intervalu záznamu dat  $\Delta t$ . V našem případě se bude jednat o časový interval 1 s. Proměnná  $Q_v$  je objemový průtok směsi adsorbérem,  $m_{AU}$  je hmotnost adsorbentu na počátku a  $V_g$  představuje molární objem ideálního plynu (pro NFP je  $V_g = 0,022414 m^3 \cdot mol^{-1}$ ).

Díky průrazovým křivkám je tedy možné vyhodnotit čas, po který vychází z adsorbéru směs požadovaného složení a tím pádem i množství adsorbátu zachyceného v loži adsorbentu. Podle průběhu průrazové křivky mezi časy  $t_b$  a  $t_s$ , můžeme do jisté míry posuzovat i kinetiku adsorpce za daných podmínek. [39]

## 4.3 ADSORBENTY

Pro výrobu adsorbentů jsou zpravidla používány materiály, které na sebe adsorbují vhodný plyn (látku), např. za účelem vhodnější manipulace nebo úplného odstranění z daného prostředí. Plocha povrchu adsorbentů závisí na jejich struktuře, na pórovitosti. Adsorbenty se obvykle používají ve formě sférických částic, tyčinek nebo úlomků krystalů o rozměrech nejčastěji mezi 0,5 až 10 mm. Musí mít vysokou abrazivní odolnost, vysokou teplotní stabilitu a malý průměr pórů, které zvyšují přístupnou plochu povrchu, a tedy i kapacitu adsorpce.

### 4.3.1 SILIKAGEL

Často používaným adsorbentem je např. silikagel. Silikagel je granulovitý pórovitý materiál synteticky vyráběný z křemičitanu sodného. Nejčastěji se používá v aplikacích, kde je nutné pohlcovat vlhkost. Silikagel může snížit relativní vlhkost uzavřeného systému až na 40 % a po nasycení vodou může být regenerován ohřátím na 150 °C. [20]

### 4.3.2 ZEOLITY

Dalšími z řady hojně využívaných adsorbentů jsou zeolity. Jsou to buď přírodní materiály nebo synteticky vyrobené aluminosilikáty tvořící pravidelnou krystalovou mříž s molekulárními póry. Průměr kanálků zeolitových klecí má obvykle velikost od 2 do 9 Å (pod 1 nm). Zeolity se používají k odebrání CO<sub>2</sub> z přírodních plynů nebo k odebrání CO při výrobě vodíku parním reformováním. [20]

### 4.3.3 AKTIVNÍ UHLÍ

Aktivní uhlí, dále AU, je jedním z nejčastěji využívaným adsorbentem s extrémně vysokou plochou povrchu. Tato látka je produkt vyráběný z uhlí, dřeva nebo kokosových ořechů. Výrobní proces se skládá z karbonizace a aktivace. Aktivní uhlí má pórovitou strukturu a velkou specifickou plochu povrchu až 2000 m<sup>2</sup>/g a rozměry pórů se pohybují řádově v nm. Může adsorbovat široké spektrum látek. Molekulární struktura aktivního uhlí se podobá struktuře grafitových destiček širokých několik atomů, které tvoří stěnu molekulárních otvorů (pórů). Aktivní uhlí se často využívá pro adsorpci organických sloučenin a také pro čištění odpadních plynů a vod. [20]

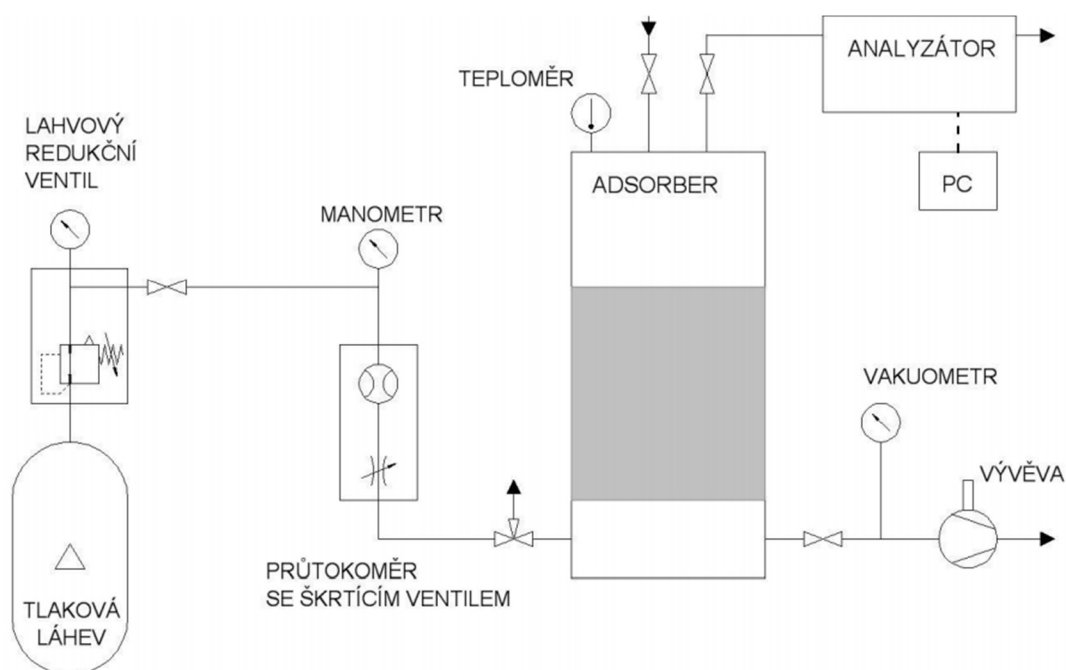


*Obr. 9. Aktivní uhlí [21]*

## 5 PŮVODNÍ PODOBA SESTAVY

Měření na původní sestavě probíhalo pouze pro jeden adsorbér. Celý proces proto probíhal diskontinuálně. Byla zkoumána schopnost jednotky dosáhnout požadovaného stupně čistoty výstupního plynu. Také všechny ventily byly obsluhovány ručně, což výrazně komplikovalo experiment.

Jak můžeme vidět na Obr. 10, vstupní tlak směsi plynu se nastavil pomocí redukčního ventilu na tlakové láhvi. Dále bylo potřeba upravit její průtok na rotametu se škrtícím ventilem. Při adsorpci plyn vstupoval do spodní části adsorbéru, který byl naplněn aktivním uhlím. Ve vrchní části adsorbéru byl připojen analyzátor, který měřil koncentraci sledované složky na výstupu. Měřené data se zapisovala do počítače. K desorpci a regeneraci adsorbentu sloužila membránová vývěva.



Obr. 10. Schéma původní jednotky PSA [39]

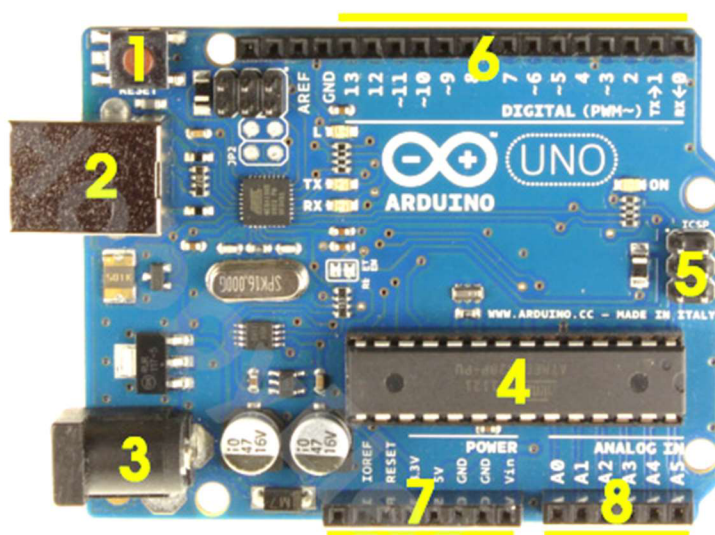
## 6 METODY AUTOMATIZACE PROCESU

Jedním z hlavních cílů této práce je proces čištění bioplynu zautomatizovat. V následující kapitole jsou uvedeny jednotlivé zařízení, běžně používané pro automatizaci výrobních procesů. Zvláště je věnovaná pozornost programovatelné kartě Arduino, která se sice v praxi běžně nevyužívá, ale pro náš laboratorní experiment na jednotce PSA je dostačující. Základní předpoklad zavedení automatizace je zvýšení výkonu jednotky PSA z důvodu minimalizace času, potřebného pro manipulaci s přepínači nebo původně pro ruční manipulaci s ventily.

### 6.1 KARTA ARDUINO

Samotná karta Arduino je otevřená elektronická platforma založená na jednoduché počítačové desce s programovatelným mikročipem ATmega 328 a vývojovém prostředí, které slouží k tvorbě software. Tato koncepce je cenově dostupná a umožňuje vytvářet interaktivní objekty lidem, kteří mají v oblasti programování jen letmé znalosti. Arduino deska získává údaje z různých snímačů a senzorů (např. snímač osvětlení, vzdálenosti, stisk tlačítka...) a na základě těchto údajů vyhodnocuje podněty a ovládá potřebné výstupy (rozsvícení LED, zapnutí motoru či světla). Samotná deska Arduino je velmi jednoduchá a tvoří ji v podstatě mikrokontrolér, krystal, napájecí zdroj 5 V a převodník nutný pro komunikaci s počítačem. Aby deska vykonávala potřebné úkony, musí se vytvořit program pro Arduino mikrokontrolér. Pro tuto činnost je využíván programovací jazyk určený přímo pro Arduino – jazyk Wiring. Dle požadované funkce, např. ovládání motoru, displeje nebo bezdrátového modulu je nutné pořídit i další rozšiřující desky, kterých má Arduino na výběr širokou škálu. [33]

Na následujícím obrázku jsou popsány hlavní komponenty karty Arduino.



Obr. 11. Komponenty karty Arduino [35]

Tab. 6. Popis karty Arduino

Číslo pozice	Název	Funkce
1	Tlačítko reset	Při stisku se program spustí od začátku
2	USB konektor	Slouží pro propojení počítače a k nahrání programu
3	Napájecí konektor	Slouží k napájení karty externím zdrojem napětí
4	Mikroprocesor	Řídící jednotka karty
5	AVR ISP konektor	Určený pro pokročilé programátory, připojení externího převodníku
6	Digitální piny	Výstup na těchto pinech nabývá hodnoty 0/1, slouží k zapojení externích zařízení (sensory, motory...)
7	Napájecí piny	Pro přívod napájecího napětí, zpravidla 3,3 nebo 5 V
8	Analogové piny	Výstup těchto pinů může nabývat hodnoty 1-1024 (dle převodníku karty)

### 6.1.1 HISTORIE

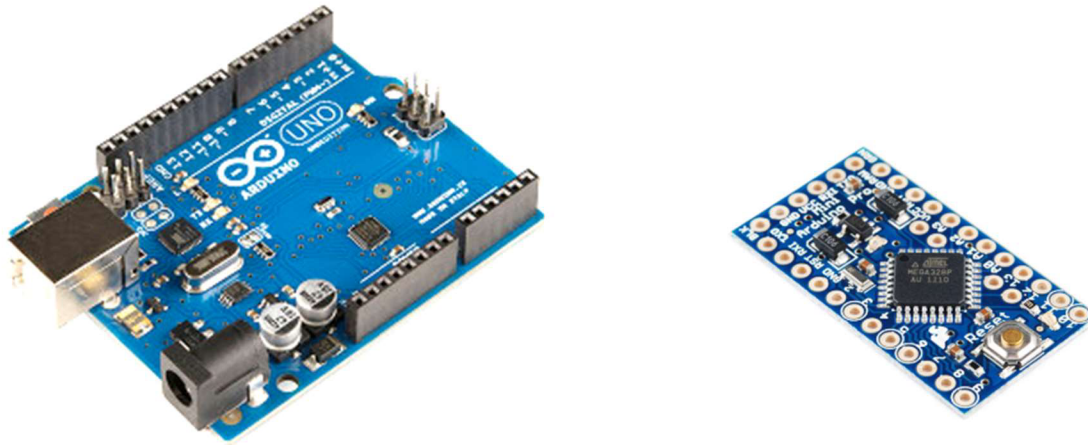
Vývoj první karty Arduino započal v roce 2005, kdy se pracovníci z italského Interaction Design Institute ve městě Ivrea rozhodli vytvořit jednoduchý a finančně dostupný vývojový set pro studenty. Mezi studenty se karta Arduino uchytila, a tak se tvůrci rozhodli poskytnout tuto platformu celému světu včetně všech schémat a návodů, protože se jedná o Open Source projekt. V dnešní době se prodalo již několik stotisíc desek Arduino. Tato platforma se stále vyvíjí a nedávno byl ohlášen vývoj nové a výkonné desky Arduino Galileo, která vzniká ve spolupráci se společností Intel. [34]

### 6.1.2 TYPY DESEK

Srdcem každé desky Arduino je 8 bitový procesor z rodiny AVR od firmy Atmel, který je obklopen dalšími elektronickými komponenty. Pro celou řadu desek je typické jednotné grafické zpracování s převažující modrou barvou. Na většině desek je mimo hlavního čipu ještě převodník, který umožňuje komunikaci mezi PC (USB) a čipem. Existují však i typy, které převodník nemají. Může to být ze dvou důvodů. Prvním z nich je úspora místa a následná nutnost použití externího převodníku, např. typ Arduino Mini. Druhým typem jsou ty, jejichž čip má v sobě tento převodník zabudovaný. [34]

Jako první se na trhu představila karta Arduino Uno. Poté následovaly její různé obměny disponující různými funkcemi, např. Arduino Leonardo, Arduino Mega2560 nebo Arduino Due.

Na Obr. 12 jsou uvedeny vybrané druhy karet. Vlevo můžeme vidět Arduino UNO a vpravo Arduino Mini.



Obr. 12. Vybrané druhy karet [36]

### 6.1.3 PROGRAMOVACÍ JAZYK WIRING

Tento programovací jazyk se dělí na dvě hlavní části *setup()* a *loop()*. Jak už anglické názvy napovídají, funkce *setup* je používána pouze k definování počátečního nastavení prostředí a spustí se pouze na začátku programu na rozdíl od funkce *loop()*, která je volána opakovaně, dokud je deska spuštěná. Na následujících řádcích je uveden typický ukázkový program pro mikroprocesor, tj. blikání LED. [22]

```
void setup() {  
    pinMode(13, OUTPUT);    // nastaví patřičný pin karty (LED) jako výstup (č. 13)  
}  
  
void loop() {  
    digitalWrite(13, HIGH); // příkaz pro zapnutí pinu 13 (log 1), LED dioda se zapne  
    delay(1000);            // příkaz pro definici časové prodlevy v [ms] (1 sekunda)  
    digitalWrite(13, LOW);  // příkaz pro vypnutí pinu 13 (log 0), LED dioda se vypne  
    delay(1000);           // opět prodleva 1000 ms  
}                           // program se dále vrátí na příkaz digitalWrite(13, HIGH);
```



## 6.2 PROGRAMOVATELNÝ AUTOMAT PLC

Programovatelný logický automat PLC (Programmable Logic Controller) patří k nejpoužívanějším automatizačním prostředkům v průmyslu. Pomocí PLC lze například řešit vazby mezi regulací různých veličin (třeba teploty a vlhkosti, teploty a kvality spalování, teploty a dodržení sjednané spotřeby) nebo optimalizovat proces a přizpůsobovat jej měnícím se podmínkám, minimalizovat spotřebu, náklady nebo ztráty. V automatizační technice jsou využívány již zhruba 30 let. Původně byly PLC určeny pro řízení strojů, jako náhrada za pevnou reléovou logiku. Tomu odpovídal i programovací jazyk kontaktních (reléových) schémat. Dnes je pro každý programovatelný automat k dispozici několik typů jazyků jako např. jazyk kontaktních schémat, jazyk logických schémat, jazyk mnemokódů nebo nově zavedený jazyk sekvenčního programování. Vzhledem k různorodosti těchto programovacích jazyků je v dnešní době snaha tyto jazyky sjednotit. [45]



Obr. 13. Ukázka zařízení PLC [44]

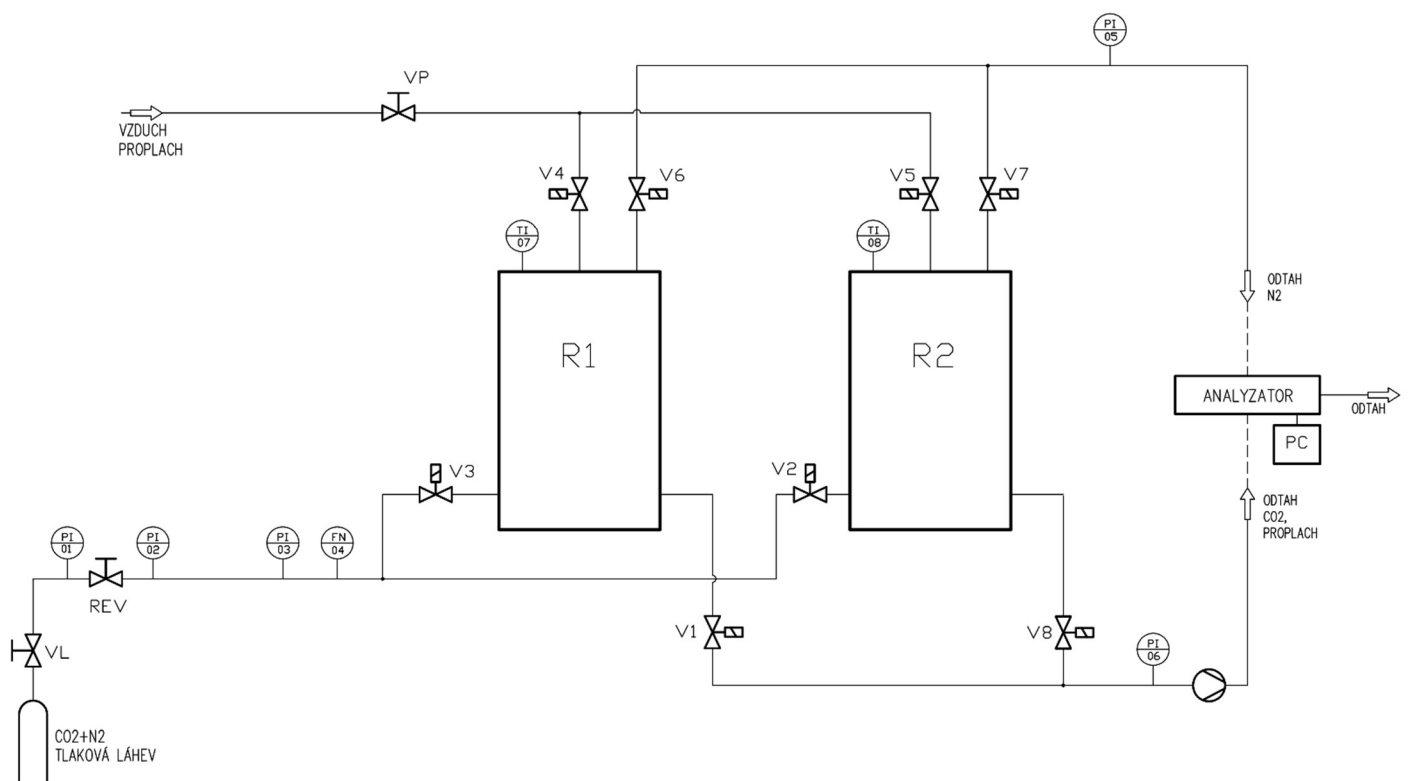
### 6.2.1 CENTRÁLNÍ JEDNOTKA

Poskytuje programovatelnému automatu inteligenci. Obsahuje mikroprocesor, mikrořadič nebo specializovaný řadič, zaměřený na rychlé provádění instrukcí. Centrální jednotka také zajišťuje i základní komunikační funkce s vlastními i vzdálenými moduly, s nadřazeným systémem a s programovacím přístrojem. Paměťový prostor, který jednotka poskytuje uživateli, je obvykle rozdělen na části. Prvá je určena pro uložení uživatelského programu (PLC programu), datových bloků a tabulek. Druhá část je operační (zápisník). Jsou v ní lokalizovány čítače, časovače, obrazy vstupů a výstupů, komunikační, časové a jiné systémové proměnné. Obsah operační části se dynamicky mění působením uživatelského a systémového programu. [45]

## 7 POPIS MODERNIZOVANÉ LABORATORNÍ JEDNOTKY PSA

### 7.1 POPIS MECHANICKÉHO ZAPOJENÍ

Zásadní inovace stávající laboratorní jednotky spočívá v zapojení druhého adsorbéru, který nám umožní kontinuální chod procesu. Jakmile dojde k regeneraci adsorbentu a vypouštění plynu z prvního adsorbéru, druhý se začne plnit a naopak. Také došlo k výměně mechanických ventilů za elektricky řízené. Pro jejich ovládání byl navržen ovládací panel, který bude popsán dále. Tyto zdokonalení nám také dovolily celý proces zautomatizovat a tím minimalizovat časy manipulace s ventily. K tomuto účelu posloužila programovatelná karta Arduino, vestavená do ovládacího panelu. Poté bylo možné pomocí uživatelského rozhraní v počítači, nastavit časy otevření ventilů.



Obr. 14. PID schéma jednotky PSA

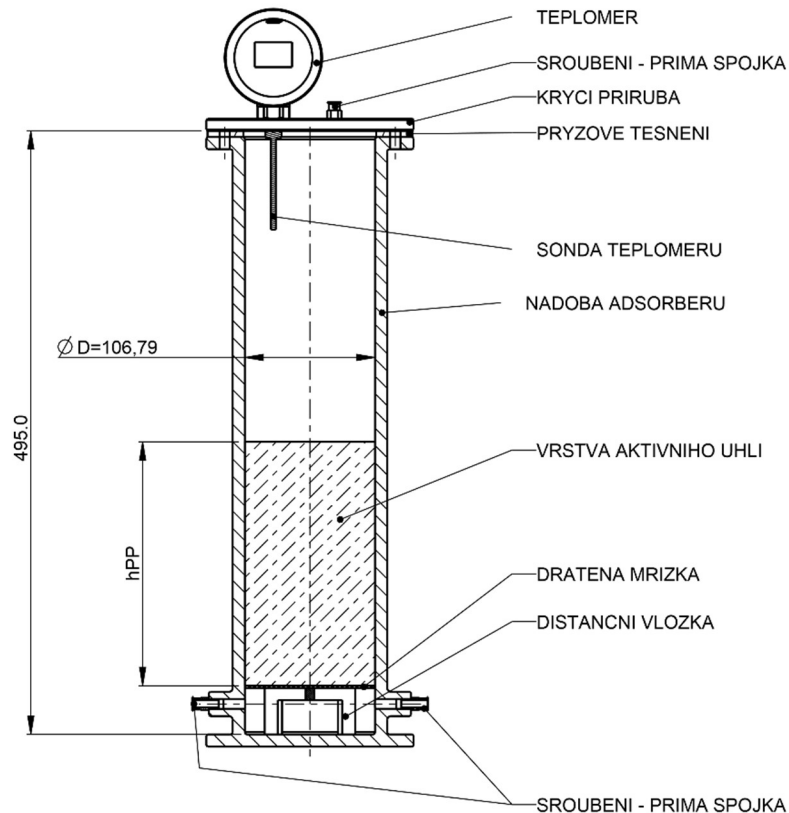
Celkem sestava disponuje dvěma adsorbéry označenými R1 a R2, dále osmi elektricky řízenými ventily V1 až V8, manometry PI, jedním průtokoměrem FN, vývěvou, plynovým analyzátořem, ventily VP, RED a VL. Směs plynů oxidu uhličitého a dusíku je odebírána z tlakové láhve. Potrubní trasa je realizována pomocí tlakové plastové hadice.

Kompletní PID schéma s legendou je uvedeno v příloze č. 1.

## 7.2 MECHANICKÁ ZAŘÍZENÍ

### 7.2.1 ADSORBÉR

Adsorbéry jsou tlaková zařízení válcového tvaru obsahující adsorbent, v tomto případě aktivní uhlí. Pro vyšší odolnost jsou vyrobeny z nerez oceli. Ve vrchní části je ve víku příruby umístěn digitální teploměr monitorující stav teploty během adsorpce. Ve vrchní a spodní části jsou také umístěny šroubení pro přívod nebo odvod plynu. Hlavní rozměry zařízení jsou uvedeny na následujícím obrázku.



Obr. 15. Adsorbér [39]

### 7.2.2 VENTILY

Jedná se o ventily s řídicí cívkou, která nese označení 24 1241, typ 54 a pochází od firmy REGADA. Má také stupeň ochrany IP65 vůči tryskající vodě.



Obr. 16. Elektromagnetické ventily [38]

Ventily jsou ve své základní poloze zavřené, přivedením napětí na závity cívky, se otevřou. Díky tomuto zdokonalení jsme schopni soustavu ovládat ze vzdáleného obslužného panelu pomocí přepínačů či programu zadaného přes uživatelské rozhraní v PC.

## 7.3 PŘÍSLUŠENSTVÍ

### 7.3.1 TLAKOVÁ LÁHEV

Tlaková láhev od firmy Linde obsahuje 70,00 % oxidu uhličitého, zbytek je doplněn dusíkem. Objem činí 20 l a tlak 49,9 bar. Směs plynu má kalibrační jakost. Pro regulaci tlaku nám poslouží redukční ventil, který zároveň obsahuje dva manometry. Jeden ukazuje tlak v láhvi a další ukazuje hodnotu tlaku po regulaci.



Obr. 17. Redukční ventil s manometry [46]

### 7.3.2 ANALYZÁTOR

Pro kontinuální měření koncentrace plynu byl použit analyzátor od výrobce ABB, řada EasyLine, typ ABB EL 3020. Tento analyzátor pracuje na principu infračervené spektrofotometrie. Použitý typ s detektorem Uras26 dokáže vyhodnotit koncentraci oxidu uhličitého a metanu. Jelikož byl experiment prováděn se směsí CO<sub>2</sub> a N<sub>2</sub>, sledovala se pouze koncentrace oxidu uhličitého, zbytek tvořil dusík.

### 7.3.3 VÝVĚVA

Vývěva byla použita olejová rotační pro hluboké vakuum typu IKS RC-4D, kterou dodává firma Merci. Dokáže vytvořit vakuum o absolutním tlaku 0,01 mbar a její čerpací rychlost je 4,3m<sup>3</sup>/h.

## 7.4 MĚŘÍCÍ PRVKY

### 7.4.1 ROTAMETR

Jako průtokoměr posloužil rotametr od firmy OMEGA Engineering, Inc., který má stupnici v anglosaských jednotkách SCFH (průtok jedné stopy krychlové za hodinu při standardních podmínkách). Měřicí rozsah je od 0,5 do 10 SCFH. Technika měření průtoku je založena na dosažení rovnováhy plováku, který se dokáže v kuželovité trubici volně pohybovat.



Obr. 18. Rotametr

V případě potřeby vyčíslení průtoku v  $[m^3/hod]$ , použijeme stavovou rovnici ideálního plynu. Přepočet je spolu s dalšími výpočty uveden v příloze č.3.

### 7.4.2 TEPLOMĚR

Použité snímače jsou teploměry s digitálním zobrazením teploty z řady TDi od firmy SENSIT. TDi varianta je osazena programovatelným převodníkem do proudové smyčky 4–20 mA. Tlačítka umožňují nastavit některé parametry proudové smyčky a zobrazení na displeji (např. jednotku teploty). Měřicí rozsah teploměru je od 0–150°C. [41]



Obr. 19. Digitální teploměr [42]

### 7.4.3 MANOMETRY

Pro měření byly použity běžné glycerinové manometry s rozsahem 0-1 bar.

## 7.5 POPIS ELEKTRICKÉHO ZAPOJENÍ

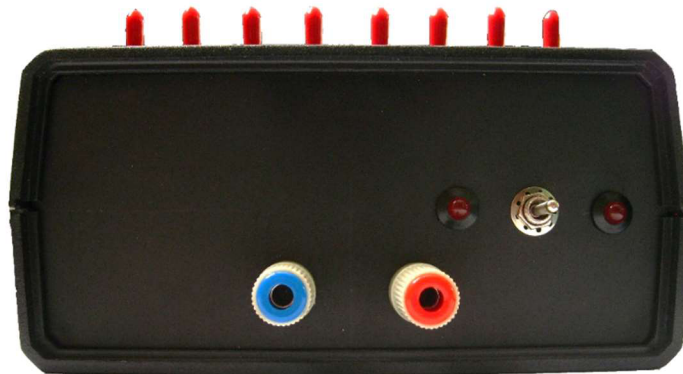
System ovládání byl koncipován jako dvou-režimový: manuální pro jednoduché úkony a automatický, kdy je celé zařízení ovládáno dle nastaveného programu.

Pro volbu způsobu ovládání byl navržen elektronický ovládací panel. Zařízení je situováno do plastové konstrukční skříně o rozměrech 180 x 150 x 70. Podle počtu ovládaných ventilů obsahuje také osm přepínačů, signalizačních dvoubarevných LED diod a připojovacích konektorů. Přepínače jsou dvoupolohové, zdvojené, nejen z důvodu ovládání ventilů, nýbrž i pro přívod napětí na indikační LED diody zobrazující stav ventilů. Jedná se o diody disponující červenou a zelenou barvou. Indikace je koncipována tak, že pokud jsou ventily v uzavřeném stavu, dioda svítí červeně, a pokud jsou ventily otevřeny, svítí zeleně.



*Obr. 20. Ovládací panel ventilů*

Dále jsou na čelní straně situovány závitové konektory pro přívod stejnosměrného elektrického napětí pro napájení cívek ventilů. Pracovní napětí se volilo dle doporučené hodnoty pro otevření ventilů, 24 V. Hlavní přepínač, kterým si obsluha může zvolit manuální či automatickou metodu ovládání ventilů je třípolohový, umožňuje nulovou polohu-vypnutí nebo nastavení metody ovládání soustavy. Zde také nesmíme zapomenout na indikační LED diody. Použity jsou běžné jednobarevné, červené, zobrazující aktuální stav panelu.



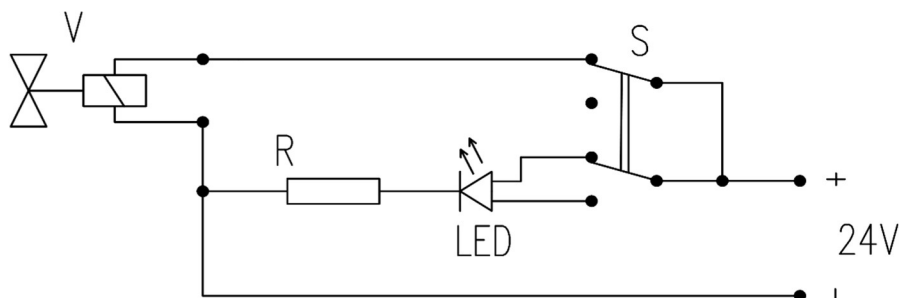
Obr. 21. Přední část panelu

Na zadní straně panelu jsou umístěny konektory pro připojení ventilů. Jedná se o klasické napájecí konektory pro stejnosměrné napětí.



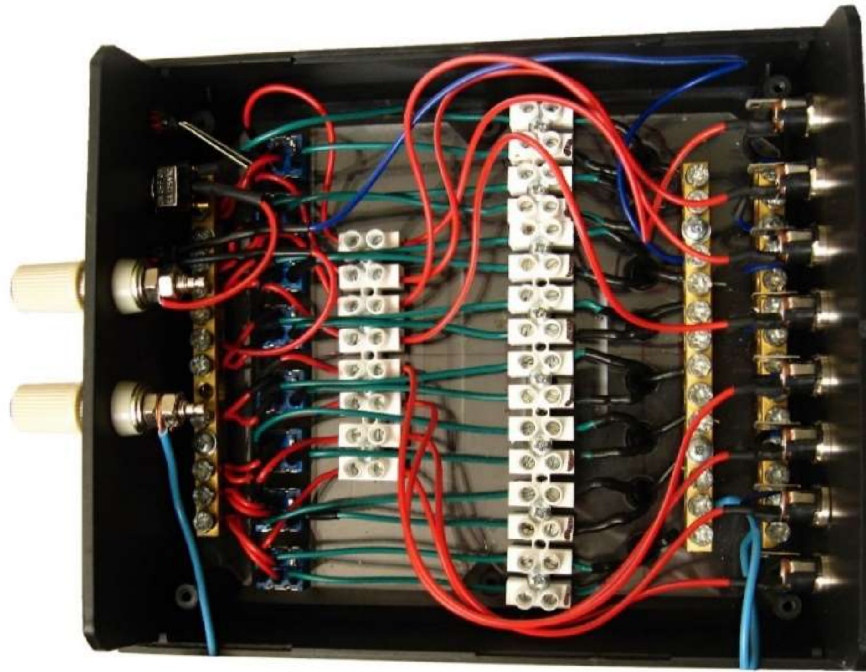
Obr. 22. Napájecí konektory

Kompletní elektrické schéma je uvedeno v příloze č. 2 na konci této práce. Příkládám zde první verzi zjednodušeného schématu manuálního ovládní pomocí přepínačů, ze kterého je patrný princip funkce. Kladné napětí je přivedeno na svorku přepínače, který pak dále přivede napětí buď na konektor ventilu, nebo na prázdnou svorku přepínače. Jelikož je přepínač zdvojený, zároveň se jeho polohou určuje, na kterou anodu LED diody se napětí přivede. LED dioda je typu společné katody, na kterou je připojen předřazený rezistor omezující napětí a zabráňující případnému poškození LED diody.



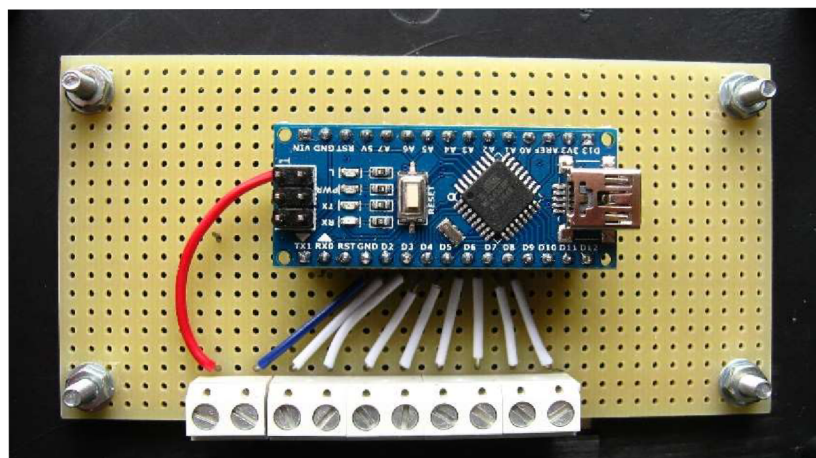
Obr. 23. Zjednodušené schéma zapojení

Na dalším obrázku můžeme vidět výslednou realizaci zapojení manuálního ovládání ventilů. Jelikož manuální verze ovládání vznikala jako první, musela počítat i s implementací karty Arduino. Proto zde můžeme vidět větší množství svorkovnic.



*Obr. 24. Zapojení panelu*

Dále bylo nutno panel vybavit kartou Arduino. Pro tento účel posloužil typ Arduino Nano, který má oproti jiným kartám menší rozměry vhodné pro aplikaci do menších zařízení. Toto srdce automatizačního procesu je připevněno pomocí násuvné patice, připájené k univerzální desce plošných spojů. Pro snadnější manipulaci s konektory je také deska osazena svorkovnicemi.

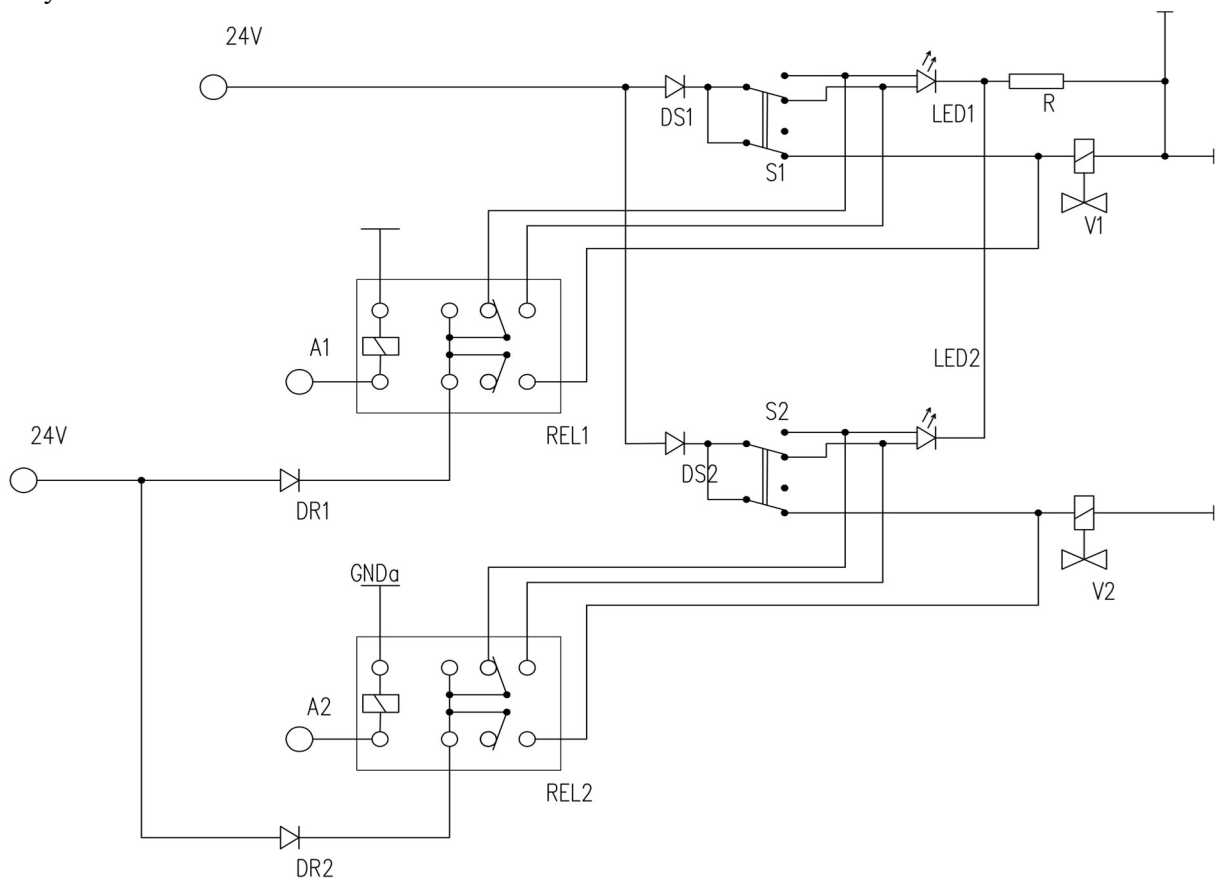


*Obr. 25. Karta Arduino*



Jelikož karta Arduino pracuje s napětím 5V a je schopna poskytnout na výstupním pinu pouze proud 40 mA, bylo by nemožné přímo ovládat cívky ventilů, které pro své otevření vyžadují napětí 24V a minimální proud 0,75A. Proto bylo nutné zavést pro ovládání každého ventilu relé, jehož spínací cívka vyhovuje parametrům výstupních pinů z karty Arduino. Bylo vybráno relé nesoucí označení M4-5H, zdvojené. Jedná se o analogii s mechanickými přepínači – jedna strana relé ovládá ventily a druhá část LED diody tak, aby na nich bylo možné zobrazovat stav ventilu.

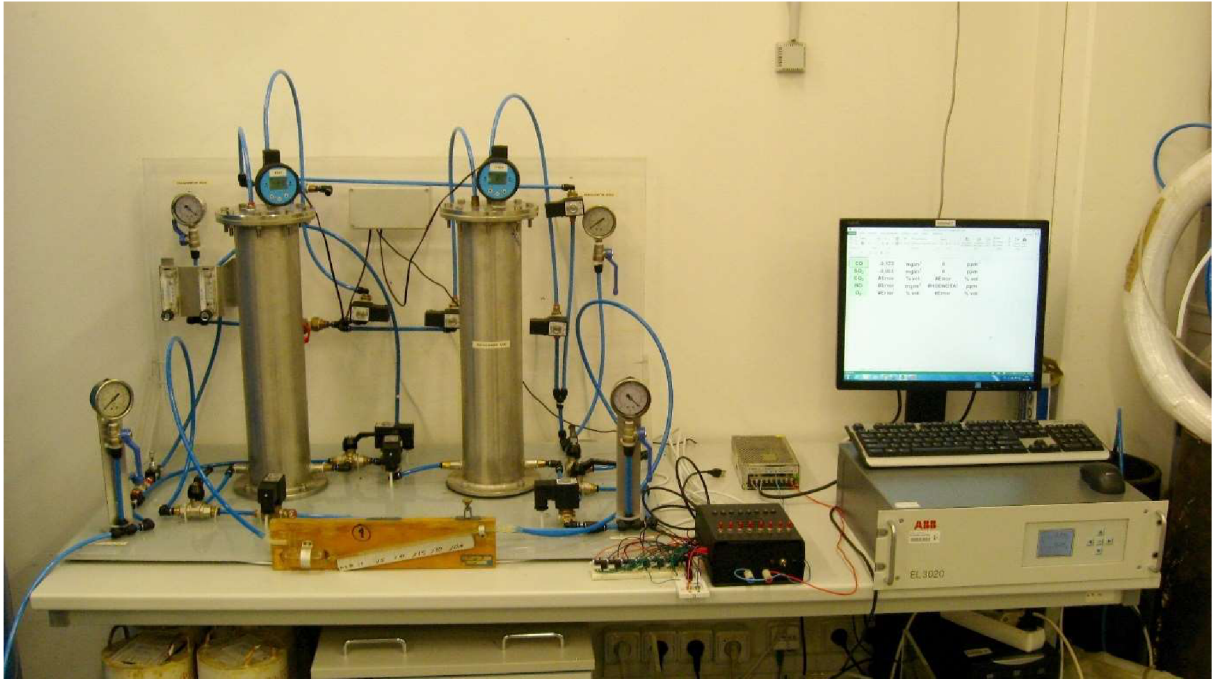
Po zavedení relé ovšem nastal problém ve formě výskytu napětí i na dalších větvích obvodu, kde správně být nemělo. Tento nežádoucí jev měl za následek zobrazení chybných barev na indikačních LED diodách a výskyt napětí na výstupních konektorech i přes jejich vypnutý stav, což by mohlo způsobit nekontrolovatelné otevírání ventilů. Následně byl tento problém diagnostikován jako propojení jednotlivých sekcí pomocí vnitřních obvodů relé. Následující obrázek je výřez z kompletního schématu a znázorňuje zapojení dvou obvodů ovládající ventily.



Obr. 26. Elektrické schéma znázorňující funkci diod

Tento problém vyřešilo zapojení klasické usměrňovací diody DR1,2 a DS1,2 v závěrném směru před vstup každého relé a přepínače. Toto opatření sice zamezilo výskytu nežádoucího napětí, ale bohužel přidáním dalších součástek se zapojení objemově zvětšilo a jeho následná implementace do skříně ovládacího panelu už nebyla možná. Proto se muselo přistoupit k realizaci externího zapojení s relé. K tomuto účelu posloužilo univerzální nepájivé pole.

Celková realizace jednotky je na Obr. 27.



Obr. 27. Modernizovaná jednotka PSA

V levé části obrázku se nachází modernizovaná jednotka. Uprostřed je vidět ovládací panel, napájený průmyslovým zdrojem napětí, a v pravé části je situován plynový analyzátor propojený s počítačem.

## 7.6 POPIS OBSLUHY OVLÁDACÍHO PANELU

### 7.6.1 MANUÁLNÍ OBSLUHA

Manuální obsluhou se rozumí řízení otevírání ventilů pomocí přepínačů na ovládacím panelu. Nejprve je nutné připojit k panelu zdroj napětí na svorky, nacházející se na přední straně skříně, a na hlavním přepínači vybrat možnost „M“ (Manuální ovládání). Indikační diody se rozsvítí červeně, což znamená uzavřený stav ventilů.



Obr. 28. Detail přední strany panelu

Pro napájení panelu je použit spínaný modulový průmyslový zdroj WXD o výkonu 240 W napětí 24 V, a který je schopen dodat proud až 10A. Vzhledem k celkovému příkonu ovládacího

panelu, který je výsledkem součtu příkonu osmi spínaných ventilů a LED diod a který činí přibližně 4A, je tento zdroj dostatečně tvrdý a stabilní.

Dalším krokem je zprovoznění plynového analyzátoru. Propojení mezi analyzátozem a počítačem zajišťoval kabel s převodníkem USB/RS 232 a software Optima M-DDE. Koncentraci plynu je možno odečítat přímo na displeji analyzátoru nebo v sešitu MS Excel pomocí speciálního makra viz Obr. 29. Vzorkování zápisu složení plynu probíhá po jedné sekundě (dle nastavení makra).

	A	B	C	D	E	F
1	Čas	Datum	CH <sub>4</sub> (mg/m <sup>3</sup> )	CO <sub>2</sub> (mg/m <sup>3</sup> )		
231	10:47:16	18.5.2017	0	12		
232	10:47:17	18.5.2017	0	12		
233	10:47:18	18.5.2017	0	12		
234	10:47:19	18.5.2017	0	12		
235	10:47:20	18.5.2017	0	12		
236	10:47:21	18.5.2017	0	12		
237	10:47:22	18.5.2017	0	12		
238	10:47:23	18.5.2017	0	12		
239	10:47:24	18.5.2017	0	12		

Obr. 29. Zapisování dat z plyn. Analyzátoru

Ovládání jednotlivých ventilů se provádí pomocí přepínačů umístěných na horní části panelu.



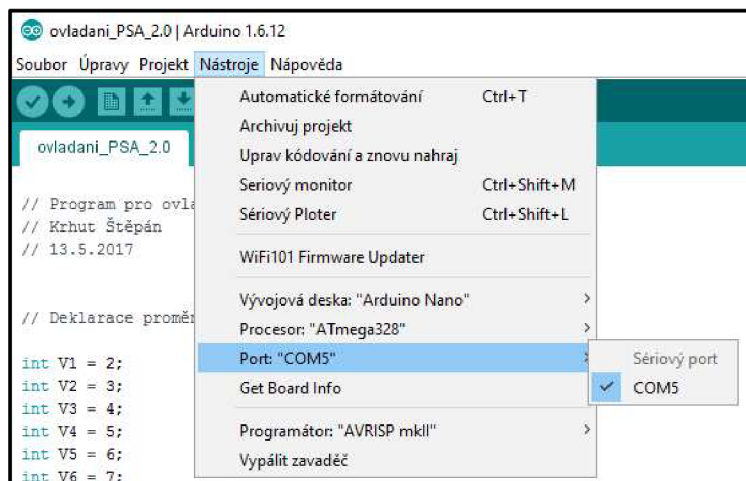
Obr. 30. Pohled shora

## 7.6.2 AUTOMATICKÁ OBSLUHA

Při automatickém ovládní jednotky PSA se nevyužívají přepínače, ale časy otevření jednotlivých ventilů jsou řízeny pomocí karty Arduino.

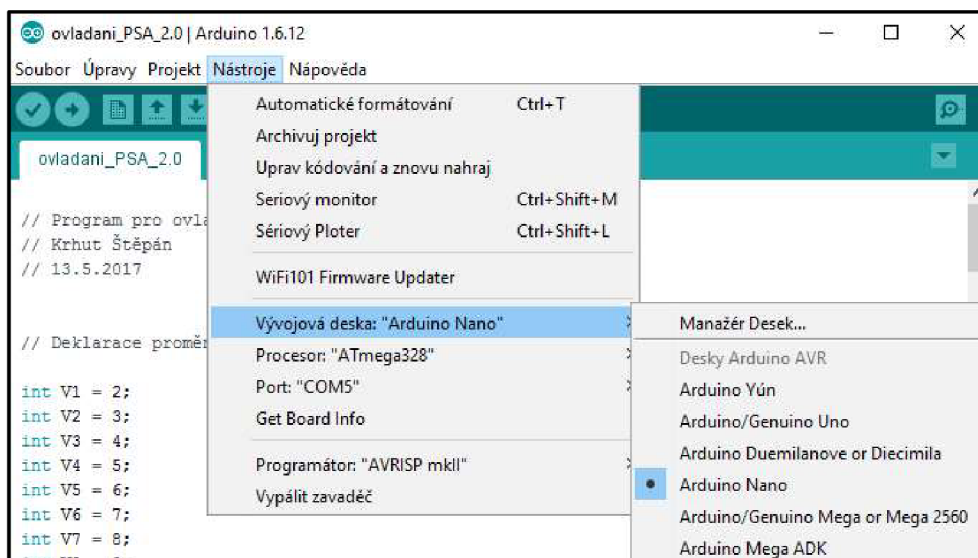
Při automatické variantě ovládní se musí na začátku provést několik kroků softwarového nastavení tak, aby karta Arduino dobře komunikovala s počítačem. Nejprve je i zde opět nutné připojit zdroj napětí na přední svorky panelu, jak tomu bylo i v případě ovládní pomocí přepínačů a uvést přepínač do polohy „A“ (jako automatické ovládní). Indikační diody se rozsvítí červeně, což znamená zavřený stav ventilů. Dále je nutno propojit panel s počítačem. K tomuto účelu slouží standartní USB kabel.

Nyní už jednotlivé kroky nastavení programu. Nejprve je potřeba do osobního počítače nainstalovat potřebný software pro komunikaci s kartou. Jedná se o volně dostupný program nesoucí název ARDUINO IDE 1.6.3. Pro správnou komunikaci počítače s kartou je nutné v programu nastavit vhodný sériový port. Nabídku komunikačních portů nalezneme ve vrchní liště programu v záložce *Nástroje*.



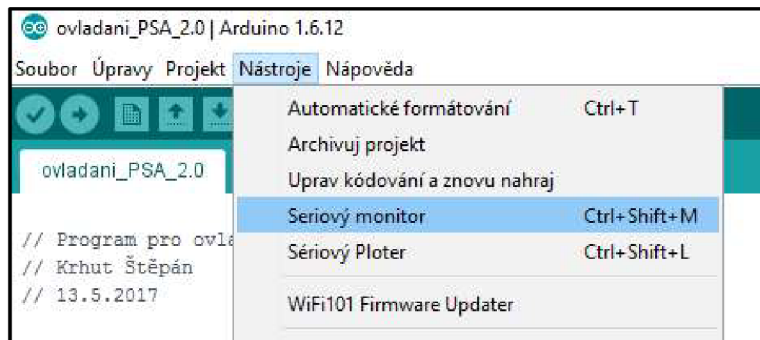
Obr. 31. Výběr komunikačního portu

Jelikož nabídka karet Arduino je široká, je potřeba také zvolit její druh. Tuto volbu opět nalezneme v záložce *Nástroje*.



Obr. 32. Výběr druhu karty

Jako poslední nastavení se musí aktivovat tzv. sériový monitor. Jedná se o programové dialogové okno, přes které se zadávají potřebné údaje. Spustí se zkratkou *Ctrl + Shift + M* nebo příkaz nalezneme také v nabídce *Nástroje*.



Obr. 33. Spuštění sériového monitoru

Postup zprovoznění plynového analyzátoru je shodný jako v předchozím případě manuálního ovládání.

Pro samotné spuštění programu klikneme na oranžově zvýrazněnou ikonu, která přehraje kód na kartu.



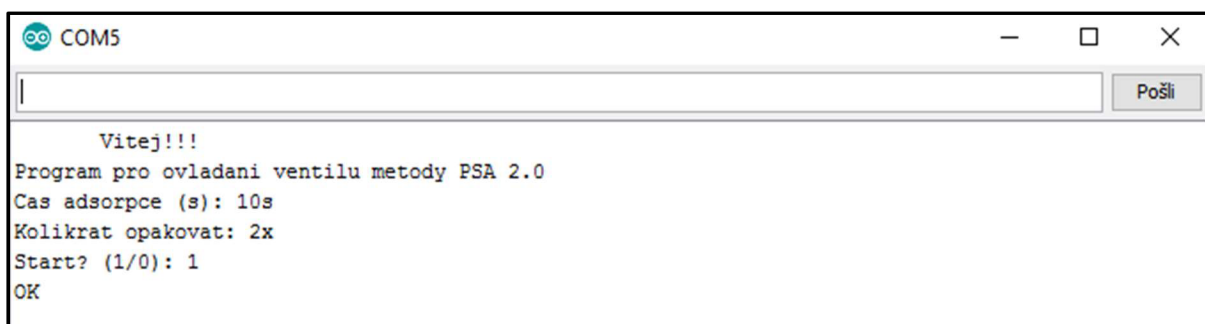
Obr. 34. Nahrávání programu

Nyní se už v okně sériového monitoru objeví přivítání a úvodní dotaz na dobu trvání adsorpce. Časový údaj v sekundách je třeba zapsat do vrchního řádku v okně a potvrdit stisknutím *Enter* nebo kliknutím na ikonu *Pošli*. Při zadávání časového údaje vycházíme z dat získaných v předešlém manuálním měření.

Poté se program dotáže na počet opakování cyklu. Je potřeba si uvědomit, že udávaný čas adsorpce v předešlém kroku bude ve skutečnosti dvojnásobný, protože jednotka disponuje dvěma adsorbéry.

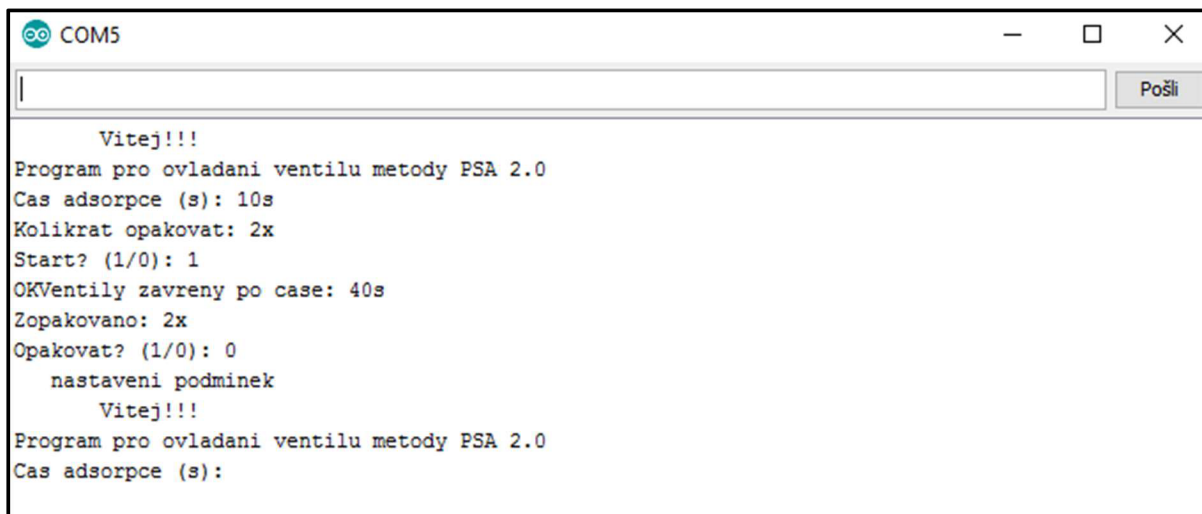
Poslední dotaz je pouze potvrzovací. Pokud chceme proces odstartovat, napíšeme do řádku 1 a potvrdíme, odpovědí nám je hláška OK a program se odstartuje, pokud ale chceme zadané údaje změnit, napíšeme 0, program začne od začátku.

Během chodu programu se na indikačních diodách zobrazuje stav otevření ventilů.



Obr. 35. Okno sériového monitoru-zadávání požadavků

Po skončení procesu vypíše program celkovou dobu do zavření všech ventilů a počet opakování. Také nabídne možnost opakování celého procesu s původním nastavením. Pokud je nutné parametry změnit, pošleme 0 a v okně se objeví úvodní dotaz. Na následujícím obrázku můžeme vidět možnou variantu výpisu ze sériového monitoru.



```
COM5
Vitej!!!
Program pro ovladani ventilu metody PSA 2.0
Cas adsorpce (s): 10s
Kolikrat opakovat: 2x
Start? (1/0): 1
OKVentily zavreny po case: 40s
Zopakovano: 2x
Opakovat? (1/0): 0
  nastaveni podminek
  Vitej!!!
Program pro ovladani ventilu metody PSA 2.0
Cas adsorpce (s):
```

*Obr. 36. Možný výpis sériového monitoru*

## **8 EXPERIMENT**

Samotné měření na laboratorní jednotce PSA proběhlo dne 18.5.2017 v laboratoři Ústavu procesního inženýrství.

### **8.1 PŘÍPRAVA MĚŘENÍ**

Kromě sestavení jednotky PSA bylo nutné ještě před započítím měření podniknout přípravné kroky. Jednalo se především o zprovoznění plynového analyzátoru a jeho propojení s počítačem, dále odzkoušet těsnost jednotky a vložit adsorbent do adsorbérů R1 a R2.

#### **8.1.1 INSTALACE ANALYZÁTORU**

Potřebný software pro komunikaci analyzátoru byl součástí vybavení laboratorního počítače. Koncentraci plynu bylo možno odečítat přímo na displeji analyzátoru nebo v sešitu MS Excel. Data se zapisovala na osobním počítači pomocí makra v programu MS Excel. Vzorkování zápisu složení plynu bylo nastaveno na jednu sekundu.

Analyzátor může pracovat pouze se suchým plynem. Proto bylo potřeba vstupní plyn upravit v předřazené vymrazovací jednotce, která směs vysušila.

Nakonec je nutné analyzátor zkalibrovat. K tomuto účelu posloužila stejná směs plynů jako pro samotné měření, protože se jednalo o plyn kalibrační jakosti.

Je také nutno připomenout, že použitý analyzátor byl schopen měřit koncentrace složek bioplynu ( $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$ ). Pro tento experiment však byla z bezpečnostních důvodů použita směs simulující složení bioplynu ( $\text{N}_2 + \text{CO}_2$ ). Proto byla sledována pouze koncentrace jedné složky, a to oxidu uhličitého.

#### **8.1.2 ZKOUŠKA TĚSNOSTI JEDNOTKY**

Jelikož soustava zahrnuje poměrně velké množství spojovacích prvků a armatur, bylo nutno provést zkoušku těsnosti. Jako testovací médium se použil atmosférický vzduch. K jeho stlačení posloužil membránový kompresor N145AT, který do soustavy dodal tlak 7bar.

#### **8.1.3 PŘÍPRAVA ADSORBENTU**

Pro naplnění adsorbérů se muselo nejprve demontovat přírubové víko nádoby. Poté se dovnitř vložilo měřidlo, podle kterého se volně nasypala vrstva aktivního uhlí do výšky 300 mm. Nakonec se nádoba opět uzavřela. Přírubové šrouby se musely utáhnout momentem tak, aby byla nádoba dostatečně těsná.

#### **8.1.4 PROPOJENÍ OVLÁDACÍHO PANELU**

Dále bylo nutné propojit elektricky řízené ventily s ovládacím panelem. K tomuto účelu posloužil běžný elektrikářský drát, tzv. dvojlinka. Pro připojení jednotlivých ventilů k panelu se využily napájecí konektory pro stejnosměrné napětí.

## **8.2 POPIS POSTUPU MĚŘENÍ**

### **8.2.1 MĚŘENÍ ČASU ADSORPCE A DESORPCE**

Měření se provádělo za účelem získání reálných časů průrazů a saturace adsorpční vrstvy v modernizované jednotce. Z těchto získaných údajů se následně vycházelo při nastavování optimálního chodu programu v automatickém režimu.

#### **PROPLACH**

Před samotným procesem adsorpce bylo potřeba adsorbenty regenerovat a propláchnout vzduchem. Tento krok se uskutečnil zapnutím olejové vývěvy pro vytvoření podtlaku a otevřením nejprve ventilu V1 pro adsorbér R1 a dále ventilu V8 pro adsorbér R2. Poté se ventily V1 a V8 zavřely a otevřely se ventily V4 a V5, přes které se přivedl proplachový vzduch. Aby se zamezilo tlakovému rázu, přívod vzduchu byl škrcen pomocí ventilu VP. Tento postup se zopakoval dvakrát.

#### **ADSORPCE**

Po provedení proplachu bylo možné přistoupit k samotné adsorpci. Pomocí redukčního ventilu na tlakové láhvi se nastavil vstupní tlak do systému (1 bar) a na rotametri se zvolil průtok plynu (6 SCFH). Plyn do R1 byl přiveden pomocí ventilu V3. Musel však být otevřen i ventil V6, který zaručoval přívod plynu z adsorbéru do analyzátoru. Sledoval se čas do průrazu adsorpční vrstvy, tzn. relativní koncentrace oxidu uhličitého na výstupu z adsorbéru dosáhne hodnoty 0,05 (5 %). Proces ukončíme, jakmile se adsorpční vrstva nasytí (saturuje). V tomto případě dosáhne relativní koncentrace (CO<sub>2</sub>) hodnoty 0,95 (95 %). Tento postup se analogicky zopakoval i pro adsorbér R2 s ventily V2 a V7.

#### **DESORPCE, PROPLACH**

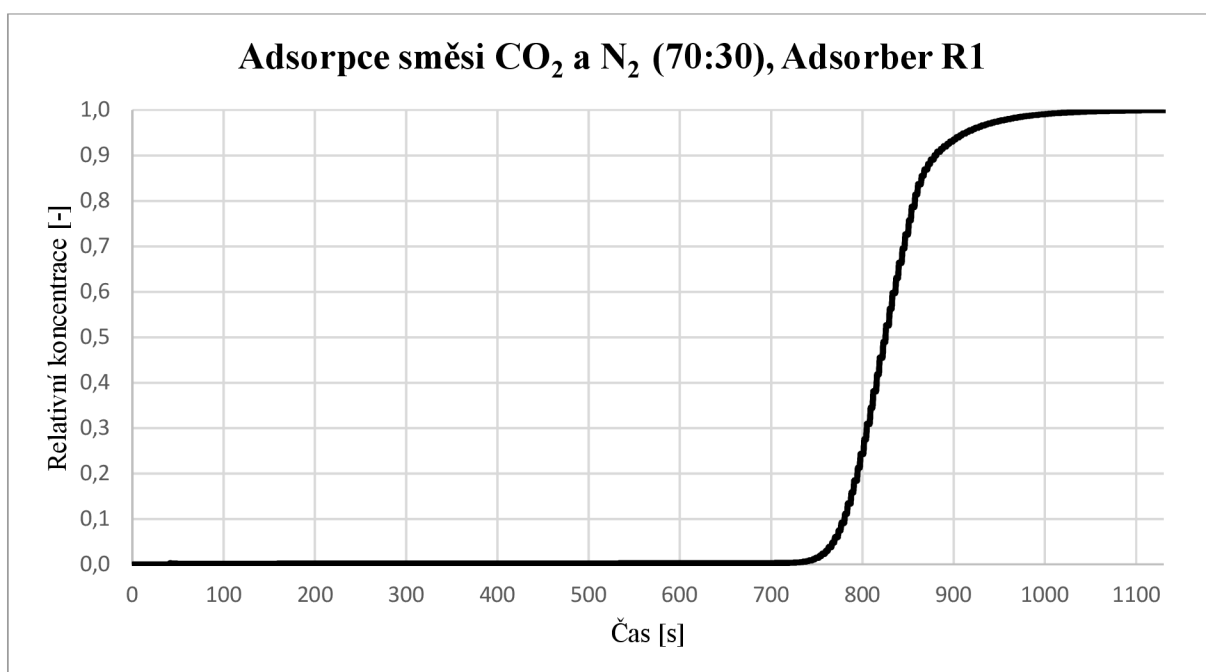
Dalším krokem byla desorpce plynu pohlčeného aktivním uhlím. K analyzátoru byla připojena vývěva, která vytvořila podtlak 0,95 bar, a přes ventil V1 se začala desorbovat náplň R1. Všechny ostatní ventily byly uzavřeny. Opět se měřil čas do hodnoty relativní koncentrace (CO<sub>2</sub>) 0,05 na výstupu z vývěvy. Postup se zopakoval i pro R2 s použitím ventilu V8. Následoval krátký proplach (řádově v sekundách) vzduchem přes ventily V4 a V5.



## 8.3 VYHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH DAT

### 8.3.1 PRŮRAZOVÉ KŘIVKY ADSORPCE

Pomocí měření prvního adsorbéru jsme obdrželi následující závislost. Jelikož analyzátor uváděl objemové koncentrace, pro vyjádření relativní koncentrace se musela data přepočítat. Můžeme si také povšimnout, že samotný průběh křivky od bodu průrazu, je poměrně strmý a saturace nastala rychle.



Obr. 37. Adsorpce R1

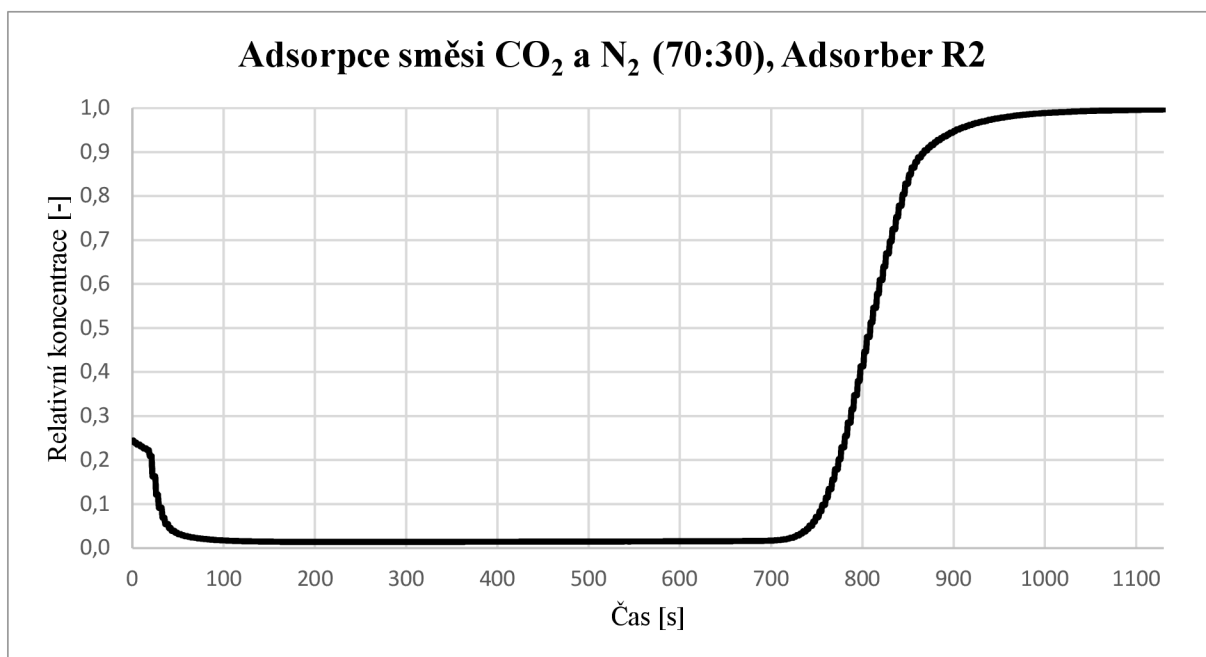
V následující tabulce jsou uvedeny data z měření. Výpočet pro všechny hodnoty je uveden v příloze č. 1. Zde jsou pouze uvedeny význačné hodnoty. První řádek představuje údaje v době, kdy došlo k průrazu adsorpční vrstvy. Druhý řádek charakterizuje 50 % saturace. Na posledním řádku jsou uvedena data v okamžik saturace vrstvy. V posledním sloupci jsou pomocí lichoběžníkové metody dopočítána množství zachyceného oxidu uhličitého v adsorbční náplni.

Měření proběhla pro vstupní tlak 2 bar a průtok směsi 6 SCFH.

Tab. 7. Množství zachyceného CO<sub>2</sub>

Čas od začátku měření	Čas	Koncentrace analyzátor C <sub>co2</sub>	Relativní koncentrace C <sub>Rco2</sub>	Proteklo směsi	Proteklo směsi	Proteklo CO <sub>2</sub>	Proteklo N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> zachyceno na AU
s	hh:mm:ss	vol %	-	cm <sup>3</sup>	g	g	g	g
<b>770</b>	14:47:45	4,0789	0,05990	26756,26	43,4726	34,1691	9,3035	<b>34,0274</b>
<b>826</b>	14:48:41	35,8262	0,52613	28702,17	46,6343	36,6542	9,9801	<b>35,8949</b>
<b>914</b>	14:50:09	64,8055	0,95171	31760,03	51,6026	40,5592	11,0434	<b>36,6120</b>

Průrazová křivka naměřená na adsorbéru R2 má sice tvar shodující se předešlým měřením, ale v oblasti okolo počátku měření se vyskytuje nenulová koncentrace. Tento jev byl pravděpodobně vyvolán výskytem zbytkového plynu v potrubí z předešlého měření.



Obr. 38. Adsorpce R2

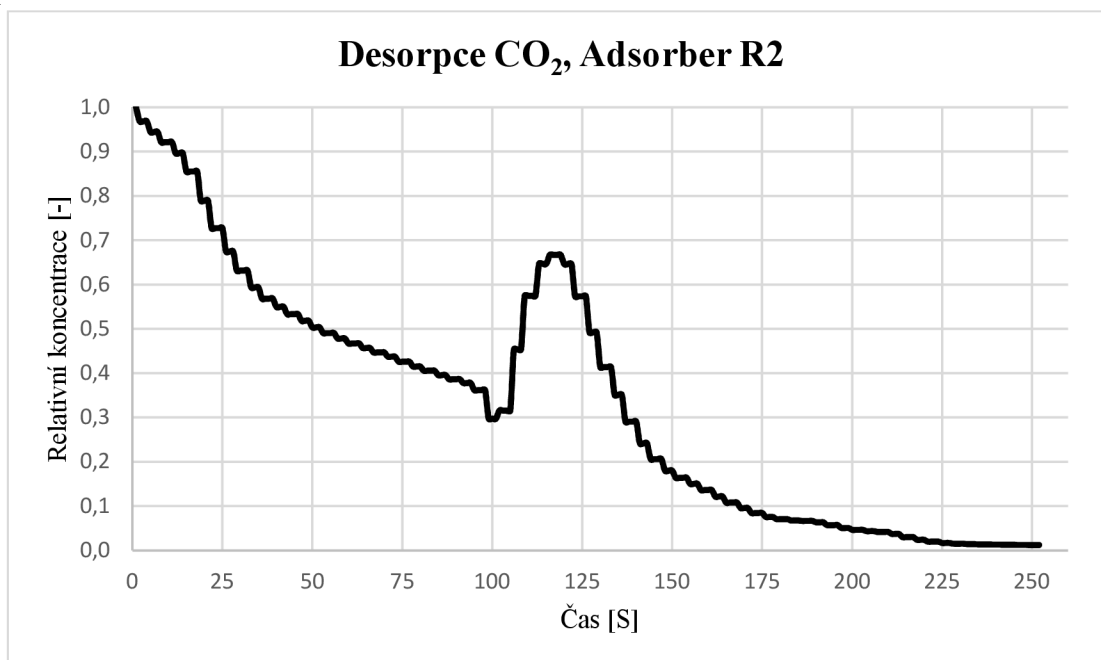
Následující tabulka opět uvádí význačné body z měření druhého adsorbéru. V posledním sloupci jsou opět uvedeny množství zachyceného oxidu uhličitého v adsorpční náplni. Můžeme si zde povšimnout, že množství zachyceného CO<sub>2</sub>, je oproti předešlému měření nižší. Může to být způsobeno právě zbytkovým výskytem plynu v potrubní trase z měření prvního adsorbéru či nepřesností měření plynového analyzátoru.

Tab. 8. Množství zachyceného CO<sub>2</sub>

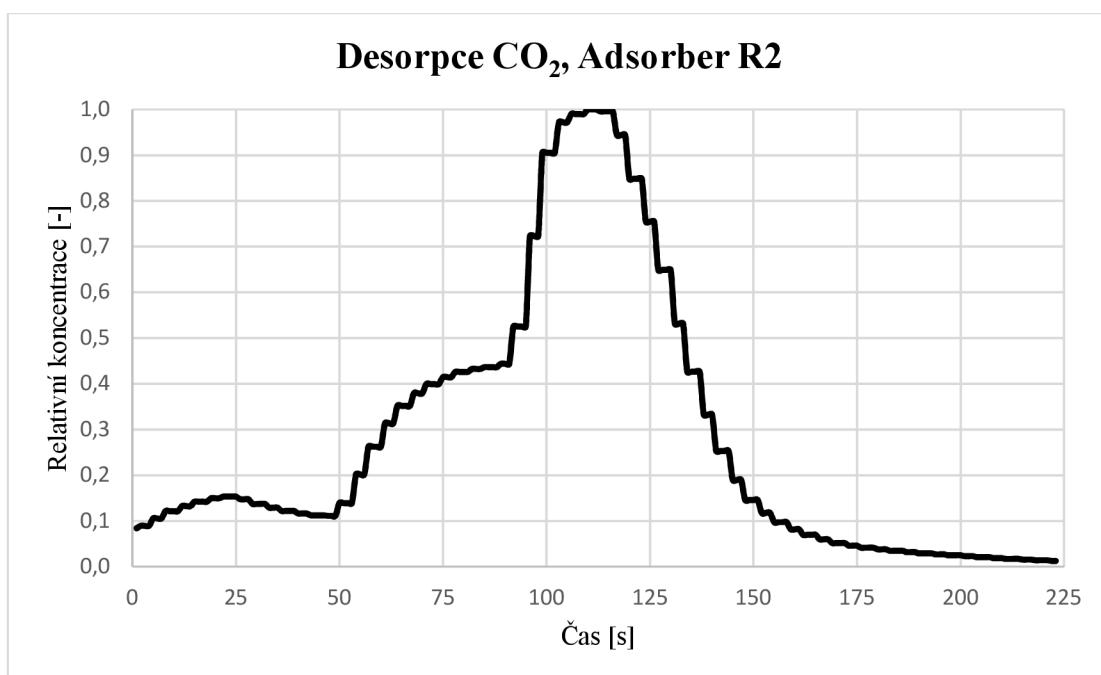
Čas od začátku měření	Čas	Koncentrace analyzátor C <sub>CO2</sub>	Relativní koncentrace C <sub>Rco2</sub>	Protéklo směsi	Protéklo směsi	Protéklo CO <sub>2</sub>	Protéklo N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> zachyceno na AU
s	hh:mm:ss	vol %	-	cm <sup>3</sup>	g	g	g	g
742	15:07:54	3	0,05094	25783,31	41,8918	32,9266	8,9652	<b>32,0866</b>
809	15:09:01	34,9278	0,51294	28111,45	45,6745	35,8998	9,7747	<b>34,3759</b>
903	15:10:35	64,7712	0,95121	31377,80	50,9815	40,0711	10,9105	<b>35,1686</b>

### 8.3.2 KŘIVKY DESORPCE

Důvodem desorpce bylo odčerpání adsorbovaného plynu z náplně adsorbéru tak, aby náplň byla schopna v dalším cyklu adsorpce přijmout co nejvíce plynu. Bylo potřeba dosáhnout minimální koncentrace na výstupu z adsorbéru. U desorpčních křivek můžeme vidět výrazný nárůst koncentrace přibližně v polovině času desorpce. Jedná se zřejmě o okamžik, kdy se v adsorbéru vytvoří patřičný podtlak pro desorbování plynu z náplně. Počáteční vysoká koncentrace může být opět způsobena zbytkovým plynem v potrubí. Pokud bychom chtěli porovnávat dobu adsorpce a desorpce, je zřejmé, že desorpce v tomto případě proběhla v podstatně kratším čase.



Obr. 39. Desorpce R1



Obr. 40. Desorpce R2

### 8.3.3 AUTOMATICKÝ PROVOZ

Dalším cílem bylo jednotku PSA zautomatizovat. Zde se již uplatnily časové údaje získané z předešlého měření.

Původně byl program koncipován pro shodné časy adsorpce i desorpce. Experimentálně se však při manuálním měření zjistilo, že se tyto časy různí a v žádném případě je nelze považovat za shodné. Tento předpoklad by měl za následek malou efektivitu a výtěžnost jednotky PSA. Proto zde popisovaný program je až druhou verzí, která tuto skutečnost zohledňuje. Pro zjednodušení se ale všechny časy vztahují k času adsorpce. Kompletní výpis kódu programu Wiring je uveden v příloze č.4 této práce. Pro názornou představu bylo vyhotoveno modelové schéma otevírání jednotlivých ventilů během cyklů jednotky pro čas adsorpce 8 minut. Grafické znázornění činnosti programu můžeme vidět na následujícím schématu.

Tab. 9. Modelové schéma otevírání ventilů

Čas [min]	V1 V2 V3 V4 V5 V6 V7 V8								OTEVŘENÉ VENTILY	LEGENDA
1									3,6,8	Adsorpce
2									3,6,8	Desorpce
3									3,6,8	Proplach
4									3,6,8	Adsorbér R1
5									3,6,8	Adsorbér R2
6									3,6,8	
7									3,6,8	
8									3,6,8	
9									1,8	
10									1,5	
11									1,2,7	
12									1,2,7	
13									1,2,7	
14									1,2,7	
15									1,2,7	
16									1,2,7	
17									1,2,7	
18									2,7,4	
19			A			A		D	3,6,8	Další cyklus

Program je koncipován tak, že pro uskutečnění určité části procesu (adsorpce, desorpce...), jsou v každý časový okamžik otevřeny skupiny ventilů, viz pravý sloupec schématu. Zbytek ventilů je uzavřen. Čas trvání desorpce je delší, z důvodu kvalitní regenerace adsorbentu. Doba trvání proplachu a desorpce je funkcí času adsorpce.

Uskutečnění automatizovaného měření však výrazně zkomplikovala olejová vývěva. Pro laboratorní experiment byla poskytnuta vývěva už značně opotřebovaná, což mělo za následek její přehřívání. Dlouhodobé provozování vývěvy by představovalo bezpečnostní riziko. Proto nebylo možné provést měření při kontinuálnímu chodu programu, ale byly pouze otestovány časy spínání ventilů.

## 9 ZÁVĚR

Celkem se podařilo provést měření adsorpce a desorpce u obou adsorbéru laboratorní jednotky PSA. Pro samotné uskutečnění experimentu bylo nutné provést přípravu, která obnášela seznámení se s problematikou čištění bioplynu pomocí metody PSA. Pro vyhodnocení adsorbovaného množství látky aktivním uhlím se nejčastěji vychází z naměřených průrazových křivek.

Jedním z hlavních cílů byla modernizace stávající jednotky. Ta byla provedena pomocí elektricky řízených ventilů a zapojením dalšího adsorbéru do procesu. Systém ovládání celé jednotky byl koncipován jako dvou-režimový, manuální a automatický. Pro řízení zdokonalené jednotky byl navržen ovládací panel, který v sobě snoubil obě tyto varianty. K výsledné realizaci panelu bylo potřeba navrhnout elektrické schéma zapojení, které zahrnovalo implementaci programovatelné karty Arduino. Pro automatické řízení jednotky byl napsán program v jazyce Wiring. Pomocí tohoto ovládacího zařízení bylo možné provést dané měření.

Nejprve proběhlo manuální měření adsorpce na adsorbéru R1 a R2. Poté se k jednotce připojila vývěva a proběhla desorpce, u které se opět sledovala koncentrace na výstupu z adsorbérů. Ze získaných dat byly vytvořeny průběhy průrazových křivek a odečteny časy průrazu a saturace náplně adsorbéru. Z těchto časových údajů se poté vycházelo při automatizaci jednotky. Samotné měření automatizované jednotky v plném rozsahu však nebylo možné provést. Jak už bylo uvedeno v popisu experimentu, hlavním důvodem bylo přehřívání tělesa vývěvy při dlouhodobém zatížení.

Cílem této práce bylo provést experiment na modernizované laboratorní jednotce PSA. Vzhledem k získaným průběhům průrazových křivek a naměřeným časům, byl tento cíl splněn.

Modernizací a vytvořenou automatizací byl položen základ pro další inovace laboratorní jednotky PSA, především na poli zdokonalování automatizace procesu.

## POUŽITÁ LITERATURA

1. Bioplynové stanice. BPS projekt [online]. Ostrava: BPS Projekt - Bioplynové stanice, 2017 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.bpsprojekt.cz/cs/obsah/bioplynove-stanice>
2. Biometan jako palivo budoucnosti? Česká bioplynová asociace [online]. České Budějovice: Česká bioplynová asociace, 2014 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.czba.cz/aktuality/biometan-jako-palivo-budoucnosti.html>
3. ČERMÁKOVÁ, Jiřina, TENKRÁT, Daniel: Efektivní zhodnocení bioplynu. Biom.cz [online]. 2011-08-22 [cit. 2017-03-22]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/efektivni-zhodnoceni-bioplynu>>. ISSN: 1801-2655.
4. Technická pravidla TPG 902 02: Jakost a zkoušení plyných paliv s vysokým obsahem metanu, GAS s.r.o., 2006
5. Co je bioplyn? Česká bioplynová asociace [online]. České Budějovice: Česká bioplynová asociace, 2013 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.czba.cz/bioplyn/>
6. KALKULÁTOR CNG. CNG [online]. Praha: Pražská plynárenská, 2017 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://cng.ppas.cz/cng/kalkulator-cng>
7. Desatero bioplynových stanic. EAgrri: Životní prostředí [online]. Praha: Ministerstvo zemědělství, 2007 [cit. 2017-03-22]. Dostupné z: <http://eagri.cz/public/web/mze/zivotni-prostredi/obnovitelne-zdroje-energie/bioplyn/bps/desatero-bioplynovych-stanic.html>
8. Silážní vaky a příslušenství. Euro bagging [online]. Velké Meziříčí: Euro bagging, 2011 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.eurobagging.com/cs/silazni-vaky>
9. Technologie bioplynových stanic. Enviton [online]. Praha: Enviton, 2008 [cit. 2017-03-22]. Dostupné z: <http://www.bioplynovestanice.cz/technologie-bps/>
10. Bioplynová stanice. Farma Basík [online]. Tábor: Agrikomp, 2016 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.farmabasik.cz/index.php/bioplynova-stanice>
11. Proces výroby Bioplynu. In: Enviton [online]. Praha: Enviton, 2008 [cit. 2017-03-22]. Dostupné z: <http://files.bioplynovestanice.webnode.cz/200000010-49c0a4abac/Schema%20vyroby%20bioplynu%20Enviton%20kopie.jpg>
12. Nové možnosti energetického využití bioplynu. Biom [online]. Praha: České sdružení pro biomasu, 2009 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/nove-moznosti-energetickeho-vyuziti-bioplynu>
13. STUDENÍK, Jiří a Michal SVITAVSKÝ. Energie větru, vody, biomasy. 1. Brno: Code Creator, 2015. ISBN 978-80-88058-08-3.
14. Technologie bioplynových stanic. Enviton [online]. Praha: Enviton, 2008 [cit. 2017-03-22]. Dostupné z: <http://www.bioplynovestanice.cz/provoz/>

15. AUTOR NEUVEDEN. Schaumann [online]. [cit. 23.3.2017]. Dostupný na WWW: <http://bioplyn.schaumann.cz/obrazky/energeticke-plodiny.gif>
16. SEDLÁČKOVÁ. Immobio [online]. [cit. 23.3.2017]. Dostupný na WWW: <http://www.dyjanka.webzdarma.cz/KJ.JPG>
17. AUTOR NEUVEDEN. HighPlains [online]. [cit. 23.3.2017]. Dostupný na WWW: <http://www.highplainsusa.com/images/banner4.jpg>
18. KÁRA, J., PASTOREK, Z., PŘIBYL, E. a kol. Výroba a využití bioplynu v zemědělství. [Biogas production and utilization in agriculture]. Praha : VÚZT, 2007. 117 s. ISBN 978-80-86884-28-8
19. Schematic of a typical breakthrough curve in a fixed-bed adsorption process. ResearchGate GmbH [online]. Berlin: ResearchGate, 2017 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/236186356\\_fig4\\_Figure-5-Schematic-of-a-typical-breakthrough-curve-in-a-fixed-bed-adsorption-process](https://www.researchgate.net/figure/236186356_fig4_Figure-5-Schematic-of-a-typical-breakthrough-curve-in-a-fixed-bed-adsorption-process)
20. Měření plochy povrchu pevných látek a určování jejich porozity metodou sorpce plynu. UPOL.cz [online]. Olomouc: Přírodovědecká fakulta, Univerzita Palackého v Olomouci, 2010 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/ostatni/BET.pdf>
21. Aktivní uhlí 25 kg CTC70 - Industrial kvalita. Klecka shop [online]. Ostrava: FastCentrik®, 2016 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.kleckashop.cz/aktivni-uhli-25-kg-ctc70-industrial-kvalita>
22. ARDUINO ZÁKLADY – 2. BLIKNUTÍ LED. Arduino [online]. Praha: Arduino.cz, 2017 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <https://arduino.cz/i-zaklady-2-bliknuti-led/>
23. Statistiky. CNG4you [online]. Praha: CNG4YOU, 2011 [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: <http://www.cng4you.cz/cng-info/statistiky.html>
24. Proč CNG? CNG4you [online]. Praha: CNG4you, 2011 [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: <http://www.cng4you.cz/stanice/rychleplnici-stanice.html>
25. VRBOVÁ, Veronika a Alice VAGENKNECHTOVÁ. ÚPRAVA BIOPLYNU NA BIOMETHAN. PALIVA [online]. 2013, 4(5), 6 [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: <http://www.ecotrend.cz/files/ecotrend/uploads/files/U%CC%81prava%20bioplynu%20na%20biomethan.pdf>
26. ŽÁKOVEC, Jan. BIOMETAN: hospodárné užití obnovitelných zdrojů energie. 1. Praha: GAS, 2012. ISBN ISBN 978-80-7328-276-9.
27. VRBOVÁ, Veronika, Alice PROCHÁZKOVÁ a Karel CIAHOTNÝ. ODSTRAŇOVÁNÍ CO<sub>2</sub> Z BIOPLYNU ADSORPCÍ ZA VYŠŠÍCH TLAKŮ. PALIVA. 2012, 4(3), 94-99.

28. Absorpční kolona. In: ECoGas Technology [online]. Klatovy IV: ECoGas Technology, 2015 [cit. 2017-04-04]. Dostupné z: <http://www.ecogas.cz/wp-content/uploads/2012/10/Greenlane-schema-1024x707.jpg>
29. Membránová separace bioplynu. MemBrain s.r.o. [online]. Praha: MemBrain, 2017 [cit. 2017-04-04]. Dostupné z: <https://www.membrain.cz/membranova-separace-bioplynu.html>
30. Princip membránové separace. In: MemBrain s.r.o. [online]. Praha: MemBrain, 2017 [cit. 2017-04-04]. Dostupné z: <https://www.membrain.cz/images/bioplyn.png>
31. Nová technologie čištění surového bioplynu až na úroveň zemního plynu. Odpadové fórum [online]. Praha: Ústav chemických procesů AV ČR, 2015 [cit. 2017-04-04]. Dostupné z: <https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0ahUKEwiSgNm7zorTAhWFCBoKHTVmD08QFggfMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.odpadoveforum.cz%2FTVIP2015%2Fprispevky%2F210.ppt&usg=AFQjCNFrpxpbmSuENSAMw0UFbpLumnO5O5w&bvm=bv.151426398,d.d2s>
32. Kněžice: komplexní energetické řešení. Časopis stavebnictví [online]. Brno: EXPO DATA spol. s r.o., 2007 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: [http://www.casopisstavebnictvi.cz/knezice-komplexni-energeticke-reseni\\_N2412](http://www.casopisstavebnictvi.cz/knezice-komplexni-energeticke-reseni_N2412)
33. CO JE TO ARDUINO? Arduino.cz [online]. Praha: Arduino.cz, 2017 [cit. 2017-04-04]. Dostupné z: <https://arduino.cz/co-je-to-arduino/>
34. Seznámení s Arduinem. Arduino.cz [online]. Praha: Arduino.cz, 2017 [cit. 2017-04-04]. Dostupné z: <https://arduino.cz/seznameni-s-arduinem/>
35. Arduino UNO. In: Hobby Elektro [online]. Tábor: Hobby Elektro, 2013 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: [http://www.hobbyelektro.eu/arduino/1\\_uvod/uno-popis.jpg](http://www.hobbyelektro.eu/arduino/1_uvod/uno-popis.jpg)
36. Typy desek. In: PHGame [online]. Praha: PHGame, 2015 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://phgame.cz/wp-content/uploads/arduino-mini-300x223.png>
37. CHRAŇTE SVÉ MOTORY. Agrikomp [online]. Praha: agriKomp Bohemia, 2015 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://www.agrikomp.com/cs/home/servisn%C3%AD-slu%C5%BEby/servis-kj-a-laborato%C5%99e/servis-laborato%C5%99e/desulfan>
38. Priamo ovládané ventily. Regada [online]. Bratislava: REGADA, 2010 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: [http://www.regada.sk/public/media/image/picture/13\\_dfcc75a28ce4b1f273ac301e77edd3ec.jpeg](http://www.regada.sk/public/media/image/picture/13_dfcc75a28ce4b1f273ac301e77edd3ec.jpeg)
39. NAVRÁTIL, P. Čištění bioplynu pomocí metody PSA (adsorpce za měnícího se tlaku). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 91 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Leštinský, Ph.D..



40. Průmyslový zdroj WXD-240W. HOTAIR [online]. Ostrava: HotAir, 2017 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <file:///C:/Users/%C5%A0t%C4%9Bp%C3%A1n/Desktop/Pr%C5%AFmyslov%C3%BD%20zdroj%20WXD-240W%2024V%2010A%20240W.html>
41. Snímače teploty s displejem. SENSIT [online]. Rožnov pod Radhoštěm: Společnost SENSIT, 2013 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.sensit.cz/shop/snimace-teploty-s-displejem/208/fc235dab.html>
42. Snímače teploty s digitálním zobrazením. A.P.O. - ELMOS v.o.s. [online]. Nová Paka: A.P.O. - ELMOS, 2017 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.apoelmos.cz/snimace-teploty-s-digitalnim-zobrazenim-1460.html>
43. BULÁNEK, Roman. Povrchové jevy na pevných látkách [online]. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2014 [cit. 2017-05-21]. ISBN 978-80-7395-908-1. Dostupné z: [https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/64787/BulanekR\\_PovrchoveJevy\\_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/64787/BulanekR_PovrchoveJevy_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
44. Kompaktní PLC. EATON [online]. Praha: EATON, 2015 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.eatonelektrotechnika.cz/sk/kompaktni-plc-01.html>
45. KOVÁŘ, Josef a Zuzana PROKOPOVÁ. Programování PLC. In: Střední průmyslová škola Zlín [online]. Zlín: SPŠZl, 2006 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: [http://www.spszl.cz/soubory/plc/programovani\\_plc.pdf](http://www.spszl.cz/soubory/plc/programovani_plc.pdf)
46. Drukregelaar Lorch. In: Conrad [online]. Berlin: Conrad, 2014 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <https://www.conrad.nl/nl/drukregelaar-lorch-57092030-823053.html>

## **SEZNAM PŘÍLOH**

Sešit MS Excel je pouze v elektronické podobě.

1. PID schéma
2. Elektrické schéma zapojení panelu
3. Sešit MS Excel: Měření\_adsorpce\_2017\_DP\_Krhut.xlsm
4. Výpis kódu ovládacího programu

## Příloha č. 4: Výpis kódu ovládacího programu

```
// Program pro ovládání ventilů laboratorní jednotky PSA 2.0
// Krhut Štěpán
// 13.5.2017
// Deklarace proměnných

int V1 = 2;
int V2 = 3;
int V3 = 4;
int V4 = 5;
int V5 = 6;
int V6 = 7;
int V7 = 8;
int V8 = 9;

int kolikrat;
unsigned long cas_adsorpce;           //čas musí mít jinouformu proměnné (aby "nepřetekl")
unsigned long cas0;
unsigned long cas_celk;
unsigned long time;

void setup() {

  Serial.begin(9600);                 //nastavení sériové komunikace
  pinMode(V1, OUTPUT);                //nastavení pinů jako výstupy
  pinMode(V2, OUTPUT);
  pinMode(V3, OUTPUT);
  pinMode(V4, OUTPUT);
  pinMode(V5, OUTPUT);
  pinMode(V6, OUTPUT);
  pinMode(V7, OUTPUT);
  pinMode(V8, OUTPUT);

  // Úvod, přivítání
```

```

Serial.print(" ");
delay(1000);
Serial.println("Vítej!!!");
delay(10);
Serial.print("Program pro ovladani ventilu metody PSA 2.0 ");
//delay(10);
Serial.println(" ");
// delay(10);
// Serial.print(" ");
delay(100);

// Dotaz na délku intervalu otevření ventilů

Serial.print("Cas adsorpce (s): ");
while (Serial.available() == 0) { }
cas_adsorpce = Serial.parseInt();
Serial.print(cas_adsorpce);
Serial.println("s");

// Převedení zadaného času na (ms), se kterými tento jazyk-Wiring umí pracovat

cas_adsorpce = cas_adsorpce * 1000;

// Dotaz na počet opakování periody (zapnuto a vypnuto)

Serial.print("Kolikrat opakovat: ");
while (Serial.available() == 0) { }
kolikrat = Serial.parseInt();
Serial.print(kolikrat);
Serial.println("x");

// Dotaz pro odpálení procesu :)

Serial.print("Start? (1/0): ");
while (Serial.available() == 0) { }
int YN = Serial.parseInt();
Serial.println(YN);

```

```

// Pokud se pošle "1", proces pokračuje, pokud cokoliv jiného, jde se št na nastavení "setup()"

if (YN == 1) {
  Serial.print("OK");
}
else {
  setup();
}

// Počáteční podmínky (eliminace problému na začátku)
SE POTOM DVAKRÁT ZAPÍNAJÍ VENTILY

// JEŠTĚ ZVÁŽIT - V KÓDU

if (cas_adsorpce > 0) {
  digitalWrite(V1, HIGH);
  digitalWrite(V2, HIGH);
  digitalWrite(V3, HIGH);
  digitalWrite(V4, HIGH);

  digitalWrite(V5, LOW);
  digitalWrite(V6, LOW);
  digitalWrite(V7, LOW);
  digitalWrite(V8, LOW);
}
else {
  digitalWrite(V1, LOW);
  digitalWrite(V2, LOW);
  digitalWrite(V3, LOW);
  digitalWrite(V4, LOW);

  digitalWrite(V5, LOW);
  digitalWrite(V6, LOW);
  digitalWrite(V7, LOW);
  digitalWrite(V8, LOW);
}

// cas0 - čas, který uběhne během zadávání požadavků

```

```

    cas0 = millis();
}

// LOOP

void loop() {

    time = millis ();           // Aktuální čas procesoru

    digitalWrite(V3, HIGH);     // nastavení ventilů - otevření 1. skupiny
    digitalWrite(V6, HIGH);
    digitalWrite(V8, HIGH);

    digitalWrite(V1, LOW);
    digitalWrite(V2, LOW);
    digitalWrite(V4, LOW);
    digitalWrite(V5, LOW);
    digitalWrite(V7, LOW);

    delay(cas_adsorpce);       // prodleva - otevření 1. skupiny ventilů

    digitalWrite(V1, HIGH);    // nastavení ventilů - zavření 1.skupiny a otevření 2.
    digitalWrite(V8, HIGH);

    digitalWrite(V2, LOW);
    digitalWrite(V3, LOW);
    digitalWrite(V4, LOW);
    digitalWrite(V5, LOW);
    digitalWrite(V6, LOW);
    digitalWrite(V7, LOW);

    delay(cas_adsorpce/100);   // čas, po který mají být otevřeny ventily sk. 2.

    digitalWrite(V1, HIGH);
    digitalWrite(V5, HIGH);

```

```

digitalWrite(V2, LOW);
digitalWrite(V3, LOW);
digitalWrite(V4, LOW);
digitalWrite(V6, LOW);
digitalWrite(V7, LOW);
digitalWrite(V8, LOW);

delay(cas_adsorpce/100);

digitalWrite(V1, HIGH);
digitalWrite(V2, HIGH);
digitalWrite(V7, HIGH);

digitalWrite(V3, LOW);
digitalWrite(V4, LOW);
digitalWrite(V5, LOW);
digitalWrite(V6, LOW);
digitalWrite(V8, LOW);

delay(cas_adsorpce-(cas_adsorpce/100));

digitalWrite(V4, HIGH);
digitalWrite(V2, HIGH);
digitalWrite(V7, HIGH);

digitalWrite(V1, LOW);
digitalWrite(V3, LOW);
digitalWrite(V5, LOW);
digitalWrite(V6, LOW);
digitalWrite(V8, LOW);

// STOP kritérium

cas_celk = ((kolikrat - 1) * ((cas_adsorpce/50)+(2*cas_adsorpce))); // celkový čas, se kterým se
porovnává aktuální "(time-cas0)"

if (cas_celk <= (time - cas0)) { // jakmile se časy srovnají, všechny ventily se zavřou

```

```

digitalWrite(V1, LOW);
digitalWrite(V2, LOW);
digitalWrite(V3, LOW);
digitalWrite(V4, LOW);

digitalWrite(V5, LOW);
digitalWrite(V6, LOW);
digitalWrite(V7, LOW);
digitalWrite(V8, LOW);

Serial.print("Ventily zavreny po case: ");
Serial.print((time - cas0) / 1000);
Serial.println("s");

Serial.print("Zopakovano: ");
Serial.print(kolikrat);
Serial.println("x");

Serial.print("Opakovat? (1/0): ");
while (Serial.available() == 0) { }
int YN2 = Serial.parseInt();
Serial.println(YN2);

if (YN2 == 1) {
  Serial.println(" Opakovani cyklu");
  cas0 = millis();
  loop ();
}
else {
  Serial.println(" nastaveni podminek");
  setup();
}

}

}

```