



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ OBCÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

INSTITUTE OF MUNICIPAL WATER MANAGEMENT

# **ANAEROBNÍ MEMBRÁNOVÝ BIOREAKTOR (AnMBR) PRO ČIŠTĚNÍ ODPADNÍCH VOD POTRAVINÁŘSKÉHO PRŮMYSLU**

**ANAEROBIC MEMBRANE BIOREACTOR (AnMBR) FOR FOOD INDUSTRY WASTEWATER TREATMENT**

DIZERTAČNÍ PRÁCE – ZKRÁCENÁ VERZE

DISSERTATION THESIS – SHORT VERSION

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. DANIEL POLÁŠEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Petr Hlavínek, CSc., MBA

BRNO 2017

## ABSTRAKT

V České republice se věnuje velká pozornost potravinářskému sektoru, který zahrnuje zemědělskou prvovýrobu, výrobu a uvádění do oběhu a na trh potravin a nápojů, včetně jejich prodeje spotřebiteli. Nejvýznamnější problémy životního prostředí související s potravinářským průmyslem jsou spotřeba a znečišťování vody, spotřeba energie a produkce odpadů. Většina vody, která se nestává součástí výrobků, nakonec závody opouští v podobě odpadních vod, jež jsou často vysoce specifické a vyžadují adekvátní nakládání. Pro účely dizertační práce byl zvolen průmysl pivovarnický, protože má v české historii a kultuře velmi dlouhou tradici. Průměrná spotřeba piva na jednoho Čecha se v posledních sedmi letech držela v rozmezí 143-146 litrů, což představuje světový primát.

Anaerobní technologie se uplatňují při čištění stále širšího spektra průmyslových odpadních vod. Anaerobní membránové bioreaktory (AnMBR) mohou obecně velmi účinně čistit odpadní vody různých koncentrací a složení a produkovat upravenou vodu vynikající kvality, kterou lze nadále využívat. Mohou současně podpořit energetickou soběstačnost díky produkci bioplynu využitelného v rámci ČOV / podniku. Hlavní negativa jsou nevyhnutelné ucpávání membrán a obecně vyšší investiční / provozní náklady (záleží na mnoha faktorech, je zapotřebí provést konkrétní posouzení). Filtrační rychlost a hydraulická doba zdržení jsou klíčovými parametry nejen z ekonomického hlediska.

V rámci doktorského studia a souvisejících výzkumných aktivit byly vytipovány a laboratorně ověřeny (navržena a sestavena laboratorní testovací jednotka) ponorné membránové moduly pro anaerobní aplikace, byla navržena pilotní jednotka AnMBR a tato následně odzkoušena v reálných podmínkách - na ČOV Pivovar Černá Hora (OV z pivovaru a přidružených objektů). Během více než ročního zkušebního provozu (5/2015 – 11/2016) byla ověřena vhodnost poloprovozní jednotky a samotné technologie - byly nastaveny počáteční a zjištěny doporučené provozní parametry, provedeny drobné stavební úpravy a optimalizace MaR, byl ověřen postup čištění a regenerace membránových modulů. V neposlední řadě byly sumarizovány závěry a doporučení zkušebního provozu, resp. jsou uvedeny stěžejní poznatky a doporučení pro další provoz, využití a úpravy pilotní jednotky AnMBR s ponornými deskovými polymerními membránovými moduly.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Membránové technologie, anaerobní membránový bioreaktor (AnMBR), anaerobní procesy, čištění odpadních vod, potravinářský průmysl, ponorný membránový modul, ultrafiltrace, laboratorní jednotka, pilotní jednotka, zkušební provoz, permeát, bioplyn, ucpávání membrán, strategie čištění membrán.

## ABSTRACT

In the Czech Republic, a great deal of attention is paid to the food sector, which includes agricultural primary production, production and putting into circulation and into the market for food and beverages, including sales to the consumer. The most significant environmental problems related to the food industry is water consumption and pollution, energy consumption and waste production. Most of the water that does not become a part of the products ultimately leaves plants in the form of wastewater, which is often very specific and requires adequate handling / treatment / disposal. For the purpose of this thesis, brewery industry was chosen, because of its very long tradition in the Czech history and culture. The average annual beer consumption in the last seven years has been in the range of 143-146 liters per capita, which represents the world's primacy.

Anaerobic technologies are applied for still wider range of industrial wastewater treating. In general anaerobic membrane bioreactors (AnMBRs) can very effectively treat wastewater of different concentration and composition and produce treated water (outlet, permeate) of excellent quality, that can be further utilised. At the same time, it can promote energy self-sufficiency through biogas production usable in WWTPs / plants. Main disadvantages include unavoidable membrane fouling and generally higher CAPEX / OPEX (depending on many factors, a specific assessment is needed). Flux and hydraulic retention time are key parameters not only from an economic point of view.

Within the framework of Ph.D. studies and related research activities, immersed membrane modules for anaerobic applications were selected and lab-scale tested (designed and assembled laboratory unit), an AnMBR pilot plant was designed, built and subsequently tested under real conditions - at Černá Hora Brewery WWTP (waste waters from the brewery and associated facilities). The pilot AnMBR and the technology itself has been verified over more than a year (5/2015 – 11/2016) of trial operation - the initial and recommended operational parameters have been set up, minor construction adjustments / modifications and measurement & regulation optimizations have been made, the recommended membrane cleaning and regeneration procedure has been verified. Last, but not least, conclusions and recommendations of the trial operation were summarised - some key findings and recommendations for further operation, use and modifications of the existing AnMBR pilot plant are presented.

## KEYWORDS

Membrane technologies, anaerobic membrane bioreactor (AnMBR), anaerobic processes, wastewater treatment, food industry, submersible membrane module, ultrafiltration, laboratory unit, pilot plant, trial operation, permeate, biogas, membrane fouling, membrane cleaning strategies.

## MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

Knihovnické informační centrum, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 331/95,  
602 00 Brno.

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

POLÁŠEK, Daniel. *Anaerobní membránový bioreaktor (AnMBR) pro čištění odpadních vod potravinářského průmyslu*. Brno, 2017. 113 s., 7 příloh, Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí práce prof. Ing. Petr Hlavínek, CSc., MBA

## OBSAH

<b>1.</b>	<b>ÚVOD.....</b>	<b>2</b>
<b>2.</b>	<b>CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE.....</b>	<b>3</b>
<b>3.</b>	<b>SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY .....</b>	<b>4</b>
3.1	Průmyslové odpadní vody, potravinářský průmysl, pivovarnictví.....	4
3.2	Anaerobní technologie čištění odpadních vod.....	5
3.3	Princip tlakových membránových procesů a základní pojmy .....	6
3.4	Výhody a nevýhody technologie .....	9
3.5	AnMBR konfigurace.....	14
3.6	Výzkumné aktivity - směry a trendy .....	14
<b>4.</b>	<b>VLASTNÍ ŘEŠENÍ DIZERTAČNÍ PRÁCE .....</b>	<b>16</b>
4.1	Lokalita testování a stručný popis .....	16
4.2	Laboratorní testování membránových modulů .....	17
4.3	Návrh, popis a zkušební provoz poloprovozní jednotky .....	22
4.3.1	<i>Popis poloprovozní jednotky .....</i>	<i>22</i>
4.3.2	<i>Zkušební provoz poloprovozní jednotky.....</i>	<i>28</i>
4.3.3	<i>Závěry a doporučení zkušebního provozu .....</i>	<i>40</i>
<b>5.</b>	<b>SHRNUTÍ A PŘÍNOSY DIZERTAČNÍ PRÁCE.....</b>	<b>44</b>
5.1	Obecné shrnutí .....	44
5.2	Přínosy pro vědní obor a praxi .....	44
5.3	Doporučení dalších směrů/zaměření výzkumu, akademické práce.....	45
	<b>POUŽITÁ LITERATURA / ZDROJE.....</b>	<b>46</b>
	<b>SEZNAM PUBLIKOVANÝCH PRACÍ .....</b>	<b>52</b>
	<b>ŽIVOTOPIS.....</b>	<b>54</b>

## 1. ÚVOD

V České republice se věnuje velká pozornost potravinářskému sektoru, který zahrnuje zemědělskou prvovýrobu, výrobu a uvádění do oběhu a na trh potravin a nápojů, včetně jejich prodeje spotřebiteli. Potravinářský průmysl nenajdeme pouze v oblastech s rozvinutou zemědělskou výrobou (podobně jako např. hutní průmysl v lokalitách, kde se těží suroviny), ale je na území České republiky poměrně rovnoměrně rozptýlen. Je to tím, že přeprava zemědělských komodit je méně náročná, než přeprava průmyslových surovin. Také je z pohledu prodejce i spotřebitele nutné uchování čerstvosti potravin, což by mohlo být při přepravě na velké vzdálenosti komplikované. Nejvýznamnější problémy životního prostředí související s potravinářským průmyslem jsou spotřeba a znečišťování vody, spotřeba energie a produkce odpadů. Průmyslové odpadní vody bývají často velmi specifické a mohou dokonce vykazovat charakteristiky nebezpečné / závadné látky. Znečištění / složení odpadních vod odpovídá charakteru výrobního procesu a vyžaduje adekvátní nakládání.

Anaerobní technologie se uplatňují při čištění stále širšího spektra průmyslových odpadních vod. Anaerobní membránové bioreaktory (AnMBR) se jeví jako atraktivní technologie, kterým se v posledních letech dostává zvýšené pozornosti. Jako u každé technologie, i zde najdeme řadu výhod a potenciálů, a na druhou stranu se potýkáme s omezeními a výzvami. Mezi hlavní výhody bezesporu patří vysoká kvalita na odtoku a produkce bioplynu jako zdroje energie. Vyčištěnou OV (permeát) lze za určitých podmínek dále využívat. Jako hlavní nevýhody se uvádí ucpávání membrán / membránových modulů a obecně vyšší náklady na technologii. AnMBR se však s rostoucím počtem poloprovozních (pilot-scale) a plnohodnotných (full-scale) referencí stávají ověřenou a průmyslově atraktivní technologií. Velký potenciál nabízí především v kombinaci s dalšími technologiemi. Vývoj samotných membrán neustále pokračuje, což má za následek snižování investičních / provozních nákladů. Do budoucna by se tak, díky svým přínosům a naopak potlačování negativ, rozšíření anaerobních membránových aplikací mohla přiblížit již dobře zavedeným aerobním. V České republice prozatím schází dostatek zkušeností a podkladů týkajících se této (prozatím okrajové) problematiky.

Dizertační práce v první části pojednává o obecných informacích, vlastnostech a souvislostech potravinářského průmyslu, membránových technologií a způsobech čištění vybraných odpadních vod. Praktická část navazuje na tyto získané teoretické poznatky a danou problematiku převádí do praxe - zaměřuje se na návrh a provoz laboratorního zařízení pro otestování komerčně dostupných membránových modulů v netradičních provozních (anaerobních) podmínkách a následně na návrh a provoz pilotní jednotky AnMBR pro provoz v reálných podmínkách výtípané ČOV Pivovar Černá Hora.

## 2. CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

**Cílem** dizertační práce bylo vytipování a odzkoušení vhodných ponorných membránových modulů pro následné navržení a vyvinutí pilotní AnMBR jednotky pro čištění (především) průmyslových odpadních vod a navazující zkušební provoz jednotky v reálných podmínkách (ČOV Pivovar Černá Hora, mezofilní režim) – stabilizace provozu (odstranění projekčních a konstrukčních nedostatků), zjištění omezení a počátečních / dlouhodobě dosažitelných provozních parametrů. Výsledkem je tedy ověření této atraktivní technologie AnMBR a výčet doporučení pro vylepšení a další využití sestrojené pilotní jednotky.

Jako **podklady** pro vypracování této práce byly použity dostupné (především zahraniční) zdroje z oblasti řešené problematiky (membránové technologie a především AnMBR), dokumentace dodavatele technologie – především výkresové podklady a provozní manuál, vybrané rozborů ČOV Pivovar Černá Hora a dokumentace místní ČOV, příslušné normy a předpisy.

### 3. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

#### 3.1 Průmyslové odpadní vody, potravinářský průmysl, pivovarnictví

Průmyslové odpadní vody bývají často velmi specifické a mohou dokonce vykazovat charakteristiky nebezpečné / závadné látky. Znečištění / složení odpadních vod odpovídá charakteru výrobního procesu, takže je nutná analýza vodního hospodářství podniku. Druhy OV můžeme rozdělit do několika následujících kategorií [1]: technologické, chladicí, splaškové, srážkové ze znečištěných / neznečištěných ploch, podzemní vody z hydrogeologických systémů ochrany. Hlavní znečištění bývá zpravidla obsaženo ve vodách technologických. Optimální postup čištění průmyslových odpadních vod vychází z hmotnostní a koncentrační analýzy přítomného znečištění.

V České republice, obdobně jako v celé Evropské unii, patří výroba potravin k nosným odvětvím zpracovatelského průmyslu. Význam potravinářské výroby je dán zabezpečováním výživy obyvatelstva výrobou a prodejem zdravotně nezávadných, bezpečných, kvalitních a převážně i cenově dostupných potravin, výkonností a rostoucí konkurenceschopností tohoto odvětví. Některé potravinářské podniky mají přímou vazbu na zemědělskou prvovýrobu, jiné se zabývají až vyšší finalizací výsledných produktů. Velká část potravinářských podniků v ČR investovala nemalé prostředky a úsilí do hygieny a modernizace svých provozů, aby byly splněny legislativní požadavky EU. [2]

Potraviny jsou buď přímo zemědělské produkty, nebo se jedná o výrobky potravinářského průmyslu. Potravinářský průmysl je odvětví zpracovatelského průmyslu, které zpracovává zemědělské produkty z rostlinné i živočišné výroby do podoby potravin pro spotřebitele. Potravinářský průmysl zahrnuje mlýny, pekárny, mlékárny, cukrovary, konzervárny, masokombináty a další výroby. Pod potravinářský průmysl spadá i výroba nápojů, včetně v ČR tradičního piva. [3]

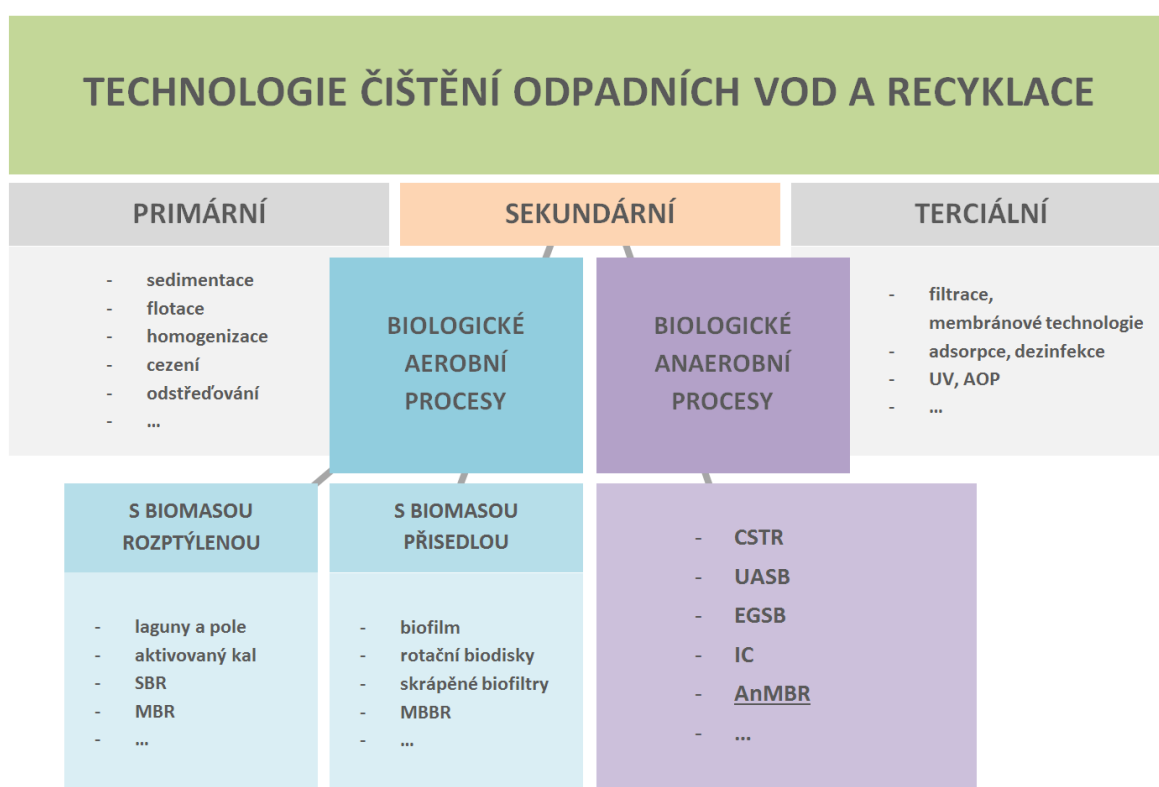
Nejvýznamnější problémy životního prostředí související s potravinářským průmyslem jsou spotřeba a znečišťování vody, spotřeba energie a produkce odpadů. Většina vody, která se nestává součástí výrobků, nakonec závody opouští v podobě odpadních vod. OV z průmyslu potravin, nápojů a mléka má vysoké hodnoty CHSK a BSK. Zmíněné charakteristiky mohou být řádově vyšší, než u OV z domácností. Hlavními látkami znečišťujícími ovzduší jsou pevné částice a pachové látky. Vliv potravinářské výroby na životní prostředí je také bezprostředně spojen se zemědělskou výrobou. [4]

Pivo a pivovarnictví má v české historii a kultuře velmi dlouhou tradici. Podle Českého svazu pivovarů a sladoven (ČSPS) [5], resp. publikace Panorama zpracovatelského průmyslu ČR 2016, se pozitivní vnímání českého piva stále zvyšuje a jeho popularita stoupá. České pivovarnictví proslavilo naši zemi a jedná se o důležité odvětví národního hospodářství, které spoluvytváří jedinečnost ČR v zahraničí, podporuje ekonomický rozvoj země a významně přispívá do státního rozpočtu. Celkový výstav piva v ČR včetně nealkoholického v roce 2016 oproti roku 2015 stoupl o 1,9% na rekordních 20,5 milionů hektolitrů piva. Průměrná spotřeba piva na jednoho Čecha se v posledních sedmi letech držela v rozmezí 143-146 litrů. [6]



### 3.2 Anaerobní technologie čištění odpadních vod

Anaerobní technologie se uplatňují při čištění stále širšího spektra průmyslových odpadních vod. Po prvních relativně snadných aplikacích v cukrovarech, pivovarech a dalších oblastech potravinářského průmyslu se dnes anaerobní technologie prosazuje i v takových průmyslových odvětvích, které produkují „komplikovanější“ OV jako např. průmysl farmaceutický, chemický, petrochemický. Na Obr. 1 je zjednodušeně znázorněno základní rozdělení způsobů čištění OV se zaměřením na způsoby anaerobní.



Obr. 1 Způsoby čištění odpadních vod – základní rozdělení [7-10] (úprava autor)

Mezi konvenční a pokročilé anaerobní technologie patří:

- UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) reaktor,
- EGSB (Expanded Granular Sludge Bed) reaktor,
- IC (Internal Circulation) reaktor,
- AF (Anaerobic Filter),
- AFBR (Anaerobic Fluidized Bed Reactor),
- AC (Anaerobic Contact) reaktor,
- CSTR (Continuous flow Stirred-Tank Reactor) / CISTR (Continuous Ideally Stirred-Tank Reactor),
- AnMBR (Anaerobic Membrane BioReactor).

V současné době na trhu anaerobních reaktorů převažují reaktory s granulovanou biomasou, díky svým nesporným výhodám jako je možnost velmi vysokého látkového zatížení a velmi dobrá

separace biomasy, největší růstový trend pak v posledních letech zaznamenávají reaktory IC a EGSB, tedy moderní modifikace původního principu UASB.

Tab. 1 Porovnání konvenčního aerobního a anaerobního čištění, MBR a AnMBR [11] (úprava autor)

Vlastnost	Konvenční aerobní čištění	Konvenční anaerobní čištění	MBR	AnMBR
Účinnost odstranění organiky	Vysoká	Vysoká	Vysoká	Vysoká
Kvalita odtoku	Vysoká	Střední až slabá	Výborná	Vysoká
Objemové zatížení	Střední	Vysoké	Vysoké až střední	Vysoké
Produkce kalu	Velká	Malá	Velká až střední	Malá
Půdorysná plocha	Velká	Velká až střední	Malá	Malá
Retence biomasy	Malá až střední	Malá	Celková	Celková
Potřeba nutrientů	Velká	Malá	Velká	Malá
Požadavek zásaditosti	Malý	Velký pro určité průmyslové aplikace	Malý	Velký až střední
Energetická náročnost	Velká	Malá	Velká	Malá
Citlivost na teplotu	Malá	Malá až střední	Malá	Malá až střední
Doba zpracování	2-4 týdny	2-4 měsíce	< 1 týden	< 2 týdny
Tvorba bio-energie	Ne	Ano	Ne	Ano
Režim čištění	Celkový	V podstatě předčištění	Celkový	Celkový nebo předčištění

Průmyslové odpadní vody jsou často velmi specifické a při provozu dané ČOV, především v extrémních podmínkách (vysoký obsah nerozpuštěných látek, obsah tuků a mastnot, teplotní podmínky, toxicita, vysoká solnost, výkyvy v látkových a hydraulických dobách zdržení apod.), mohou způsobovat celou řadu nežádoucích stavů.

### 3.3 Princip tlakových membránových procesů a základní pojmy

Základem každé membránové technologie je samotná **membrána**, respektive **membránový modul**. Pro účely (An)MBR se využívá filtračních separačních procesů, u kterých je základní **hnací silou** tlakový gradient  $\Delta P$  (tlak i podtlak). Membrána tvoří selektivní polopropustnou bariéru mezi dvěma fázemi - částicemi a kapalinou. Zachycená část se nazývá **retentát** (koncentrát) a fáze procházející membránou **permeát** (filtrát). Přiváděná filtrovaná směs se také nazývá **nástřik**. Základní třídění těchto membránových procesů se odvíjí od **velikosti pórů** a potřebného **transmembránového tlaku** (TMP, bar) umožňujícího separaci, který obecně vzrůstá se zmenšujícími se póry. Čtyři klíčové **procesy tlakové membránové separace** jsou mikrofiltrace (MF), ultrafiltrace (UF), nanofiltrace (NF) a reverzní osmóza (RO), přičemž pro (An)MBR jsou vhodné především první dva. Rozlišují se tři základní **typy modulů**: deskové moduly (FS - flat sheet), moduly z dutých vláken (HF - hollow fibre) a tubulární moduly (TM - tubular modules). U AnMBR se vyskytují všechny tyto varianty. Pro účely

projektu byly zvoleny ploché ultrafiltrační membránové moduly. Membrány lze také dělit podle druhu a množství použitých materiálů. **Materiály** používané pro výrobu membrán musí být dostatečně mechanicky, chemicky a fyzikálně stabilní a vhodné i z jiných hledisek, jako je dostupnost, cena aj. Rozeznáváme membrány organického a anorganického původu. **Technologické aplikace** tlakových separačních metod lze rozdělit do tří základních oblastí: dělení směsí, zahušťování a řízené uvolňování (např. v lékařství - léky, oksylichování; zemědělství - chemikálie a hnojiva aj.). [12-14]

Tab. 2 Hlavní membránové procesy [12]

Membránový proces	Mechanismus dělicího účinku	Hnací síla	Nejdůležitější aplikace
<b>Mikrofiltrace (MF)</b>	Sítový efekt	Tlakový rozdíl mezi oběma stranami membrány	Zadržování mikročásteček dispergovaných v kapalinách
<b>Ultrafiltrace (UF)</b>	Sítový efekt		Separace vysokomolekulárních sloučenin z vodných roztoků
<b>Nanofiltrace (NF)</b>	Kombinace sítového efektu, mechanismu rozpouštění-difuze a odpuzování molekul s elektrickým nábojem materiálem membrány		Změkčování vody; separace nízkomolekulárních organických sloučenin z vodných roztoků
<b>Reverzní osmóza (RO)</b>	Rozpouštění-difuze		Odsolování vody
<b>Dialýza</b>	Sítový efekt	Koncentrační rozdíl rozpuštěných látek mezi oběma stranami membrány	Hemodialýza
<b>Elektrodialýza</b>	Interakce mezi molekulami s elektrickým nábojem a membránami s elektrickým nábojem	Rozdíl elektrických potenciálů	Odsolování vody a vodných roztoků
<b>Separace plynů a par</b>	Rozpouštění-difuze	Tlakový rozdíl mezi oběma stranami membrány	Separace směsí plynů; odstraňování par ze vzduchu
<b>Pervaporace</b>	Rozpouštění-difuze	Rozdíl potenciálních tlaků složky směsi	Dehydratace organických rozpouštědel; dělení azeotropických směsí

Dalšími základními kvantitativními a kvalitativními vlastnostmi jsou **selektivita** (schopnost oddělit jednu složku od druhé), **průtok membránou** (flux, množství permeátu prošlého membránovou plochou za daný čas,  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  nebo  $\text{l} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ) a **permeabilita** (průnik média membránou za daného transmembránového tlaku TMP,  $\text{l} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}$ , závisí na teplotě – standardizuje se při 20°C pro snadnější porovnávání). Čím méně se póry membrány liší (velikost, tvar), tím více se obecně zvyšuje **ostrost separace**. Dalším ze základních údajů udávaných výrobcem je **specifická membránová plocha**, což je poměr instalované plochy membrán k objemu celého modulu (udává se v  $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ ).

Udávaná průtočnost je velmi orientačním údajem, protože závisí na mnoha faktorech, mezi které patří složení odpadní vody, provozní tlak, četnost a způsob čištění aj. [12-14]

Intenzita objemového toku (flux) permeátu je definována rovnicí (1) [12] jako objem tekutiny, který projde membránou za jednotku času, vztažený na jednotku plochy membrány

$$J_V = \frac{1}{A} \frac{dV_P}{d\tau} \quad (1)$$

kde:  $J_V$  ... je intenzita objemového toku permeátu (flux) [ $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ],

$A$  ... separační plocha membrány [ $\text{m}^2$ ],

$V_P$  ... objem permeátu [ $\text{m}^3$ ],

$\tau$  ... čas [s].

$$J_V = \frac{\Delta P - \Delta \pi}{\mu(R_m + R_r + R_{ir})} \quad (2)$$

Rovnice (2) [12][15] je vyjádřením objemového toku membránou (flux) podle základního modelu toku látek porézními membránami – modelu sériově řazených odporů, kde:

$J_V$  ... je objemový (prů)tok membránou [ $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ],

$\Delta P$  ... transmembránový tlak TMP [Pa],

$\Delta \pi$  ... osmotický tlak [Pa],

$\mu$  ... dynamická viskozita [Pa.s],

$R_m$  ... vlastní odpor membrány [ $\text{m}^{-1}$ ],

$R_r$  ... vratný odpor daný koncentrační polarizací [ $\text{m}^{-1}$ ],

$R_{ir}$  ... nevratný odpor daný (částečným) ucpáním membrány [ $\text{m}^{-1}$ ].

Model sériově řazených odporů vychází z rovnice rychlosti děje, dávající do podílu hnací sílu děje k odporu tomuto ději kladenému (není konstantou, mění se v čase). Intenzitu objemového toku permeátu lze tedy zjednodušeně vyjádřit jako podíl tlakového rozdílu nad membránou a pod ní k sumě odporů vůči toku permeátu. Jde o upravený Darcyho „zákon“. [12]

**Průtok média membránou** může být buď tlakově zevnitř ven (inside-out), nebo podtlakově zvenku dovnitř (outside-in). Existují dva režimy membránové filtrace ve spojitosti se **směrem přiváděného toku** - statická (klasická, dead-end) a dynamická (cross-flow) filtrace. V prvním případě je směr přiváděného toku kolmý k povrchu membrány, jako je tomu u klasické filtrace. Zachycené částice však na povrchu membrány vytvářejí vrstvu (filtrační koláč, povlak), která postupem času narůstá a vytváří čím dále tím větší hydraulickou ztrátu. Aby byla propustnost obnovena, je zapotřebí provádět zpětné proplachy a patřičná čištění. V případě druhém je směr přiváděného toku podélný, kapalina cirkuluje, a díky vysokým smykovým rychlostem nedochází k tak rychlému ucpávání. Má ovšem vyšší energetické nároky a proces je zapotřebí optimalizovat. V systému může být udržován buď **konstantní průtok**, nebo **konstantní tlak**. Pokud membrány pracují na základě stálého tlaku, klesá

v důsledku jejich ucpávání proteklé množství. Naopak v případě požadavku stálého průtoku (běžnější) se s postupným zvyšováním odporu membrány mění transmembránový tlak. [14][16][17]

**Kritický (prů)tok** (critical flux)  $J_{crit}$  je definován jako průtok permeátu (permeate flux) membránou o určité hodnotě, nad kterou dochází k nevratnému ucpávání membrány. Kritický (prů)tok je závislý na hydrodynamice a vlastnostech systému (umístění a charakteristiky membrány/modulu, vlastnosti kalu, pH, ...) a tudíž jeho hodnotu je zapotřebí stanovit empiricky. [15][18-20]

**Membránové moduly pro separaci biomasy by obecně měly vykazovat následující vlastnosti:**

- žádné mrtvé zóny, kde by docházelo k akumulaci kalu a nečistot
- vysoký stupeň turbulence na straně přiváděného média k posílení přenosu hmoty a snížení znečištění (ulpívání nečistot, tvorba povrchového povlaku, ucpávání)
- mechanická, chemická a teplotní stabilita
- nízká tlaková ztráta, nízký potřebný TMP, vysoká odolnost vůči provozním tlakům / provozní tlakový rozptyl
- vysoká specifická membránová plocha ( $m^2 \cdot m^{-3}$ )
- snadná instalace a výměna membrán a jednotlivých částí modulu
- modularita, možnost rozšíření systému / dovybavení
- snadnost čištění a regenerace
- nízkoenergetické požadavky systému

Žádná konfigurace (FS, HF, TM) však není schopna plně uspokojit všechny výše uvedené požadavky. Na současném trhu (nejen) ponorných membránových modulů existuje celá řada výrobců/výrobců/dodavatelů. Jejich vhodnost použití v anaerobních bioreaktorech však až na výjimky zůstává předmětem zkoumání, respektive pouze několik výrobců (Kubota [21], Veolia-Pentair [22], GE [23]) má v této oblasti prokázané zkušenosti a tuto aplikaci nevyklučují/doporučují (především z hlediska konstrukce, použitých materiálů, odolností apod.).

### 3.4 Výhody a nevýhody technologie

AnMBR se jeví jako atraktivní technologie, kterým se v posledních letech dostává zvýšené pozornosti. Mezi hlavní **výhody** bezesporu patří vysoká kvalita na odtoku a produkce bioplynu. Vyčištěnou OV (permeát) lze za určitých podmínek dále využívat - dle dosažitelné kvality přímo či v kombinaci s dalšími technologiemi. [24-29]

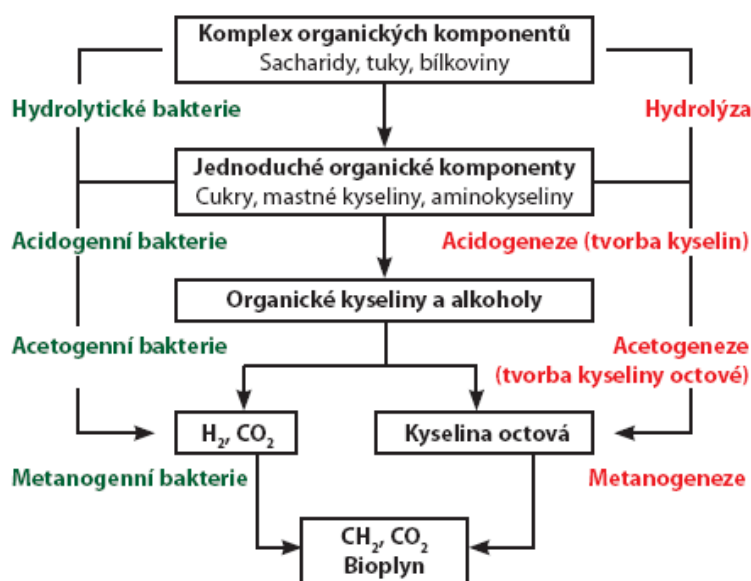
**Tab. 3 Výhody, nevýhody / omezení, potenciály a výzvy / úkoly AnMBR [30] (úprava autor)**

VÝHODY	NEVÝHODY / OMEZENÍ	POTENCIÁLY	VÝZVY / ÚKOLY
<ul style="list-style-type: none"> <li>• produkce bioplynu (CH<sub>4</sub>) – zdroj (uchovatelné) energie (bez nutnosti dodávat vzduch/kyslík jako u MBR)</li> <li>• vysoká kvalita odtoku (permeátu)</li> <li>• vysoká účinnost odstranění organických látek (CHSK)</li> <li>• vysoké stáří a koncentrace kalu v systému</li> <li>• schopnost pracovat s (velmi) vysokým zatížením biomasy – menší reaktory a prostorové nároky</li> <li>• nízká produkce kalu – snížení provozních nákladů, minimalizace event. toxického působení složek OV</li> <li>• retence pomalu rostoucích metanogenních mikroorganismů v systému – vyšší produkce bioplynu, zlepšení energetické bilance</li> <li>• retence specifických mikroorganismů pro danou aplikaci – odstraňování specifických polutantů</li> <li>• rychlejší náběh technologie v porovnání s konvencí</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• zanášení / ucpávání membrán – nejvýznamnější faktor</li> <li>• nutnost pravidelného čištění membránových modulů (mechanické, chemické...)</li> <li>• nedostatečné odstraňování nutrientů - nutnost dočištění</li> <li>• vyšší investiční náklady (?)</li> <li>• složitější provoz systému – vyšší nároky na údržbu a obsluhu (?)</li> <li>• horší filtrovatelnost anaerobního kalu – rychlejší ucpávání membrán, více energie na dosažení požadovaného hydraulického výkonu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• vhodné především pro čištění průmyslových OV</li> <li>• důraz na opětovné využívání vody, možnost úspor vody v rámci procesů</li> <li>• rostoucí potenciál u specifických výroben a provozů</li> <li>• adaptace biomasy na velmi specifické podmínky</li> <li>• retence pomalu rostoucích anaerobních mikroorganismů v systému za zhoršených/extrémních podmínek (vysoký obsah NL, tuků, olejů, koncentrované a toxické OV, teplota, salinita, rychlé a velké změny v zatížení a hydraulické době zdržení apod.)</li> <li>• vhodné především při koncentraci CHSK v přítoku více jak 2 g.l<sup>-1</sup></li> <li>• až 98% CHSK v přítoku do bioplynu</li> <li>• odtok z AnMBR lze dále využívat, recyklace surovin</li> <li>• modulární systém umožňující snadnější budoucí rozvoj a úpravy</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• dosažitelný dostatečný hydraulický výkon (flux)</li> <li>• aplikovatelnost je dána technicko-ekonomickou bilancí, energetickou bilancí</li> <li>• pochopení rozdílů zanášení mezi MBR a AnMBR – provozní podmínky, strategie čištění, aditiva...</li> <li>• možnost začlenění i odstraňování nutrientů</li> <li>• možnosti dočištění/využití odtoku z AnMBR</li> <li>• zlepšení výtěžnosti metanu, především při nižších provozních teplotách</li> </ul>

**Bioplyn** je plyn produkovaný během anaerobní digesce přírodních materiálů. Je to proces, při kterém mikroorganismy rozkládají organický materiál bez přístupu vzduchu (anaerobním prostředím). Skládá se především z metanu (CH<sub>4</sub>) a oxidu uhličitého (CO<sub>2</sub>). Literatura uvádí poměrné zastoupení obou hlavních složek v širokých mezích. Procentuální složení záleží na mnoha parametrech, především kvantitě a kvalitě organických látek (přítoku), typu reaktoru, dobách zdržení, skladbě mikroorganismů, obsahu sušiny, teplotě, pH aj. Při anaerobní digesci vzniká kromě bioplynu ještě tzv. digestát (tuhý zbytek po vyhnutí, lze za určitých podmínek dále využívat) a fugát (tekutý zbytek po vyhnutí). [31-36]

$$1 \text{ kg CHSK}_{odstr.} \approx 0,35 \text{ m}^3 \text{ CH}_4; 1 \text{ m}^3 \text{ BP} - 60\% \text{ CH}_4 \approx 0,6 \text{ kWh} \quad (3) [37]$$

Bioplyn vzniká rozkladem organických látek v anaerobním prostředí. Tento proces se dá v podstatě rozdělit do čtyř fází – hydrolyza, acidogeneze, acetogeneze, metanogeneze. Na každém stupni procesu se podílejí odlišné mikroorganismy s rozličnými enzymy, které vzájemně spolupracují v těsné blízkosti a tvoří jistý druh symbiózy. Fáze tvorby metanu je kvůli pomalu rostoucím a citlivým (amoniak, teplota, pH aj. provozní podmínky) metanogenním bakteriím nejvíce omezujícím krokem v celém procesu. Zatímco termofilní režim má výhodu mj. v lepší produkci bioplynu, mezofilní režim vyniká kvalitou permeátu a menší tendencí k ucpávání membrán. Většina AnMBR systémů byla provozována při neutrálním pH 6,5-8,5, přičemž optimální rozmezí pro tvorbu metanu se uvádí 7,0-8,0. [31-33][36][38-41]



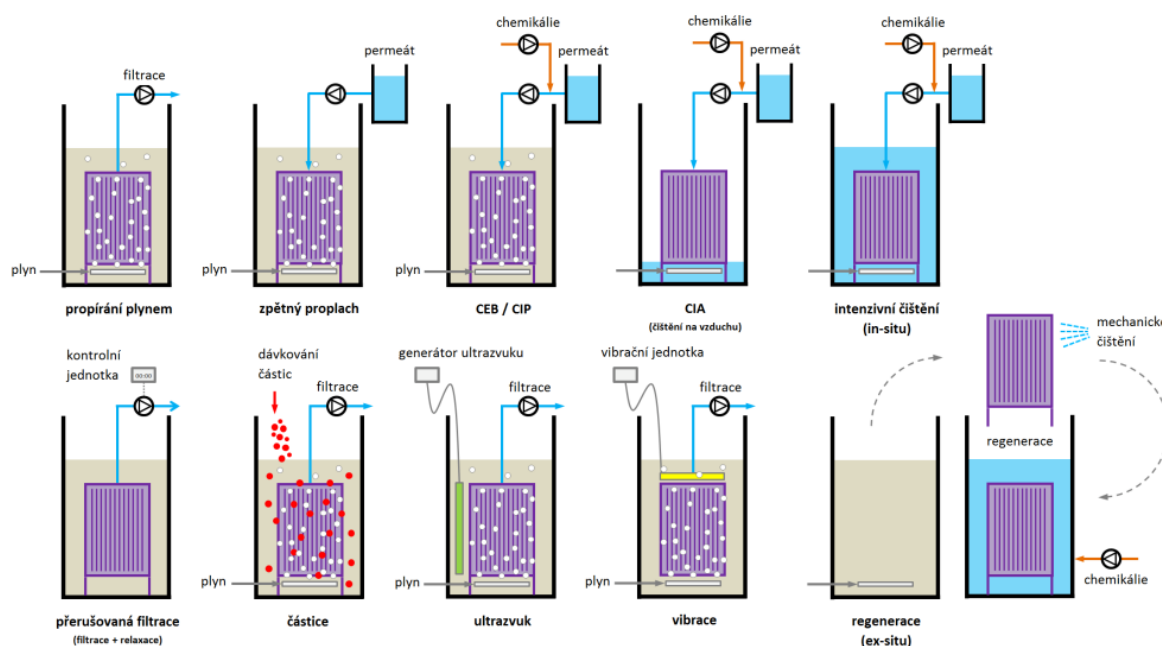
Obr. 2 Schéma anaerobního rozkladu za tvorby bioplynu [42]

Reakční rychlost a produkce bioplynu je velmi závislá na **teplotě** a provoz/proces lze zařadit do čtyř hlavních skupin: [33]

- psychofilní režim / mikroorganismy – teploty < 30°C
- mezofilní režim / mikroorganismy – teploty 30-40°C
- termofilní režim / mikroorganismy – teploty 45-60°C
- extrémně termofilní režim / mikroorganismy – teploty > 60°C

Jako možnosti využití **permeátu** (odtoku) AnMBR lze uvést kromě opětovného zařazení do výrobního procesu např.: mytí komunikací, splachování toalet, prádelny, zalévání a závlahy (zelených ploch urbanizovaných území, v zemědělství, golfových hřištích), obohacování vodních ploch určených k rekreačním účelům, nadlepšování průtoků v tocích, udržování kapacity podzemních zdrojů, protipožární opatření, zasněžování sjezdovek, procesní vody apod. Další možností je cílená recyklace přítomných surovin (dusík, fosfor aj.). Využitelnost je dána především danou dosažitelností kvality, místními legislativními požadavky a technicko-ekonomickým zhodnocením. [12][14][24][26][28][43][44]

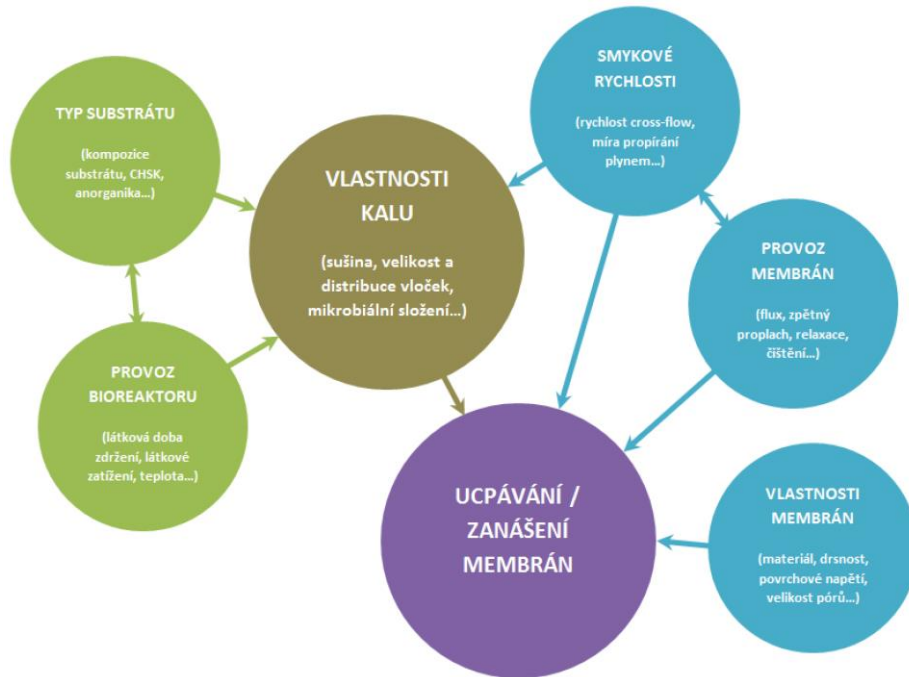
**Ucpávání** membrán zůstává hlavní **nevýhodou** těchto pokročilých procesů čištění OV, protože zvyšuje provozní náklady (čištění, energie), snižuje průtok membránou a její životnost. Proto byl tento nežádoucí jev v posledních letech z různých pohledů rozsáhle zkoumán [11][18-20][26][29][43][45-61], včetně příčin, vlastností, znečišťujících mechanismů a metod vedoucích k zabránění nebo omezení. Porozumění faktorům ovlivňujícím tento negativní jev spolu s výběrem vhodné strategie k jeho omezení jsou naprosto klíčové. Kromě tradičních způsobů provozu (An)MBR a čištění membrán jsou na Obr. 3 uvedeny i způsoby pokročilé - přestože některé z nich mají potenciál, v současné době jsou z různých důvodů nepoužitelné (náklady, nedostatečné ověření aj.).



**Obr. 3** Obecné způsoby omezení ucpávání/zanášení membrán (mechanické a chemické) [50][61] (úprava autor)

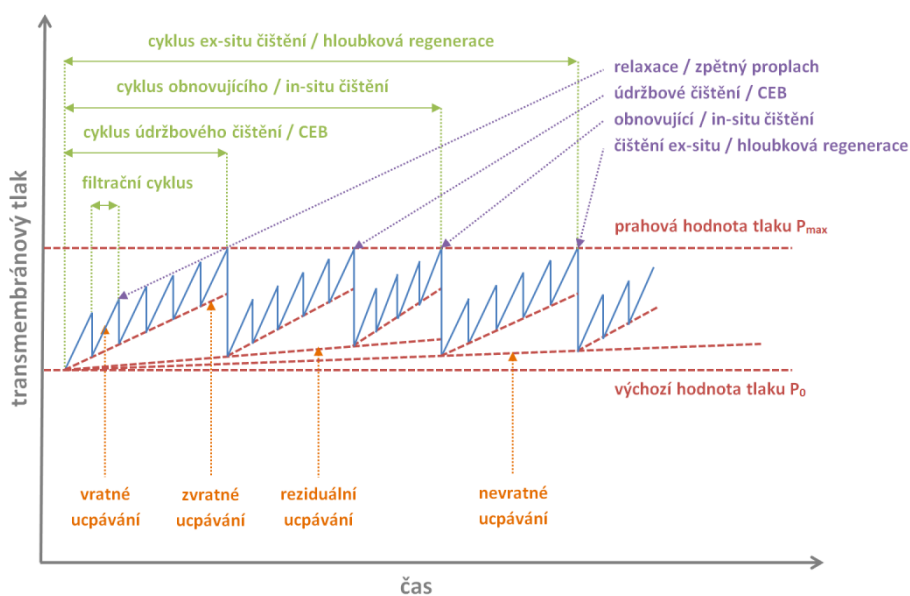
Existuje celá řada faktorů ovlivňujících **životnost** membránových modulů souvisejících s konstrukcí membrán, návrhem systému a způsobem provozování. Zhoršení filtračních vlastností lze zařadit do dvou obecných kategorií - jednou je samotná degradace membrány z mechanických, chemických nebo biologických příčin a druhou je náchylnost k ucpávání. Obecně průtokem membránami dochází k jejich postupnému ucpávání a snížení průtočnosti, což vyžaduje vyvození vyšších tlaků k udržení stálého množství permeátu. Ucpávání membrán může být podle biologických a chemických vlastností způsobováno biologickým znečištěním (biofilm), organickým (fouling) nebo anorganickým (scaling). Na povrchu může vznikat tenká vrstva, docházet k ucpávání pórů / průtočných kanálků nebo ucpávání prostor mezi membránovými vlákny / deskami. K zajištění stabilního odtoku je nutné membrány v pravidelných intervalech (dle daných podmínek) čistit. S rostoucí kvalitou předčištění se prodlužuje interval mezi čištěním a regeneracemi.





Obr. 4 Faktory ovlivňující ucpávání / zanášení membrán v AnMBR [43][54] (úprava autor)

Mezi hlavní způsoby prevence ucpávání membrán u (An)MBR patří (kromě způsobů předčištění) propírání plynem. Vháněný (bio)plyn strhává pevné látky a zabraňuje usazování / ulpívání na povrchu membrány. Zároveň vyvolává proudění, které zamezuje vzniku mrtvých prostor v membránovém modulu a nádrži. Tento způsob prevence současně představuje významné provozní náklady. Dalším preventivním způsobem omezení ucpávání membrán je přerušovaná filtrace (střídání fází filtrace a relaxace) a cyklický zpětný proplach permeátem (případně chemicky obohacený zpětný proplach - CEB). [11][43][50][51][54]



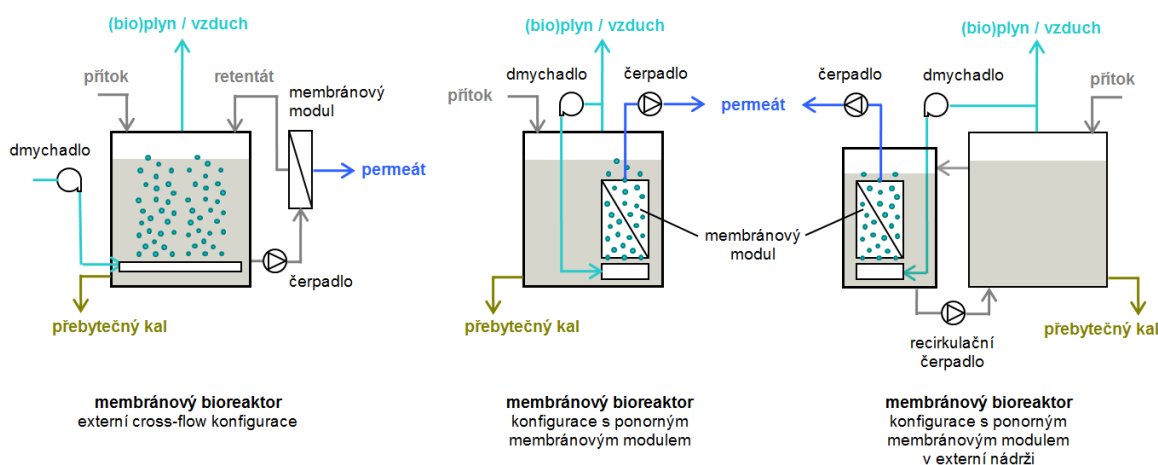
Obr. 5 Ucpávání a čištění membrán během dlouhodobého provozu reaktoru [50] (úprava autor)

Bez ohledu na prevenci zanášení vyžadují membrány pravidelné **čištění** k odstranění nahromaděného materiálu na povrchu nebo uvnitř membrány a udržení si tak svých (počátečních) průtočných vlastností. Klíčovými parametry, které je nutné optimalizovat, jsou průtok, doba trvání a četnost čištění. Vzhledem k tomu, že se složení OV na jednotlivých ČOV výrazně liší, jsou vyžadovány i odlišné strategie čištění. Obecně rozlišujeme tři druhy čistících metod - mechanické, chemické a případně i biologické / biochemické (poslední zmíněné nejsou v současné době příliš rozšířené). [50][61]

### 3.5 AnMBR konfigurace

**Rozeznávají se 3 základní AnMBR konfigurace, obdobně jako u aerobních MBR:**

- externí cross-flow konfigurace – membránový modul/membrána je instalována/a na externí smyčce mimo nádrž bioreaktoru; k separaci dochází pomocí přetlaku; membránové moduly lze řadit sériově i paralelně;
- konfigurace s ponorným membránovým modulem – membránový modul/membrána je uložena přímo v nádrži bioreaktoru; k separaci dochází pomocí podtlaku;
- konfigurace s ponorným membránovým modulem v externí nádrži – membránový modul/membrána je uložena (ponořena) v oddělené nádrži; k separaci dochází pomocí podtlaku; tato konfigurace představuje vyšší investiční i provozní náklady než konfigurace předešlá, ale umožňuje lepší optimalizaci provozu.



Obr. 6 Základní konfigurace membránových bioreaktorů [62] (úprava autor)

### 3.6 Výzkumné aktivity - směry a trendy

AnMBR se s rostoucím počtem full-scale referencí stávají ověřenou a průmyslově atraktivní technologií [43][45][63-74]. Velký potenciál nabízí především v kombinaci s dalšími technologiemi. Vývoj samotných membrán neustále pokračuje [75-77], což má za následek snižování investičních / provozních nákladů. Do budoucna by se tak (díky svým přínosům a naopak potlačování negativ)

rozšířenost anaerobních membránových aplikací mohla přiblížit již dobře zavedeným aplikacím aerobním [78].

Mezi **hlavní proudy výzkumných aktivit** v oblasti anaerobních membránových technologií v současnosti patří: [79-82]

- materiály a úpravy membrán / membránových modulů za účelem snížit náchylnost k ucpávání a zvýšit životnost, resp. snížit investiční i provozní náklady;
- čištění komunálních odpadních vod a odpadních vod s nižšími koncentracemi / za nižších provozních teplot;
- optimalizace provozu membránové filtrace a využitelnost souvisejících vedlejších produktů - bioplyn, kal, permeát;
- užití technologie ve vysoce specifických podmínkách / na vysoce specifických odpadních vodách;
- kombinace čistících technologií;
- porovnávání aerobních a anaerobních membránových bioreaktorů (MBR a AnMBR);
- matematické modelování.

## 4. VLASTNÍ ŘEŠENÍ DIZERTAČNÍ PRÁCE

Praktická část dizertační práce by se dala rozdělit do 4 bloků: **1)** stručný popis vybrané lokality testování a odpadních vod, **2)** laboratorní testování ponorných membránových modulů pro účely AnMBR (včetně souvisejících aktivit), **3)** návrh, popis a zkušební provoz pilotní jednotky a **4)** závěry, doporučení a přínosy.

### 4.1 Lokalita testování a stručný popis

Pro potřeby testování byla vybrána nedaleká ČOV potravinářského průmyslu - ČOV Pivovar Černá Hora. Pivovar Černá Hora [83] se nachází přibližně 30 km severně od Brna směrem na Svitavy a je nejstarším působícím pivovarem na Moravě, který si až do dnešních dnů zachoval svoji historickou podobu. První neoficiální zmínka o vaření piva pochází již ze 14. století. V pivovaru byla zachována klasická technologie výroby piva, budovaná po staletí generacemi sládků. Pod vedením nového vlastníka pivovar významně zvýšil svou výrobní kapacitu. Pivovar každý rok investuje nemalé prostředky do výrobních zařízení. V roce 2012 se pivovar zařadil mezi české inovátory ve výrobě nealkoholických nápojů. [84][85]

Stávající anaerobně-aerobní ČOV je vybavena mj. vysoko zatěžovaným anaerobním IC reaktorem (mezofilní režim) a umožňuje zpracovávat veškeré OV pocházející z výroby, hotelu a restaurace v areálu.

Tab. 4 Kvalita OV ČOV Pivovar Černá Hora na přítoku (data poskytl provozovatel)

<b>PŘÍTOK 30. 3. 2016</b>	<b>AOX</b> [mg.l <sup>-1</sup> ]	<b>BSK<sub>5</sub></b> [mg.l <sup>-1</sup> ]	<b>CHSK</b> [mg.l <sup>-1</sup> ]	<b>P<sub>c</sub></b> [mg.l <sup>-1</sup> ]	<b>NL</b> [mg.l <sup>-1</sup> ]	<b>RL</b> [mg.l <sup>-1</sup> ]	<b>RAS</b> [mg.l <sup>-1</sup> ]	<b>pH</b> [-]
	0,096	1 720	3 140	4,27	413	1 790	1 180	6,06
	<b>anorg. N</b> [mg.l <sup>-1</sup> ]	<b>dusič. a dusit. N</b> [mg.l <sup>-1</sup> ]	<b>dusičnany</b> [mg.l <sup>-1</sup> ]	<b>N dle Kjeldala</b> [mg.l <sup>-1</sup> ]	<b>dusitany</b> [mg.l <sup>-1</sup> ]	<b>amoniak. N</b> [mg.l <sup>-1</sup> ]	<b>dusičnan. N</b> [mg.l <sup>-1</sup> ]	<b>dusitan. N</b> [mg.l <sup>-1</sup> ]
	0,5	0,4	0,27	48,5	0,005	0,37	0,06	0,002
<b>PŘÍTOK 9. 8. 2016</b>	<b>AOX</b> [mg.l <sup>-1</sup> ]	<b>BSK<sub>5</sub></b> [mg.l <sup>-1</sup> ]	<b>CHSK</b> [mg.l <sup>-1</sup> ]	<b>P<sub>c</sub></b> [mg.l <sup>-1</sup> ]	<b>NL</b> [mg.l <sup>-1</sup> ]	<b>RL</b> [mg.l <sup>-1</sup> ]	<b>RAS</b> [mg.l <sup>-1</sup> ]	<b>pH</b> [-]
	0,069	938	1 740	4,41	253	2 370	1 790	7,23
	<b>anorg. N</b> [mg.l <sup>-1</sup> ]	<b>dusič. a dusit. N</b> [mg.l <sup>-1</sup> ]	<b>dusičnany</b> [mg.l <sup>-1</sup> ]	<b>N dle Kjeldala</b> [mg.l <sup>-1</sup> ]	<b>dusitany</b> [mg.l <sup>-1</sup> ]	<b>amoniak. N</b> [mg.l <sup>-1</sup> ]	<b>dusičnan. N</b> [mg.l <sup>-1</sup> ]	<b>dusitan. N</b> [mg.l <sup>-1</sup> ]
	13	0,4	0,27	55,9	0,005	13	0,06	0,002

## 4.2 Laboratorní testování membránových modulů

V rámci výzkumného projektu (Nové energeticky efektivní metody čištění průmyslových odpadních vod [86][88]) klastru firem, výzkumných institucí a vysokých škol CREA Hydro&Energy, z.s. [87], byly na základě literární rešerše zaměřené na nejvhodnější polymerní ponorné membránové moduly (oblast mikrofiltrace a ultrafiltrace) pro použití k čištění průmyslových OV s důrazem na průmysl potravinářský a produkci bioplynu, vytipovány 2 komerčně dostupné výrobky vhodné pro laboratorní testování - Kubota Membrane Cartridge Type 203 [89][90] a Microdyn Nadir BIO-CEL LAB BC25x25 [91][92]. Oba membránové moduly jsou navzájem porovnatelné. Jsou typu FS (flat sheet) a mají efektivní filtrační plochu  $\sim 0,33 \text{ m}^2$ .



Obr. 7 Laboratorní moduly Kubota a Microdyn-Nadir (foto autor)

Výhodou **Kubota** je fakt, že mají na poli anaerobních membránových bioreaktorů několikaleté zkušenosti a řadu instalací (Kubota Anaerobic MBR [64]), a tudíž lze předpokládat vhodnost membrán k tomuto účelu. Vzhledem ke konstrukci membránových panelů nelze uplatnit zpětný proplach a uživatel je omezen na provoz v kombinaci filtrace + relaxace. Dalším z výrazných rozdílů oproti zvoleným membránám Microdyn-Nadir je nominální velikost pórů, která se pohybuje o řád výše - okolo  $0,4 \mu\text{m}$ . Materiál membrány je CPE – chlorovaný polyetylén. Pro pořízené membránové panely bylo zapotřebí vyrobit modul (housing; obdobné rozměry, výrobcem doporučené odstupy), na propírání plynem byl použit stejný aerační element jako u modulu Microdyn-Nadir.

Nespornou výhodou ponorných membránových modulů **Microdyn-Nadir** [93] je možnost zpětného proplachu (do tlaku 150 mbar), a tudíž lepší kontroly ucpávání membrán, jednoho z nejvýraznějších omezení všech membránových bioreaktorů (fouling je navíc za anaerobních podmínek mnohem závažnější než za aerobních). Hodnota maximálního doporučeného pracovního podtlaku je v porovnání s panely Kubota příznivější, a to dvojnásobně (400 vs. 200 mbar). Velikosti pórů výrobce udává  $0,04 \mu\text{m}$ , materiál membrány je PES - polyétersulfon.

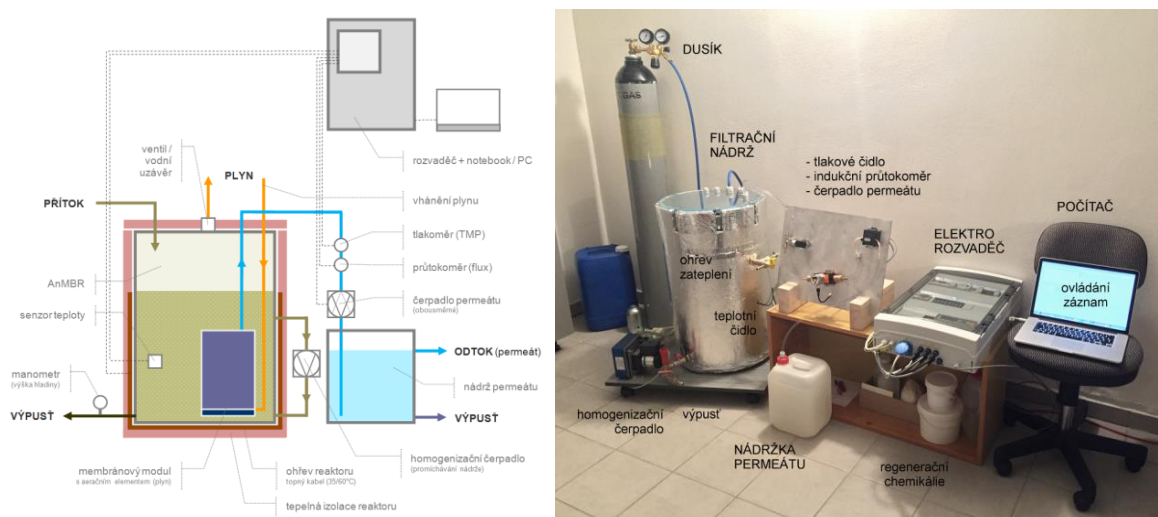
**Tab. 5 Srovnání laboratorně testovaných membránových modulů [88][89][91] (úprava autor)**

Parametr / výrobce	Jednotka	Kubota	Microdyn Nadir
Označení membrány / modulu	-	Membrane Cartridge Type 203 / XJ3	Nadir UP 150 / BIO-CEL LAB
Materiál membrány	-	CPE	PES
Filtrační režim	-	mikrofiltrace	ultrafiltrace
Typ membrány	-	FS	FS
Filtrační plocha modulu	m <sup>2</sup>	0,33 (3ks)	0,34 (3ks)
Velikost pórů	μm (kDa)	0,4	0,04 (150)
Rozměry 1 membrány (ŠxVxT)	mm	227 x 341 x 7	250 x 250 x 2
Max. rozměry testovacího modulu (Š x V x T)	mm	227 x 1 030 x 160	390 x 695 x 180
Rozestupy membrán	mm	14	
Provozní teplota	°C	5 - 40	5 - 40
Pracovní rozsah pH	-	1 - 10	2 - 11
TMP: filtrace / zpětný proplach	mbar	< 200 / -	< 400 / < 150

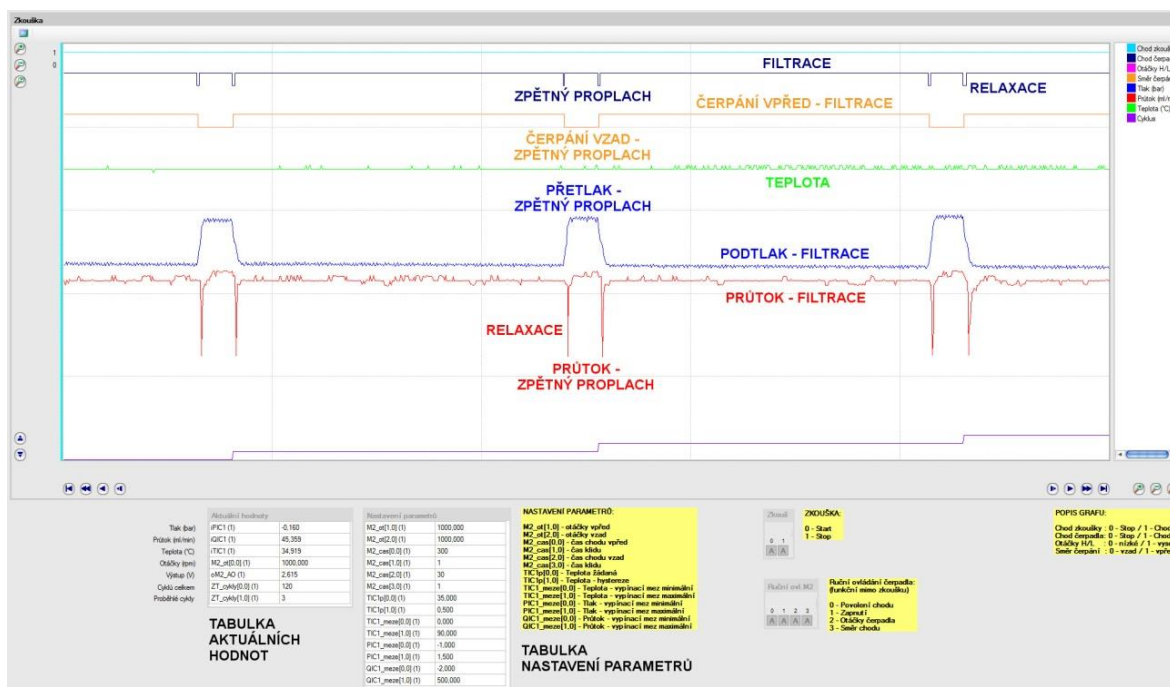
Oba výrobci nabízejí možnost následného rozšíření nebo řadu větších modulů, což bylo podmínkou pro případné následné osazení do pilotního AnMBR.

Pro účely testování membránových modulů byla navržena a zkonstruována níže uvedená **laboratorní sestava**. Jednotlivé membránové moduly byly postupně osazovány do anaerobní filtrační nádrže o celkovém objemu 100L (nerezová ocel, výška 750 mm, průměr 410 mm) a vyhodnocovány různé strategie provozu s ohledem na minimalizaci ucpávání membrán. Filtrační nádrž je vyhřívána (mezofilní režim 35°C a termofilní režim 55°C) pomocí topného kabelu (TO-2F-50-5, 50 W.m<sup>-1</sup>, celková délka 10 m, temperován plášť do výšky 500 mm, pravidelná rozteč závitů 60-65 mm) vinutého ve šroubovici po obvodovém plášti nádoby a je patřičně tepelně izolovaná minerální vatou s fólií. Ohřev je automaticky řízen na základě informací teplotního senzoru (SENSIT TG8J-100, Ni1000/5000-N1) umístěného uvnitř nádrže pomocí jímky (JTG8 I = 100 mm), jako pojistka proti přehřátí kabelu slouží teplotní senzor (kabelový teplotní senzor ETF-122) na plášti nádrže a elektronický termostat (ETI 1221 s teplotním rozsahem 10-110°C). Výšku hladiny lze odečíst vizuálně skrz průhledné dvojité víko na měrné tyči uchycené uvnitř nádrže, případně manometru (0-10kPa) instalovaném v blízkosti výpustě. Kontinuální promíchávání obsahu nádrže zajišťuje peristaltické čerpadlo a dusík z tlakové lahve (pokud je použití vhodné pro daný testovací cyklus) vháněný do jemnobublinného aeračního elementu umístěného pod membránový modul. Propírání membránového modulu plynem je jedním ze způsobů omezení ucpávání membrán a tím filtrační schopnosti. Odvod přebytečného plynu nahromaděného v horní části nádrže a zamezení vniku vzduchu je realizováno vodním uzávěrem na plynotěsně uzavřeném víku. Filtraci a zpětný proplach permeátem zajišťuje obousměrné peristaltické čerpadlo (WMC 250-SMB-6, max. 120/200 ml.min<sup>-1</sup>) řízené PLC (AMINI4DW2) v rozvaděči. Lze nastavit rychlost filtrace a zpětného proplachu

(resp. otáčky čerpadla) a doby jednotlivých chodů (filtrace, relaxace, zpětný proplach). Zkouška se ukončí po uplynutí počtu zkušebních cyklů / nastavené doby, zásahem obsluhy, nebo při dosažení mezních stavů (tlak, průtok). Průtok je měřen indukčním průtokoměrem (KOBOLD MIK-5NA 08 P C34P Y s rozsahem měření 10-500 ml.min<sup>-1</sup>), TMP tlakovým senzorem (WIKA A-10, -1/+1,5 bar). Měřené hodnoty tlaku, průtoku a teploty v závislosti na čase jsou přenášeny z PLC do PC (notebooku) – zobrazení hodnot a vykreslování grafů, archivace.



**Obr. 8** Laboratorní sestava pro testování ponorných membránových modulů - schéma a foto [88] (autor)



**Obr. 9** Laboratorní AnMBR sestava - ovládání a záznam [88] (úprava autor)

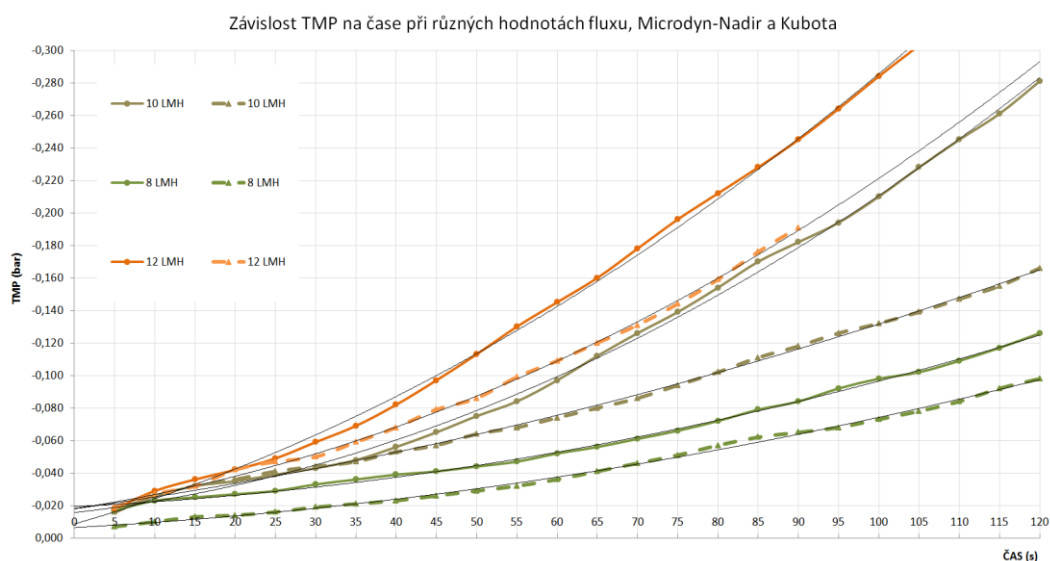
Jako filtrát byla zvolena směs anaerobního kalu a OV z Pivovaru Černá Hora. Průměrné hodnoty znečištění na přítoku v testovacím období byly následující - CHSK<sub>Cr</sub> 5 300 mg.l<sup>-1</sup>, NL sušené (105°C)

1 000 mg.l<sup>-1</sup>. Rozbory kalu vykazovaly hodnoty - usaditelné látky 800 ml.l<sup>-1</sup>, sušina při 105°C 1,85%, ztráta žiháním při 550°C 78,5% suš.

U zvolených membránových modulů byly stanoveny závislosti TMP při různých **hodnotách fluxu** (4, 6, 8, 10, 12, 15 a 20 l.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup>) na čase (a vypočtena permeabilita), a to za mezofilních (35°C) i termofilních (55°C) **teplotních podmínek**. Z těchto křivek byl stanoven vhodný flux pro testování a následné porovnání různých **provozních cyklů**. Každý cyklus probíhal do dosažení zvolené či mezní hodnoty TMP, kdy došlo k ukončení zkoušky a porovnání rychlosti ucpávání membrán vzhledem k celkovému přefiltrovanému množství.

Pro jednotlivé fáze byly kromě kontinuálně zaznamenávaných dat (TMP, průtok/flux, permeabilita, teplota, výška hladiny) vyhodnocovány také základní charakteristiky filtrátu (pH, CHSK, NL, kal) na začátku dané zkoušky (po odebrání filtrátu na ČOV, pro zajištění / ověření konstantních podmínek a porovnatelnost výsledků).

Pro ilustraci - následující graf (Obr. 10) zobrazuje porovnání závislostí obou membránových modulů pro střední hodnoty fluxu - 8, 10 a 12 l.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup>. Hodnoty Microdyn-Nadir jsou zobrazeny plnými čarami, Kubota čarami přerušovanými.



**Obr. 10** Laboratorní testování membránových modulů: porovnání závislostí TMP na čase obou membránových modulů při středních hodnotách fluxu [88] (autor)

Jak je patrné, membránový modul Kubota vykazuje při stejných hodnotách fluxu nižší hodnoty TMP než membránový modul Microdyn-Nadir, což se vzhledem k větším pórům předpokládalo.

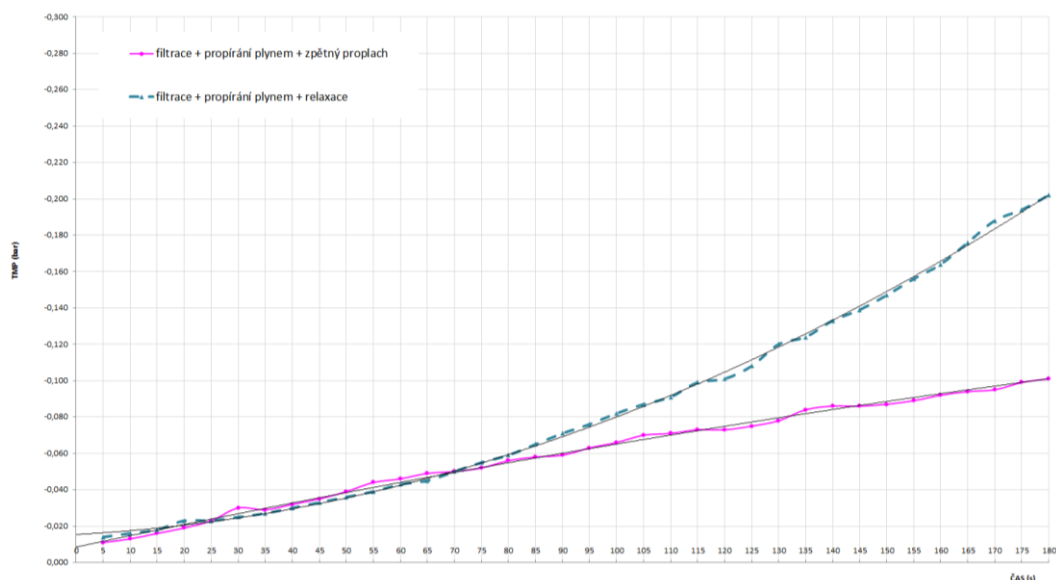
Pro následující krátkodobé (240 min.) testování jednotlivých provozních strategií byl z důvodu názornosti zvolen flux 12 l.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup>. Nejedná se o optimální specifický průtok membránou blízký kritickému fluxu. Jednalo se o tyto varianty:

- filtrace
- filtrace + relaxace: filtrace 9 min. (540 s), relaxace 1 min. (60 s);
- filtrace + propírání plynem: kontinuální propírání stlačeným lahvovaným dusíkem 4 l.min<sup>-1</sup>;



- filtrace + zpětný proplach (Microdyn-Nadir): filtrace 9 min. (540 s), relaxace 1 s, zpětný proplach 1 min. (58 s), relaxace 1 s;
- filtrace + propírání plynem + relaxace (Kubota): filtrace 9 min. (540 s), relaxace 1 min. (60 s); propírání plynem bylo nastaveno v intervalech 5 min. s délkou trvání 1 min. (pátou minutu filtrace a po dobu relaxace),  $4 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ ;
- filtrace+propírání plynem + zpětný proplach (Microdyn-Nadir): filtrace 9 min. (540 s), relaxace 1 s, zpětný proplach 1 min. (58 s), relaxace 1 s; propírání plynem bylo nastaveno v intervalech 5 min. s délkou trvání 1 min. (pátou minutu filtrace a po dobu zpětného proplachu),  $4 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ .

Křivky uvedených cyklů Kubota byly strmější - k ucpávání membrán docházelo sice zpočátku pomaleji, ale po chvíli TMP narůstalo výrazněji než u Microdyn-Nadir - dáno charakterem filtrátu a velikostí pórů membrány.



**Obr. 11** Laboratorní testování membránových modulů: porovnání cyklů filtrace+propírání plynem+relaxace (Kubota, čárkovaně) a filtrace+propírání plynem+zpětný proplach (Microdyn-Nadir, plné čáry) při hodnotě fluxu  $12 \text{ l} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  [88] (autor)

Je důležité zdůraznit, že výrobci membránových modulů uvádějí rozdílné maximální provozní hodnoty TMP. U Kubota je to -200 mbar, zatímco u Microdyn-Nadir je hodnota dvojnásobná, tj. -400 mbar. Rozdíly v tendenci k ucpávání byly výrazné - ve prospěch membránového modulu Microdyn-Nadir. Ten disponuje navíc výhodou zpětného proplachu. Před zahájením cyklu testování byl membránový modul řádně mechanicky (tlakem vody) a chemicky (lázně NaOCl + NaOH, kyselina citronová) vyčištěn, aby vykazoval co možná nejpůvodnější hodnoty.

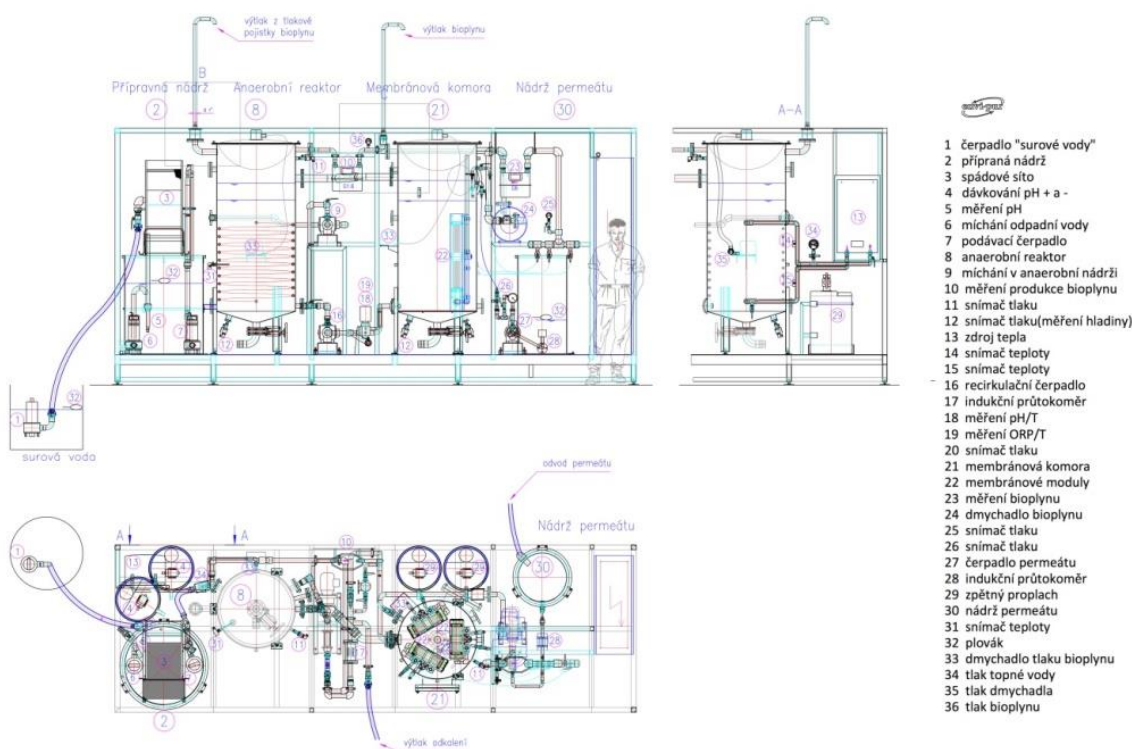
**Přínosem** laboratorního testování bylo ověření stávajících komerčně dostupných membránových modulů pro nové (nestandardní) použití (AnMBR). Byly zjištěny a porovnány základní požadavky a konstrukční zásady vzhledem k provozu membránových modulů v anaerobních podmínkách. Byly vybrány 2 vhodné ploché polymerní ponorné mikro/ultrafiltrační membránové moduly s porovnatelnou efektivní filtrační plochou ( $\sim 0,33 \text{ m}^2$ ) k následnému laboratornímu testování

v navržené laboratorní sestavě (AnMBR). Přestože nejsou výsledky tohoto krátkodobého laboratorního testování absolutně zobecnitelné, jsou uvedeny tendence k ucpávání vybraných membránových modulů při různých hodnotách fluxu a strategiích provozů, které mohou být vodítkem pro další podobné aktivity nebo navazující pilotní zkoušky. Pro toto konkrétní použití (AnMBR pro OV z pivovaru) vykazuje membránový modul Microdyn-Nadir příznivější hodnoty s ohledem na ucpávání (i přestože se jedná o jemnější filtraci) a umožňuje více provozních strategií – především zpětný proplach. Doporučený počáteční flux pro dlouhodobější testování či aplikaci je  $\sim 8 \text{ l.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ . Oba výrobci uvádějí maximální provozní teplotou  $40^\circ\text{C}$ . Dlouhodobější osazení membránových modulů do reaktorů pracujících v mezofilním režimu (okolo  $35^\circ\text{C}$ ) by tedy mělo být bezproblémové. Během krátkodobého laboratorního testování v podmínkách termofilních ( $55^\circ\text{C}$ ) nedošlo k žádné znatelné degradaci membrány. Údaje získané provozem laboratorního membránového reaktoru poskytly informace o důležitých trendech a korelacích v systému a umožnily vybrat vhodné ponorné membránové moduly pro pilotní AnMBR [94-97], ale také stanovit vhodné počáteční nastavení provozních parametrů.

## 4.3 Návrh, popis a zkušební provoz poloprovozní jednotky

### 4.3.1 Popis poloprovozní jednotky

Mobilní poloprovozní model je určený pro experimentální čištění OV především z průmyslových objektů. Jedná se o anaerobní čištění průmyslových OV s membránovou separací.

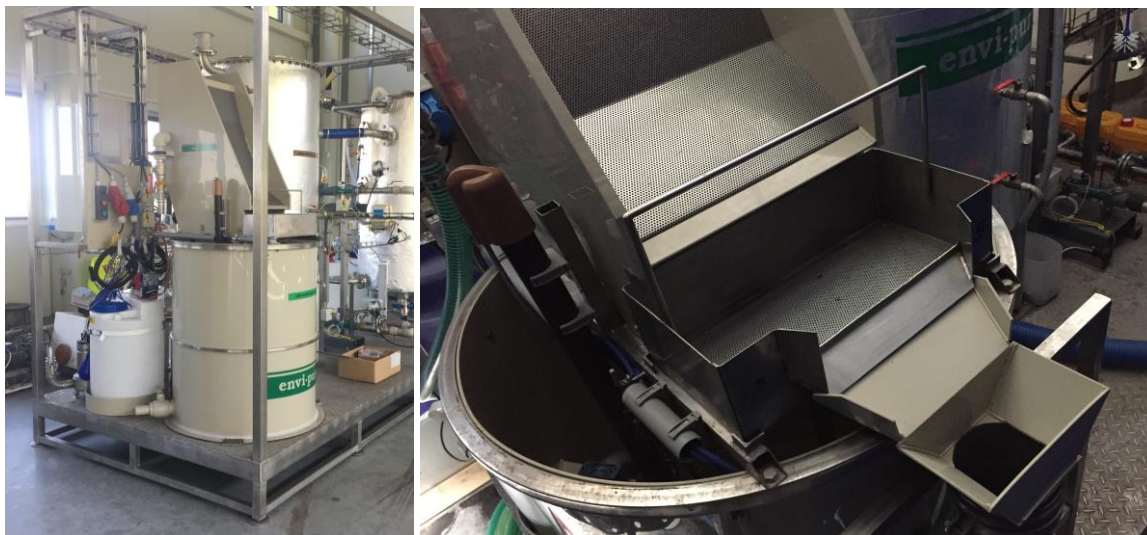


Obr. 12 Poloprovozní AnMBR - výkres s popisem [94]

Hlavní částí modelu je anaerobní reaktor s tepelným výměníkem a membránová komora, kde jsou umístěny ultrafiltrační membránové moduly. Navržený AnMBR [94] je koncipován jako rozšiřitelný (s ohledem na variabilitu a univerzálnost systému) celek - mobilní jednotka téměř kompletně sestavená v rámu, umožňující převoz a/nebo umístění v zaplachtovaném vozíku. Následující popis jednotky vychází ze spolupráce s dodavatelem, z návodů k obsluze [98][99] a ze zkušeností z provozu [30].

#### 4.3.1.1 Přípravná nádrž

Surová OV je čerpána ponorným kalovým čerpadlem na spádové síto, které je umístěno nad PP přípravnou nádrží ( $\varnothing$  1 m a  $h = 1,5$  m). OV je čerpána do klidové části spádového síta, z které samovolně přepadá na separační část (jemné předčištění s průlinou 2 mm). Na separační části jsou ve sběrném koši zachyceny shrabky, které je nutno manuálně odstraňovat do přiložené nádoby, případně přepadají přes dodatečně dobudované potrubí do přistavené nádoby. Přípravná nádrž slouží také pro vyrovnání pH. Hodnotu pH přiváděné odpadní vody vyhodnocuje pH sonda upevněná ke konstrukci přípravné nádrže. Do nádrže jsou pomocí dávkovacích čerpadel ( $Q = 2,3 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$ ) dávkovány chemikálie - například kyselina citronová nebo hydroxid sodný. Na dně přípravné nádrže je osazeno míchací čerpadlo, které zajišťuje dostatečnou homogenizaci. Hladina v nádrži je řízena dle plovákových spínačů. Z přípravné nádrže je OV dopravována do anaerobního reaktoru pomocí ponorného kalového čerpadla. Na propojovacím potrubí je osazena zpětná klapka (domontována) a elektroventil.

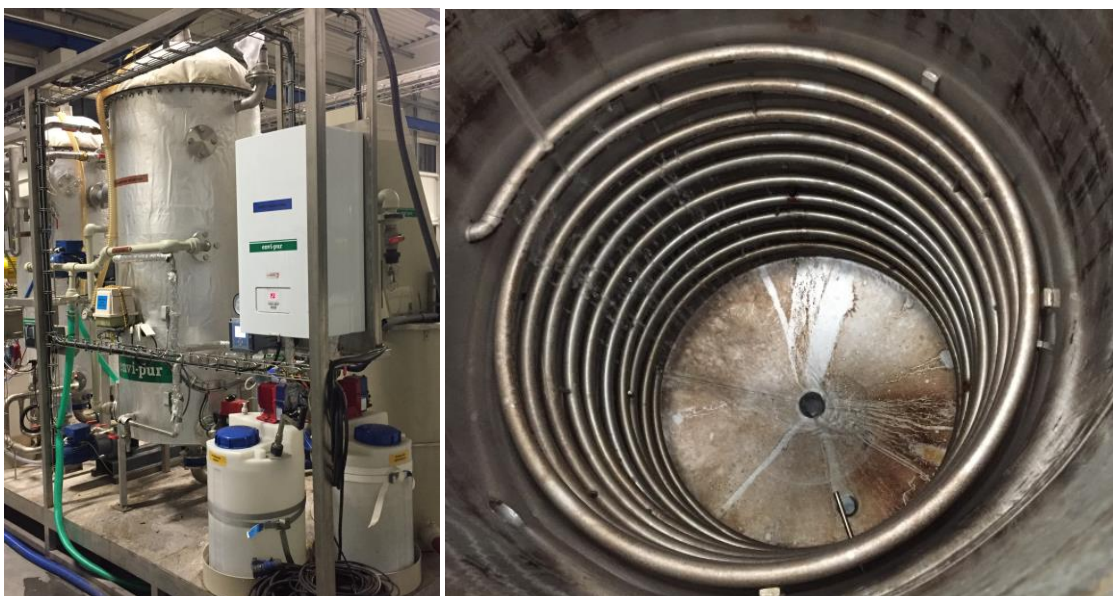


Obr. 13 Poloproduční AnMBR - přípravná nádrž, spádové síto (foto autor)

#### 4.3.1.2 Anaerobní reaktor

Je ocelová nádrž o průměru 0,8 m a výšce 2,4 m po obvodě opatřená tepelnou izolací. V nádrži probíhá mikrobiální rozklad organické hmoty za anaerobních podmínek. Obsah nádrže je možné zahřívát pomocí tepelného výměníku (spirálově vinuté potrubí), který je veden v  $\frac{1}{2}$  výšky nádrže. Topná voda je ohřívána pomocí elektrického kotle Protherm RAY 6K. Hodnota teploty topné a vratné vody výměníku je snímána pomocí dvou teplotních čidel. Hladina v aerobním reaktoru je kontinuálně

měřena pomocí tlakové sondy umístěné v dolní části pláště reaktoru. Další z měřených veličin je teplota v reaktoru (stonkové teplotní čidlo umístěné v nerezové jímce). Čidlo je umístěné v ½ výšky tepelného výměníku. Anaerobní procesy je možno řídit dle zvolené teploty (umožňuje i termofilní režim). Měření přetlaku bioplynu v reaktoru je realizováno pomocí tlakového čidla umístěného v horní části. V reaktoru je zaručena dostatečná homogenizace pomocí vřetenového míchacího čerpadla. Vzniklý bioplyn je akumulován nad hladinou OV. Přetlak v anaerobním reaktoru je vyvozen dodávaným množstvím vzduchu do vzduchového vaku, který má vlastní pojistnou klapku. Reaktor je také opatřen pojistným ventilem. V případě, že koncentrace kalu je nad požadovanou hodnotu (dodavatelem uvedeno  $12 \text{ g.l}^{-1}$ ), je nutné odčerpat přebytečný kal. To lze provést otevřením deskového šoupěte jedné z nádrží - anaerobního reaktoru a/nebo membránové komory.



Obr. 14 Poloprovozní AnMBR - anaerobní reaktor, ohřev (foto autor)

#### 4.3.1.3 Membránová komora

Do membránové komory (rozměry shodné jako anaerobní reaktor) je směs kalu dopravována recirkulačním potrubím, na kterém jsou měřeny veličiny pH a ORP sondami, tlak tlakovým čidlem a průtok indukčním průtokoměrem ( $0,4-10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ). Recirkulaci z anaerobního reaktoru do membránové komory zajišťuje vřetenové recirkulační čerpadlo ( $50-240 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$ ). Membránová komora je vybavena průhledovými okny se stěrkami a možností ostříku vodou.

V membránové komoře jsou osazeny 3 membránové filtrační moduly. Pod každým membránovým modulem je aerační systém, který zajišťuje dodávku bioplynu pro turbulentní proudění kolem listů membrány, což způsobuje oklepávání membrány a tím její čištění od zachyceného kalu. Dodávku bioplynu pod membránové moduly zajišťuje samostatné dmychadlo s frekvenčním měničem, které je řízeno dle chodu čerpadla permeátu, nebo časově. Hladina je kontinuálně snímána tlakovým čidlem. Odčerpání permeátu z membránových modulů zajišťuje vřetenové čerpadlo ( $14-53 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$ ) s frekvenčním měničem. Na sání čerpadla je osazeno tlakové čidlo pro měření TMP. Dále je na výtlačném potrubí osazen indukční průtokoměr ( $0,02-0,04 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ), který měří množství

vyčištěné vody. Toto množství je zaznamenáváno v řídicím systému.



Obr. 15 Poloprovozní AnMBR - membránová komora, membránové moduly (foto autor)

#### 4.3.1.4 Nádrž permeátu

Výtlač čerpadla permeátu je zaústěn do nádrže permeátu, ze které je nadbytečná voda odváděna přepadem do odpadního žlabu. Vizuální kvalita permeátu se může provádět v nádrži permeátu, nebo přímo na dobudovaných průhledkách potrubí permeátu. Pokud permeát obsahuje částice nebo nerozpuštěné látky, okamžitě je nutné kontaktovat odborný servis - částice v permeátu jsou pravděpodobně známkou poškození membrány nebo netěsností potrubí.

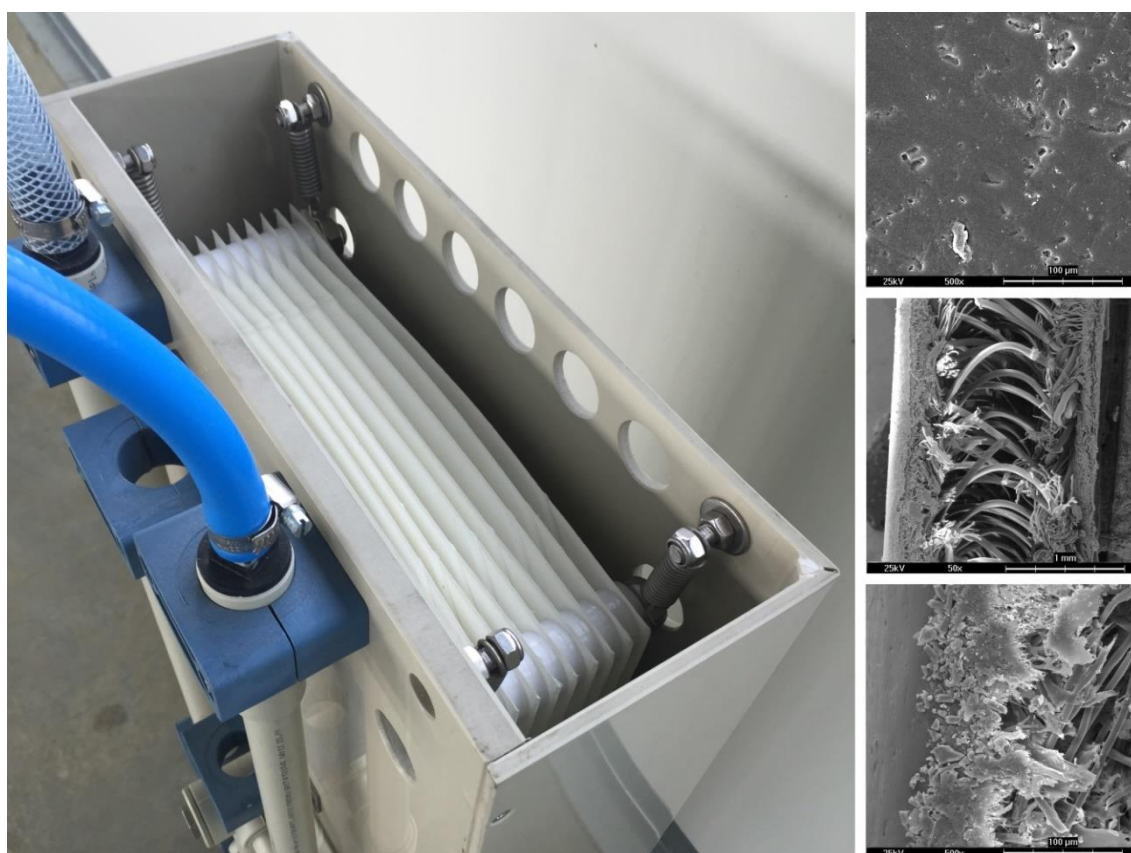


Obr. 16 Poloprovozní AnMBR - nádrž permeátu (foto autor)

#### 4.3.1.5 Membránové moduly pilotní jednotky

Pro pilotní AnMBR byly na základě rešerše a předchozích zkušeností při laboratorním testování [88] vybrány ponorné ploché polymerní (PES) membránové moduly Microdyn-Nadir BIO-CEL s velikostí pórů  $0,04 \mu\text{m}$  / selektivitou 150 kDa s filtrační plochou  $3,5 \text{ m}^2$ . Tyto membránové moduly svou konstrukcí umožňují zpětný proplach a CEB (do 150 mbar) a mají vhodné limitující parametry udávané výrobcem / dodavatelem (především pro mezofilní režim).

Hladina v bioreaktoru nesmí být tak nízko, aby membránový modul byl nad vodou. Jednu namočený membránový modul nesmí vyschnout, jinak dojde k jeho nevratnému zničení (lze za jistých podmínek konzervovat a uchovat pro další použití).



Obr. 17 Vybrané membránové moduly osazené v poloprovozním AnMBR, SEM snímky (foto autor)

#### 4.3.1.6 Chemické hospodářství

Chemické hospodářství slouží k úpravě pH v přípravné nádrži a chemicky obohacným zpětným proplachům (CEB) membrán v membránové komoře, případně také může sloužit k regeneraci membrán uvnitř membránové komory. Úprava mechanicky předčištěné vody na vstupu je realizována pomocí kyseliny citronové a hydroxidu sodného. Požadovanou hodnotu pH lze nastavit v řídicím systému, případně spustit i manuálně. Hodnota pH je měřena sondou umístěnou v přípravné nádrži. K omezení ucpávání membrán přispívá také chemicky obohacený zpětný proplach

za pomoci kyseliny citronové a chlornanu sodného (viz také kapitola MaR). Hodnota pH je měřena na potrubí permeátu instalovanou sondou.

#### 4.3.1.7 Plynové hospodářství

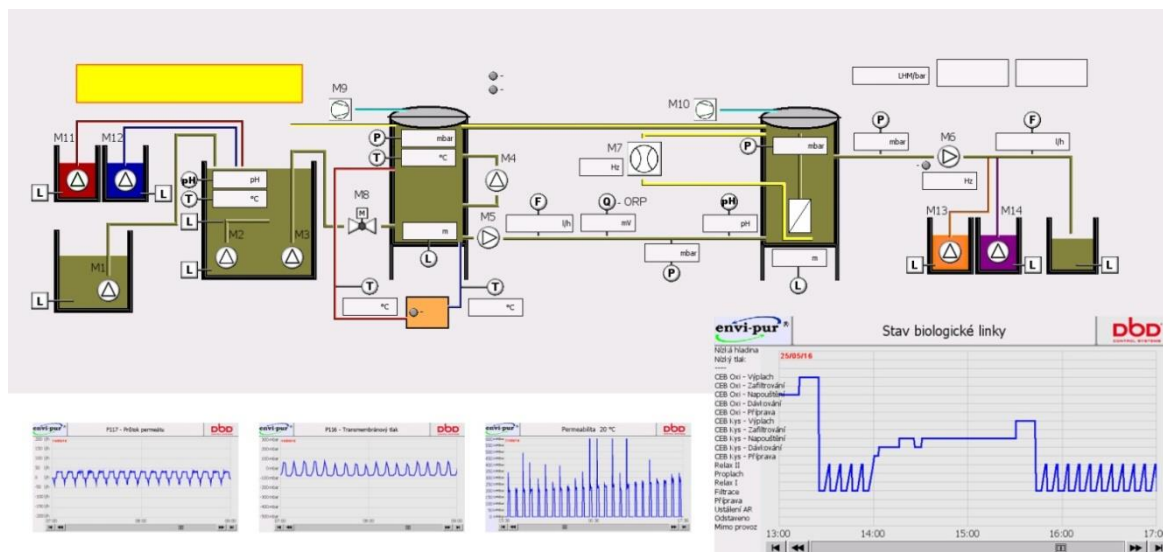
Systém je navržen a konstruován jako plynotěsně uzavřený. Vyprodukovaný (bio)plyn se hromadí v horním prostoru anaerobního reaktoru a membránové komory. Tyto nádrže jsou mezi sebou propojeny přepadovým potrubím s volnou hladinou. Přebytečný bioplyn je měřen plynoměrem a je ze systému odváděn přes tlakový ventil (nastaven na 0,4 bar). Odfuk je potrubím vyveden do bezpečné vzdálenosti mimo jednotku, kde je možné odebírat vzorky, případně bioplyn nadále využívat. Tlak v nádrži vyrovnávají vaky, do kterých je samostatnými dmychadýlky s nepřetržitým provozem vháněn vzduch (pojistný ventil nastaven na 500 Pa). Úniky bioplynu do okolí jsou kontrolovány a hlášeny signalizačním zařízením a při II. stupni automaticky dochází k odpojení jednotky. Z horního prostoru membránové komory je přes (dobudovanou) nádržku úkapů a instalovaný filtr nečistot pomocí dmyhadla přiváděn bioplyn pod membránové moduly (lze regulovat / škrtit pomocí kulových uzávěrů jednotlivých přívodních vedení za rozdělovacím objektem). Množství je sumárně měřeno pomocí plynoměru. Jemnobublinné aerační elementy dopomáhají snižovat míru zanášení membránových modulů a hydraulicky míchat obsah nádrže. Celý okruh byl dodatečně zateplen a opatřen kulovými uzávěry. Pojistný ventil membránové komory je nastaven na 250 Pa.



Obr. 18 Poloprovozní AnMBR - plynové hospodářství (foto autor)

#### 4.3.1.8 Měření a regulace

Poloprovozní model je ovládán řídicím systémem, plováky, tlakovými a hladinovými sondami, průtokoměry atd. Model je možné sledovat a řídit pomocí vzdáleného přenosu přes internet (SIM). Provoz modelu se kontroluje na displeji panelu řídicí jednotky, kde je uveden provozní stav (automatický nebo manuální režim). Model zahrnuje kontrolu provozních hodin jednotlivých strojů a zařízení, zda najednou nedošlo k výraznému zvýšení chodu nebo naopak. Řídicí systém je možné nastavovat také prostřednictvím připojeného PC. Tímto způsobem lze nastavit i některé speciální parametry, které jsou jinak nedostupné. Přenos dat do PC – flash disk / paměťová karta je nutné nahrát do PC a otevřít např. v EasyConverter.



Obr. 19 Poloprovozní AnMBR - řídicí systém; grafy průtoku permeátu, transmembránového tlaku, permeability a stavu biologické linky (úprava autor)

#### 4.3.2 Zkušební provoz poloprovozní jednotky

##### 4.3.2.1 Pokyny, doporučení a upozornění dodavatele

Poloprovozní model je navržen a umožňuje především čištění průmyslových OV. OV nesmí obsahovat žádné materiály, které mohou způsobovat blokáce membrán / potrubí a kolaps čistícího procesu či kontaminaci OV (škodlivé pro mikroorganismy v biologickém stupni). Při provozu modelu vznikají odpady (kal, shrabky), které je nutné odpovídajícím způsobem samostatně likvidovat. Předpokládaná časová náročnost obsluhy je po zapracování biologického stupně 2 hodiny denně.

Tab. 6 Intervaly kontrol obsluhy poloprovozního AnMBR dle dodavatele [100]

	Interval				Činnost název
	den	týden	měsíc	jiný	
1	x				kontrola hladin
2	x				kontrola chodů zařízení
3	x				likvidace shrabků
4	x				kontrola množství chemikálií v barelech
5	x				sledování měřených veličin (TMP, Q, T, ...)
6	x				kontrola kvality permeátu
7	x				vizuální kontrola vstupů a výstupů
8		x			sedimentační zkouška
9			x		měření koncentrace kalu
10			x		kontrola provozních hodin
11				dle potřeby	odtah přebytečného kalu
12				dle potřeby	odběr vzorků OV a bioplynu

##### 4.3.2.2 Příprava a zapracování

Jednotka byla po předání zástupci ENVI-PUR v hale výzkumného centra AdMaS převezena do areálu Pivovar Černá Hora a za pomoci jeřábu a součinnosti místních pracovníků umístěna na domluvené



a předem připravené venkovní místo ČOV (vnitřní temperované prostory kvůli velikosti jednotky nebyly možné).



Obr. 20 Poloprovozní AnMBR jednotka (foto autor)

#### Byly provedeny následující úkony:

- zapojení jednotky – přípojka elektřiny, uzemnění jednotky, umístění a připojení čerpadel / přítoku / odtahu bioplynu (výfuky bioplynu vyvedeny mimo poloprovozní model, do bezpečné vzdálenosti od okolních zařízení) / odtokového a odpadních potrubí (do místního žlabu ústího zpět do čerpací stanice na začátku ČOV);
- zavodnění a naplnění všech nádrží a tepelného okruhu pitnou vodou;
- kontrola tlaku v tepelném výměníku (požadovaný tlak 1,5 bar);
- nastavení ohřevu (mezofilní režim, 35°C);
- naplnění barelů chemikáliemi na požadovanou koncentraci a v dostatečném množství;
- ověření chodu všech zařízení v manuálním režimu;
- ověření správnosti MaR v manuálním režimu a potřebné kalibrace;

- nastavení a odzkoušení automatického provozu, vzdáleného připojení a kontrola algoritmů (jednotlivých stavů a poruchových hlášení);
- následné umístění membránových modulů do membránové komory, zkouška integrace membrán, nastavení parametrů filtrace a CEB, kalibrace permeability, ověření jednotlivých stavů na pitné vodě;
- zpracování kalu z místního IC reaktoru;
- provozní uzavření a zatěsnění vaků anaerobního reaktoru a membránové komory, tlakové zkoušky a kontrola pojistných ventilů;
- zahájení provozu...

Pilotní jednotka AnMBR byla zpracována pomocí kalu místního (ČOV Pivovar Černá Hora) IC reaktoru s konečnými hodnotami - sušina 1,1 %, ztráta žíháním 60 %. **V první fázi byla jednotka provozována jako SBR** – pro dosažení požadované koncentrace sušiny a také z důvodu dočasného výpadku membránové filtrace (výměna tlakového čidla, zatěsnění a drobné opravy/úpravy). Kal vykazoval velmi dobré sedimentační vlastnosti. Každý den (mimo víkendů) obsluha během služby přerušila automatický provoz jednotky - především odstavení dmychadla a čerpadel (podávacího, míchacího, recirkulačního a permeátu). Po 30 minutách až 1 hodině (dle aktuálních sedimentačních vlastností) bylo možné manuálně upustit odsazenou vodu z anaerobního reaktoru pomocí dobudované odbočky na potrubí míchání anaerobního reaktoru – minimální dosažitelná výška hladiny je 1,10 m, přičemž výška dna přepadového potrubí je 1,50 m. Při dostatku času je tento úkon možné před dopuštěním reaktoru OV z egalizace i několikrát opakovat a dosáhnout tak většího zahuštění kalu (zaleží na požadované hydraulické době zdržení).

Čištění OV je biologický proces závislý mimo jiné na množení mikroorganismů. Z tohoto důvodu je dosaženo požadované úrovně čištění až po určité době pravidelného provozování modelu s projektovaným zatížením. Doba od uvedení do provozu do dosažení plné účinnosti čištění trvá cca. 4 až 16 týdnů.

#### 4.3.2.3 Identifikace a odstraňování závad, úpravy a optimalizace

Během zkušebního provozu byly identifikovány a odstraněny drobné projekčně-výrobní nedostatky a provedena optimalizace jednotky po koncepčně-konstrukční stránce. Průběžně také docházelo k zásahům do řídicího systému a jeho možným úpravám (algoritmy, rozsahy, funkce apod.). **Podrobnější informace** jsou uvedeny v plné verzi dizertační práce.

Při provozu AnMBR modelu mohou vzniknout poruchy funkční nebo technologické. Poruchy funkční vedou zpravidla k okamžitému zastavení modelu, poruchy technologické vedou ke krátkodobému nebo dlouhodobému zhoršení účinnosti čištění. Technologické poruchy mohou být způsobeny zatížením modelu neodpovídajícím projektové dokumentaci (vysoké množství vod přiváděných do modelu, přivádění vod o složení neodpovídající průmyslovým odpadním vodám) nebo zanedbáním obsluhy a údržby. Technologické poruchy se mohou projevit neodpovídající koncentrací kalu, rychlým ucpáváním membránových modulů.

**Tab. 7 Souhrnný přehled závad a úprav poloprovozního AnMBR (autor)**

Umístění	Popis	Řešení / závěr
<b>Projekční / konstrukční / provozní a pravidelné závady, optimalizace / doplňky / zásahy / přestavby</b>		
Jednotka	Zamrzání přítoku, nádrží, částí jednotky...	-
Jednotka	Tlakové ztráty v systému	Identifikace závad, přetěsnění, zkouška plynotěsnosti
Mechanické předčištění	Održení přepadového paprsku a ostřík okolí	-
Mechanické předčištění	Nevhodný sklon spádového síta	-
Mechanické předčištění	Pravidelné zahlcení koše na shrabky	Dobudován přepad sběrného koše
Egalizační nádrž	Znečištění / pěnění	Úprava algoritmů řídicího systému
Podávací čerpadlo	Zpětné propouštění podávacího čerpadla před uzavřením elektroventilu	Doplnění zpětné klapky
Ohřev	Netěsnosti větve ohřevu	Oprava svárů, zateplení
Anaerobní reaktor	Špatná funkce pojistných ventilů	Výměna a kalibrace pojistných ventilů
Anaerobní reaktor	Umožnění provozu jednotky v režimu SBR	Dobudování odbočky na potrubí míchání anaerobního reaktoru
Anaerobní reaktor - membránová komora	Zatuhnutí, povlak na šoupatech spodních výpustí	Ošetření šoupat spodních výpustí
Anaerobní reaktor - membránová komora	Chybějící uzávěr propojovacího potrubí	Doplnění šoupete
Anaerobní reaktor - membránová komora	Tepelné ztráty na propojovacím potrubí	Tepelná izolace
Membránová komora	Nevhodné hadice permeátu, propojení, chybějící možnost vizuální kontroly stavu permeátu jednotlivých větví	Výměna hadic, spojů, přetěsnění, doplnění průhledítek na jednotlivých větvích permeátu
Membránová komora	Pokles výkonu aeračního systému membránových modulů	Provedeno čištění, kontrola
Membránová komora	Zanesení membránových modulů	Provedeno mechanické a chemické čištění, CEB...
Nádrž permeátu	Znečištění větve permeátu	Provedeno čištění, přetěsnění, doplnění poklopu nádrže permeátu a spodní výpusti
Plynové hospodářství	Problémy s kumulací kondenzátu	Dobudování uzávěrů na větvích bioplynu, sběrné nádržky kondenzátu, výpustného ventilu na rozdělovacím objektu, vyčištění filtru, vyčištění „utopeného“ dmychadla servisem, zateplení, výměna plynoměru...
Plynové hospodářství	Nedostatečný přetlak dmychadýlek plynových vaků	-
MaR	Vadné měření průtoku recirkulace	Kalibrace indukčního průtokoměru servisem
MaR	Špatný rozsah tlakových čidel	Výměna tlakového čidla, úprava rozsahu
MaR	Nevyhovující algoritmy, nastavení řídicího systému, chybějící funkce...	Provedena řada úprav řídicího systému
MaR	Absence zpětného chodu recirkulačního čerpadla	Doplnění

Vylepšení / návrh		
Jednotka	Zamrzání	Adekvátní izolace, temperování, ohřev, umístění, zvážení umístění v upraveném přepravním kontejneru...
Přítok	Zamrzání přítokového potrubí	Zateplení, vinutý topný kabel, vhodnější umístění, zkrácení délky hadice...
Mechanické předčištění	Nevhodný sklon spádového síta, tvar přelivné hrany, sběrný koš	Vhodné úpravy jednotlivých částí mechanického předčištění...
Mechanické předčištění	Zahlcení koše na shrabky	Doplnění plováku / webkamery
Egalizační nádrž	Zlepšení automatizace	Instalace elektrouzávěru na výpusti
Anaerobní reaktor	Zlepšení vizuální kontroly obsahu nádrže	Instalace průhledových oken (vertikálních)
Anaerobní reaktor - membránová komora	Špatná funkce plynových vaků	Výměna vaků za vhodnou pružnou blánu
Anaerobní reaktor - membránová komora	Zlepšení vizuální kontroly propojovacího potrubí a recirkulace	Průhledné přepadové potrubí (izolace), kontrolní mezikusy...
Anaerobní reaktor - membránová komora	Plynulá regulace recirkulace	Instalace frekvenčního měniče, výkonnějšího čerpadla...
Membránová komora	Automatizace regenerace in-situ	?
Membránová komora	Zlepšení vizuální kontroly permeátu	Výměna hadic permeátu za průhledné
Membránová komora	Zlepšení vizuální kontroly obsahu nádrže	Instalace osvětlení, ostřik okýnek (výměna záslepek za kulové uzávěry)
Plynové hospodářství	Absence měření přívodu bioplynu pod jednotlivé membránové moduly, škrčení přívodu „od oka“	Doplnění rotametrů na jednotlivé přívodní větve bioplynu k membránovým modulům
Plynové hospodářství	Degradace a odstavení plynoměrů v krátkém čase	Výměna za vhodnější typ
Plynové hospodářství	Zlepšení vizuální kontroly větve bioplynu - kondenzátu, vniku obsahů nádrží...	Instalace průhledného mezikusu na větvích bioplynu, průhledného uzávěru filtru...
Plynové hospodářství	Hospodaření s vyprodukovaným bioplynem	Jímání bioplynu, vzorkování...
MaR	Absence vzdáleného přenosu archivu (provozního deníku)	Doplnit
MaR	Absence uživatelského škálování grafů	Doplnit
MaR	Pracná kalibrace TMP	Automatizace kalibrace TMP / permeability
MaR	Online měření konduktivity, CHSK, NL...	Instalace příslušných sond...
MaR	Online vizuální sledování jednotky, především přítoku (sběrného koše shrabků)	Instalace webkamery
MaR	Výběr odběrných míst	Přesné definování vhodných odběrných míst

Následuje řada fotografií ilustrujících vybrané závady a úpravy.



Obr. 21 Zamrzání poloprovzního AnMBR (foto autor)



Obr. 22 Poloprovzní AnMBR - nevhodný tvar přelivné hrany a velký sklon spádového síta (foto autor)



Obr. 23 Poloprovzní AnMBR - zahlcení sběrného koše mechanického předčištění a dobudování přepadu na shrabky (foto autor)



Obr. 24 Poloprovozní AnMBR - znečišťování egalizační nádrže a pění obsahu (foto autor)



Obr. 25 Poloprovozní AnMBR - úpravy propojovacího potrubí mezi membránovou komorou a anaerobním reaktorem - uzávěr a tepelná izolace (foto autor)



Obr. 26 Poloprovozní AnMBR - dodatečně osazená průhledítka na jednotlivých větvích permeátu (foto autor)



Obr. 27 Poloprovozní AnMBR - kontrola aeračního systému membránových modulů (foto autor)



Obr. 28 Poloprovozní AnMBR - znečištění nádrže permeátu (foto autor)



Obr. 29 Poloprovozní AnMBR - rozdělovací objekt větve bioplynu s dodatečnou výpustí kondenzátu, čištění dmyhadla bioplynu (foto autor)



Obr. 30 Poloprovozní AnMBR - čištění a přetěsnění filtru dmychadla bioplynu (foto autor)

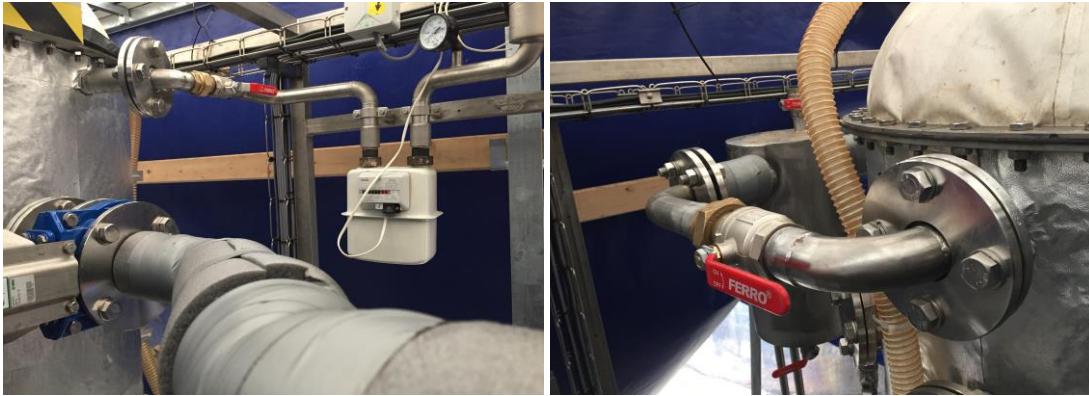


Obr. 31 Poloprovozní AnMBR - nádržka kondenzátu, vnik kalu do větve bioplynu (foto autor)

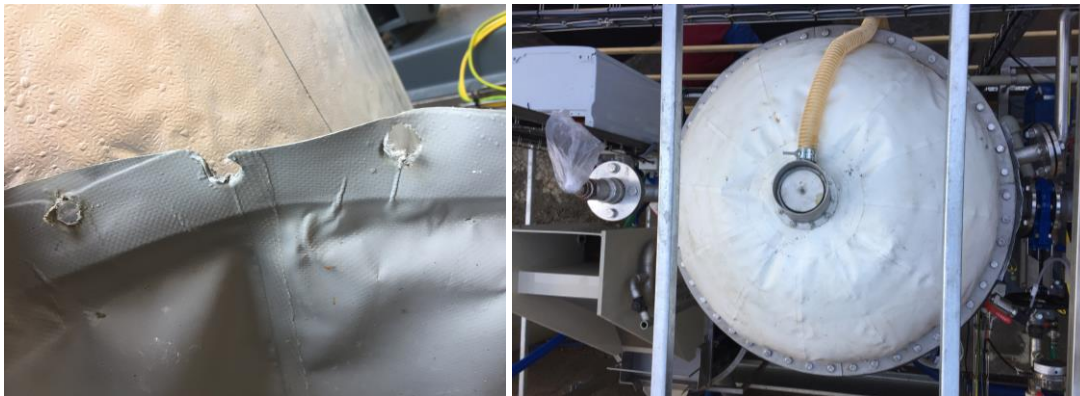


Obr. 32 Poloprovozní AnMBR - zateplení větve bioplynu a kontrola úniků IR kamerou (foto autor)





Obr. 33 Poloprovodní AnMBR - dodatečné osazení kulových uzávěrů na větvích bioplynu (foto autor)



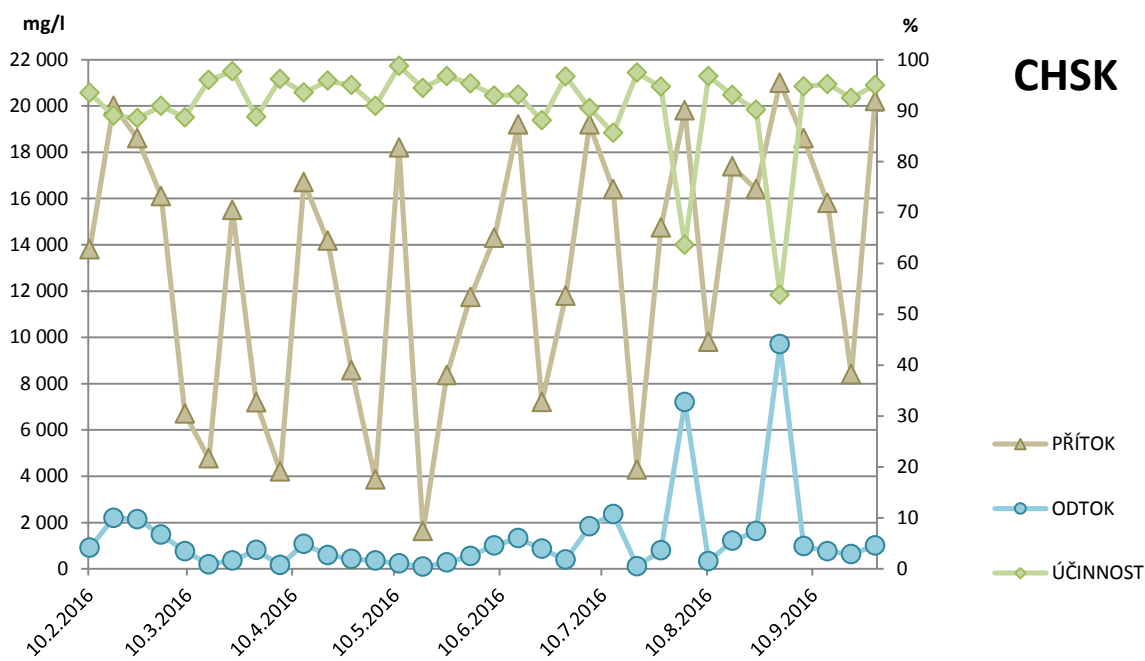
Obr. 34 Poloprovodní AnMBR - identifikace úniků, zkouška plynotěsnosti (foto autor)

#### 4.3.2.4 Zkušební provoz

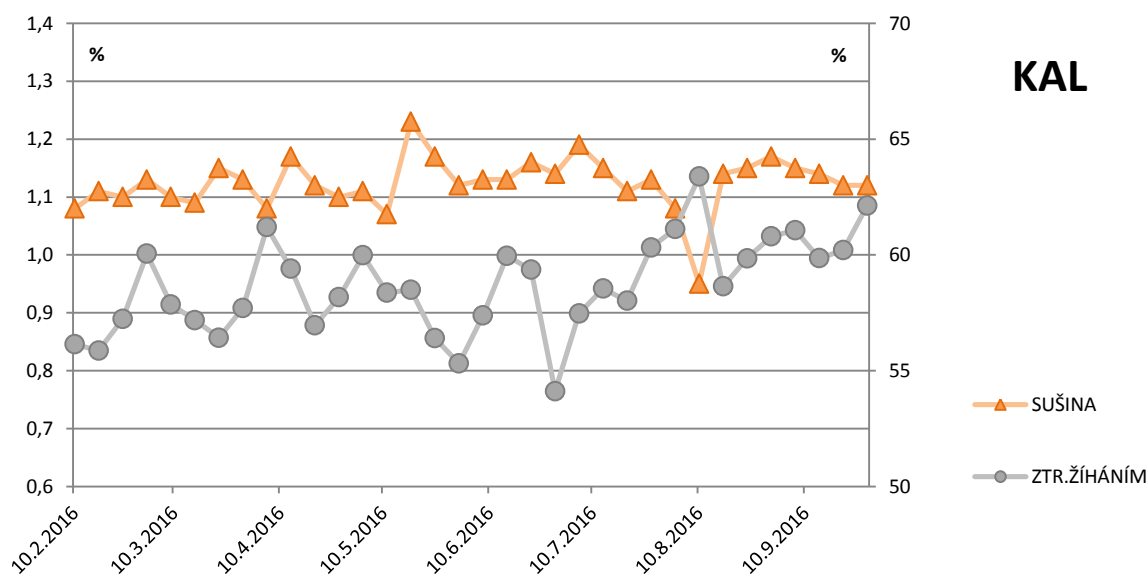
Během provozu byla měřena řada provozních hodnot - teploty (přípravná nádrž, anaerobní reaktor), pH (přípravná nádrž, recirkulační potrubí), ORP, hladiny (nádrže), průtoky (flux, recirkulace, bioplyn), tlaky (TMP, nádrže), spotřeba elektrické energie (celková, motohodiny), spotřeba chemikálií aj. Pro vyhodnocení funkčnosti systému a účinnosti čištění byly odebírány (bodové) vzorky přítoku / odtoku, kalu. Pro určení degradace membrán byly provedeny SEM snímky povrchu a řezu membránou.

Níže jsou uvedeny dva grafy – výsledky rozborů CHSK (přítok, odtok, účinnost odstranění) a kalu (sušina a ztráta žiháním) v období 10. 2. 2016 – 10. 9. 2016. Přestože byla pilotní jednotka AnMBR v testovací lokalitě ČOV Pivovar Černá Hora umístěna a provozována déle než rok (5/2015 – 11/2016), nepodařilo se získat ucelenější a podrobnější soubor dat – způsobeno několika (i dlouhodobějšími) výpadky systému, kdy nebylo možné / vhodné řádně jednotku provozovat a analyzovat u odebíraných vzorků více parametrů. Jednalo se např. o dlouhodobější výpadky elektriny, netěsnosti systému, vadné měření tlaků (špatný senzor), a tím nesprávné automatické ovládání jednotky, zamrzání částí jednotky (odstavení), komplexní opravu dmychadla (úplné odstavení provozu a nové zapracování jednotky), čištění a regenerace apod. Grafy nicméně přesto znázorňují poměrně vyrovnané hodnoty. Patrný pokles sušiny kalu na přelomu měsíce června a července je dán již zmíněným kolapsem a novým zapracováním pilotního AnMBR z důvodu

výpadku („utopení“) dmychadla. Dvě výrazné odchylky v grafu stanovení CHSK jsou také zapříčiněny výraznějšími zásahy do provozu jednotky – čištění a regenerace membránových modulů a utěšňování / tlakové zkoušky systému.



Obr. 35 Poloprovozní AnMBR - vybrané rozbory - CHSK (autor)



Obr. 36 Poloprovozní AnMBR - vybrané rozbory - kal (autor)

Zkušební provoz vykazoval účinnost odstranění CHSK > 90% (velmi nerovnoměrný přítok 2-21 000 mg.l<sup>-1</sup> CHSK. V druhé fázi bylo provedeno celkové čištění systému a především realizována hloubková regenerace membránových modulů pomocí chemických lázní NaClO / NaOH a kyseliny citronové. Následně byly dle získaných zkušeností a dostupných podkladů nastaveny a odzkoušeny reálnější - dlouhodobě udržitelné a konkurenceschopné - provozní parametry. Především byly navýšeny hodnoty filtrační rychlosti (8 l.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup>), upraveny délky jednotlivých cyklů (filtrace / relax / zpětný proplach). Dodavatelem a výrobcem membránových modulů doporučené nastavení CEB se osvědčilo a nebylo zapotřebí upravovat.

### Čištění a regenerace

Chemická regenerace filtračních modulů se provádí v závislosti na měřené propustnosti (nárůst TMP, snížená permeabilita). K tomuto se přistupuje, pokud prevence ucpávání a pravidelné CEB jsou nedostatečné. Během regenerace bývají moduly ponořeny do chemického čistícího roztoku. Regenerace byla prováděna přímo v membránové komoře a/nebo v přepravních kontejnerech. Je nutné, aby ji prováděla pouze zaškolená obsluha, protože by při nevhodné manipulaci nebo užití chemikálií mohlo dojít k nevratnému poškození membránových modulů.

Postup čištění v membránové komoře je dle pokynů dodavatele (výrobce [101]) následující:

- Proces filtrace musí být kontrolovaně zastaven pomocí řídicí jednotky.
- Všechna zařízení, která by narušovala chod regenerace, musí být odstavena.
- Aktivovaný kal musí být vyčerpán z membránové komory do anaerobního reaktoru, případně do připraveného barelu. Déle je také možné aktivovaný kal zahustit a uskladnit tímto způsobem.
- Membránová komora je poté naplněna čistou vodou.
- Aby byl odstraněn zbytkový kal, jsou moduly v čisté vodě provzdušňovány po dobu 30 minut.
- Následně se směs voda/kal vypustí spodní výpustí.
- Membránová komora se znovu naplní čistou vodou. Moduly musí být kompletně zatopeny vodou (+10 cm).
- Nalije se do nádrže chlornan sodný (NaClO) tak, aby výsledná koncentrace chloru byla 500-1 000 mg.l<sup>-1</sup> (500-1 000 ppm), nebo dle bližšího požadavku technologa.
- Na několik vteřin spustíme dmychadlo, aby se směs promíchala. Zkontroluje se pH, které by mělo být v rozmezí 10,0-10,5 (lze upravit přidávkem NaOH).
- Modul je ponechán v tomto roztoku několik hodin (maximálně 12 hodin)! V průběhu máčení modulů spustíme na 10 s čerpadlo permeátu při nízkém průtoku, aby došlo k vyplnění všech pórů čistícím roztokem.
- Po skončení intervalu namáčení modulů upravíme pH na neutrální hodnotu a spodní výpustí vyprázdníme nádrž. Naplníme membránovou komoru znovu čistou vodou a na několik vteřin zapneme dmychadlo provzdušnění pod moduly, aby došlo k vymytí chemikálií.
- Znovu spodní výpustí vyprázdníme membránovou komoru.
- Membránovou komoru znovu naplníme čistou vodou. Nyní může být provedeno čištění pomocí kyseliny citronové. Nасыпeme do nádrže takové množství kyseliny citronové, aby vznikl roztok

0,5% (případně předem připravíme koncentrát). Na několik vteřin zapneme dmychadlo, aby se roztok dobře promíchal.

- Moduly se nechají v tomto roztoku namáčet cca 2 hodiny.
- Upravíme pH na neutrální hodnotu a vyprázdníme membránovou komoru. Moduly opláchneme čistou vodou a znovu vypustíme obsah membránové komory.
- Napustíme do membránové komory čistou vodu nebo aktivovaný kal (aby koncentrace kalu před filtrací byla na předchozí /požadované hodnotě). Zapneme všechna zařízení do automatického režimu. Zkontrolujeme TMP, a zda není potrubí nebo čerpadlo permeátu zavzdušněno.



**Obr. 37** Poloprovozní AnMBR - regenerace membránových modulů, mechanické i chemické čištění (foto autor)

V případě regenerace membránových modulů mimo membránovou komoru postupujeme obdobně. Vyjmutí membránových modulů z komory komplikuje poměrně složitý způsob upevnění plynových vaků, resp. zatěsnění horní části nádrže. Výhodou tohoto způsobu je důkladná optická kontrola vnitřku nádrže a membránových modulů, přetěsnění / dotažení jednotlivých spojů, možnost mechanického čištění (ostřík proudem vody, otření povrchu), individuální péče jednotlivým modulům a při dostatečné zručnosti / rychlosti také odpadá nutnost obsah membránové komory přečerpávat. Naopak nevýhodou je absence provzdušnění a komplikovanější zavodnění / napuštění membrán chemikáliemi.

V ideálním případě z vlastní zkušenosti doporučuji pro dosažení lepších výsledků (počátečních hodnot TMP) tyto dva způsoby kombinovat.

### 4.3.3 Závěry a doporučení zkušebního provozu

Vzhledem k četnosti oprav / úprav a nutnosti čištění / regenerace (tímto způsobem komplikacím / odstávkám / prodlevám), resp. příliš dlouho trvajícím samotnému zkušebnímu provozu, nebylo možné během testovacího období dosáhnout optimalizace čistícího procesu (účinnosti odbourávání požadovaných látek, dosažení minimálních koncentrací na odtoku...).

Nicméně bylo dosaženo zprovoznění a optimalizace AnMBR jednotky po stránce konstrukční a z hlediska řízení, ověření technologie a nastavení dlouhodobě udržitelných provozních parametrů.

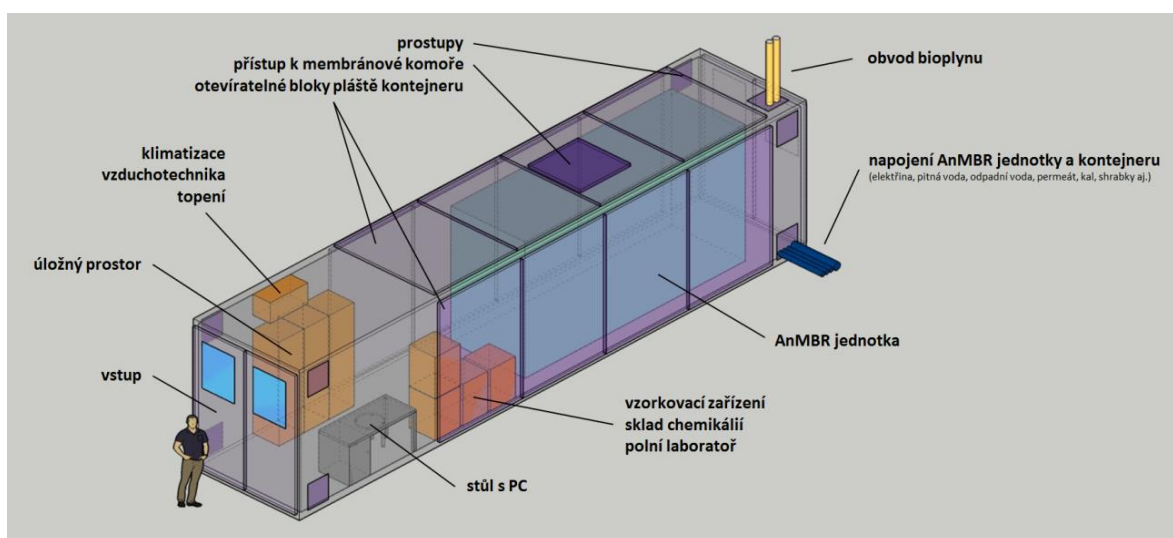
**Výčet hlavních poznatků a doporučení** pro budoucí provoz pilotní jednotky a výzkum:

- Problematický provoz jednotky v **zimních měsících**. Ideálním řešením by byla instalace jednotky do vhodně upraveného přepravního kontejneru odolnému vůči povětrnostním vlivům (viz níže). Problémem však nadále zůstane zabezpečení nezámrznosti přívodního potrubí surové OV. V letních měsících naopak může docházet k přehřívání.

**Tab. 8** Rozměry poloprovozní jednotky a vybraných kontejnerů [102][103]

AnMBR jednotka (kovový rám)	Délka	Šířka	Výška	Objem	Hmotnost
	mm	mm	mm	m <sup>3</sup>	kg
	5 300	1 700	2 628	23,68	1 280

Typ kontejneru		Vnější			Vnitřní			Hmotnost	Objem
		délka mm	šířka mm	výška mm	délka mm	šířka mm	výška mm	minimální kg	vypočtený m <sup>3</sup>
Přepravní	20' DV	6 058	2 438	2 591	5 898	2 350	2 390	2 050	33,13
	20' HC	6 058	2 438	2 896	5 898	2 350	2 680	2 350	37,15
	40' DV	12 192	2 438	2 591	12 032	2 350	2 390	3 700	67,58
	40' HC	12 192	2 438	2 896	12 032	2 350	2 680	3 850	75,78



**Obr. 38** Schématický návrh 40'HC kontejneru pro umístění poloprovozní jednotky AnMBR (autor)

Rozměry jednotky jsou 5 300 x 1 700 x 2 628 mm (D x Š x V), hmotnost cca 1 300 kg (rám cca 380 kg, zařízení + potrubí cca 900 kg; viz [102]). Limitujícím rozměrem je výška jednotky / rámu - nelze použít standardní přepravní kontejner. Minimální velikost vyhovujícího přepravního kontejneru je 20' ve zvýšeném provedení HC. Kontejner by měl být vybaven: prostupy (voda, odpad, plyn, elektro atd.), odtokovým žlábkem / vpustí,

vzduchotechnikou / klimatizací / topením, vhodným osvětlením / okny, pracovními přístupy - dveře (rozvaděč), střecha a stěna (usazení jednotky), střešní otvory (nádrže - především regenerace). Při volbě většího kontejneru (40'HC) by bylo vhodné do vnitřních prostor umístit také zásobní nádrže na chemikálie, regenerační nádrže, polní laboratoř (rozbory, kalibrace apod.), stůl s počítačem (archivace dat, provozní deník aj.) aj.

- Nedostatečná **funkčnost plynového hospodářství** - dmychadýlka plynových vaků anaerobního reaktoru a membránové komory nejsou schopna vyvodit dostatečný přetlak, plynoměr na výstupu neukazuje reálné hodnoty, je nutné dořešit způsob odběru vzorků bioplynu a samotnou koncovku, zajistit dostatečnou plynotěsnost a odvod kondenzátu. Bylo by vhodné doplnit na jednotlivé větve bioplynu rotametry.
- **MaR** - bylo by vhodné dořešit uživatelské škálování grafů a vzdálený přenos naměřených dat (archivu), automatickou kalibraci TMP, pro komfort obsluhy umístit webkameru na přítoku / u koše shrabků (nárazově docházelo k ucpání sběrného koše, přepadu velké části surové vody mimo přípravnou nádrž, a tím pádem k příliš dlouhému chodu čerpadla surové vody).
- **Regenerace membránových modulů** - při provádění regenerace nastávají dvě hlavní komplikace: a) dočasné vhodné uložení cenného obsahu membránové komory, b) odpojení a vyjmutí membránových modulů z membránové komory. Membránovou komoru je nyní (po úpravách) možné zcela odpojit a částečně obsah přečerpát do anaerobního reaktoru. K tomuto účelu slouží šoupě na propojovacím potrubí mezi membránovou komorou a anaerobním reaktorem, kulový uzávěr na větvi bioplynu, zpětný chod recirkulačního čerpadla.  
Ad a): Dle provozního manuálu je pracovní objem membránové komory 0,71 m<sup>3</sup>, skutečný objem směsi je dán aktuálním způsobem provozování / aktuálním stavem. Veškerý objem filtrátu (směsi OV a kalu) není možné bez předchozí přípravy (často časově náročné) uchovat. Nabízí se několik zjevných možností: koncentrování směsi pomocí filtrace a následné přečerpání - velmi omezené při nutnosti regenerace, resp. zanesení membránových modulů; koncentrování směsi pomocí SBR provozu a následné přečerpání - omezeno malým pracovním objemem anaerobního reaktoru; přečerpání směsi z membránové komory do anaerobního reaktoru - omezeno malým pracovním / zásobním objemem; částečné přepuštění (manuálně přes odběrná místa) směsi do egalizační nádrže - kontakt se vzduchem (!) a pokles teploty (není vyhřívána); přepuštění do přistavené nádrže / přepravních kontejnerů membránových modulů - pokles teploty (!) a komplikace s následným přečerpáním zpět (dodatečné čerpadlo). Vzhledem k dlouhotrvajícímu nárůstu potřebných mikroorganismů a adaptaci (může být i delší než interval mezi regeneracemi!) není vypuštění směsi a nové naočkování dostupným anaerobním kalem variantou!  
Ad b): V případě regenerace in-situ není zapotřebí membránovou komoru otevírat, tím se ale vzdáváme možnosti vizuální kontroly (napojení, komory, membrán) a mechanického způsobu čištění. Na druhou stranu se vyhneme potížím s následným opětovným utěsněním (plynových vaků, napojení). Vyjmutí membránových modulů je poměrně obtížné kvůli systému plynových vaků (šrouby, těsnění) a umístění jednotky na vozíku (je zapotřebí částečně odplachtovat a rozebrat).

- **Spoje a potrubí / hadice** - je zapotřebí pravidelně kontrolovat a přetěšňovat, dochází k rychlému povolování / uvolňování / degradaci. Potíže je možné pozorovat jako úniky / úkapy / pokles tlaku aj.
- **Odběrná místa** - pokud není vzorkovací místo pevně určeno, pozor na vhodnou volbu. Odebírání vzorků přítoku je vzhledem k nastavení systému, resp. blokovému doplňování egalizační nádrže a anaerobního reaktoru problematické. Bodové vzorky mohou být vzhledem k výrazné proměnlivosti přítoku také matoucí. Je důležité se seznámit s výrobním procesem podniku (resp. produkcí OV v čase, množstvím i složením), pečlivě volit odběrná místa a neměnit je, provádět dlouhodobá pravidelná pozorování a dosáhnout co nejkontinuálnějšího plnění egalizační nádrže a anaerobního reaktoru.

## 5. SHRUTÍ A PŘÍNOSY DIZERTAČNÍ PRÁCE

### 5.1 Obecné shrnutí

Cíle dizertační práce „Anaerobní membránový bioreaktor (AnMBR) pro čištění odpadních vod potravinářského průmyslu“ byly splněny a základní předpoklady potvrzeny.

Anaerobní membránové bioreaktory mohou obecně velmi účinně čistit odpadní vody různých koncentrací a složení a produkovat upravenou vodu vynikající kvality, kterou lze nadále využívat. Mohou současně podpořit energetickou soběstačnost díky produkci bioplynu využitelného v rámci ČOV / výrobního podniku. Hlavní negativa spočívají v ucpávání membrán (výraznější a komplikovanější než u aerobních MBR) a obecně vyšších nákladech (záleží na mnoha faktorech, je zapotřebí provést konkrétní posouzení). Filtrační rychlost (flux) / permeabilita (propustnost membrány) a hydraulická doba zdržení jsou klíčovými parametry nejen z ekonomického hlediska (mají výrazný vliv na investiční i provozní náklady). Zapracování anaerobního bioreaktoru je oproti aerobnímu protějšku obecně zdouhavější, nicméně AnMBR oproti konvenčním anaerobním technologiím poskytují stabilnější provoz relativně bez ohledu na kvalitu kalu. Navíc i díky kompletnímu zadržení kalu v systému vycházejícího z povahy membránové filtrace lze kal bioreaktoru řízeně adaptovat na velmi specifické podmínky nacházející se v průmyslu.

### 5.2 Přínosy pro vědní obor a praxi

Ještě donedávna nebyly v České republice s touto technologií anaerobního čištění odpadních vod v tomto rozsahu žádné zkušenosti. V rámci doktorského studia a souvisejících výzkumných aktivit bylo dosaženo následujících nových poznatků pro vědní obor a přínosů pro praxi:

- vytipování a laboratorní ověření komerčně nabízených ponorných membránových modulů za nestandardního užití v anaerobních podmínkách;
- navržení, konstrukce a odzkoušení laboratorní testovací jednotky AnMBR;
- navržení a odzkoušení poloprovozní jednotky AnMBR (konstrukce ENVI-PUR, s.r.o.) v reálných podmínkách – na OV z potravinářského průmyslu, resp. konkrétně na OV z pivovaru a přidružených objektů ČOV Pivovar Černá Hora;
- nastavení počátečních a zjištění doporučených hodnot vybraných provozních parametrů poloprovozní jednotky a ověření samotné technologie na základě více než ročního zkušebního provozu a analýzy vzorků;
- identifikace problémových míst a stavů, provedení drobných stavebních úprav pilotního AnMBR a optimalizace MaR;
- ověření postupu čištění a regenerace membránových modulů;

Dizertační práce a navržené / vyrobené / odzkoušené jednotky (laboratorní a poloprovozní) mohou být podkladem pro vědecké pracovníky, projektanty a konstruktéry, provozovatele i investory.



### 5.3 Doporučení dalších směrů/zaměření výzkumu, akademické práce

V kapitole „Závěry a doporučení zkušebního provozu“ jsou podrobněji uvedeny stěžejní poznatky a doporučení pro další provoz, využití a úpravy samotné poloprovozní AnMBR jednotky.

Pilotní jednotka se prokázala jako provozuschopná, vhodná (především) pro čištění průmyslových OV v mezofilním režimu a má vysoký potenciál využitelnosti ať už pro další obecné výzkumné projekty a experimenty, tak i pro specifičtější záměry.

Jako konkrétnější příklady možných směrů výzkumu bych uvedl např.:

- optimalizace čistícího procesu (úprava nátoky – pH / teplota / zdržení..., hydraulická a látková doba zdržení, teplotní režim reaktoru – mezofilní / termofilní / psychofilní, adaptace biomasy aj.) s ohledem na odtokové parametry, účinnosti čištění, odbourávání specifických látek, využitelnost permeátu atd.;
- nalezení optimální strategie provozu jednotky s ohledem na energetickou náročnost, spotřebu chemikálií, životnost membránových modulů (způsoby a četnost čištění a regenerace) apod.;
- optimalizace provozu jednotky s ohledem na produkci bioplynu - množství, složení, konkrétní využitelnost atd.;
- porovnání různých membránových modulů – typů, materiálů, konkrétních výrobků apod.;
- porovnání různých teplotních režimů provozu reaktoru;
- porovnání potenciálu technologie na různých typech odpadních vod – technicko-ekonomické zhodnocení investičních (komplexnost požadované technologie, objemová náročnost aj.) a provozních nákladů (chemikálie, energie, životnost membrán, odbornost obsluhy aj.), přínosů vedlejších produktů (permeát, bioplyn, kal);
- úpravy jednotky s ohledem na lepší mobilnost / využitelnost (např. návrh kontejneru) a snazší provoz (např. lepší automatizace a vzdálený přístup);
- rozšíření o další možné způsoby hygienického zabezpečení permeátu a na základě nebezpečí ohrožení zdraví provedení rizikové analýzy systému využití permeátu ve vybraných odvětvích / provozech;
- vývoj a zdokonalování metodiky návrhu systému.

S rostoucí cenou vodného a stočného, s ohledem na nakládání s kaly / odpadem a na současný trvalý trend snahy snižování nákladů ve výrobních podnicích v podobě hledání alternativních zdrojů vody a energie, s vývojem membránových technologií ... lze předpokládat zlepšení podmínek pro další výzkum a vývoj v této oblasti čištění (průmyslových) odpadních vod a potenciál technologie.

## POUŽITÁ LITERATURA / ZDROJE

- [1] *Průmyslové odpadní vody* [online]. Ústav procesní a zpracovatelské techniky FS ČVUT [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: <http://www1.fs.cvut.cz/cz/u218/pedagog/predmety/5rocnik/tov/STUDMAT/PDF/prumodpv.pdf>
- [2] *Výroba potravin v České republice* [online]. Ministerstvo zemědělství [cit. 2016-10-11]. Dostupné z: <http://eagri.cz/public/web/mze/potravinovy/?fullArticle=1>
- [3] *Vítejte na Zemi... multimediální ročenka životního prostředí: Potravinářský průmysl* [online]. [cit. 2016-10-11]. Dostupné z: [http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=potravinarsky\\_prumysl&site=spotreba](http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=potravinarsky_prumysl&site=spotreba)
- [4] *Vítejte na Zemi... multimediální ročenka životního prostředí: Potravinářský průmysl* [online]. [cit. 2016-10-11]. Dostupné z: [http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=potravinarsky\\_prumysl\\_env&site=spotreba](http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=potravinarsky_prumysl_env&site=spotreba)
- [5] *Český svaz pivovarů a sladoven* [online]. Dostupné z: <http://ceske-pivo.cz>
- [6] *Panorama zpracovatelského průmyslu a souvisejících služeb ČR 2016*. Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2006. ISBN 978-80-906942-1-7. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/cz/prumysl/zpracovatelsky-prumysl/panorama-zpracovatelskeho-prumyslu/2017/10/Panorama-2016-CZ.pdf>
- [7] VAN HAANDEL, A. C. a J. G. M. VAN DER LUBBE. *Handbook of Biological Wastewater Treatment: Design and Optimization of Activated Sludge Systems*. Second Edition. London: IWA Publishing, 2012, 770 s. ISBN 9781780400006.
- [8] GRADY, C. P. Leslie. *Biological wastewater treatment*. Third Edition. Boca Raton, FL: IWA Publishing / CRC Press, 2011, 1022 s. ISBN 9780849396793.
- [9] MALÝ, Josef a Petr HLAVÍNEK. *Čištění průmyslových odpadních vod*. Brno: NOEL 2000, 1996. ISBN 80-86020-05-3.
- [10] HLAVÍNEK, Petr, Jan MIČÍN a Petr PRAX. *Stokování a čištění odpadních vod*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 80-214-2535-0.
- [11] LIN, Hongjun, Wei PENG, Meijia ZHANG, Jianrong CHEN, Huachang HONG a Ye ZHANG. A review on anaerobic membrane bioreactors: Applications, membrane fouling and future perspectives. *Desalination*. 2013, 314, 169-188. DOI: 10.1016/j.desal.2013.01.019. ISSN 00119164. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0011916413000386>
- [12] PALATÝ, Zdeněk. *Membránové procesy*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2012, 296 s. ISBN 978-80-7080-808-5.
- [13] MIKULÁŠEK, Petr. *Tlakové membránové procesy*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2013, 254 s. ISBN 978-80-7080-862-7.
- [14] JUDD, Simon. *The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment*. Second edition. UK: Butterworth-Heinemann Elsevier / IWA Publishing, 2011, 519 s. ISBN 978-1-84-339518-8.
- [15] *Membrane Operation* [online]. [cit. 2016-02-07]. Dostupné z: [http://www.separationprocesses.com/Membrane/MT\\_Chp05i.htm](http://www.separationprocesses.com/Membrane/MT_Chp05i.htm)
- [16] POLÁŠEK, Daniel. *Čištění odpadních vod se separací kalu membránovým modulem*. Brno, 2009. 81 s. Bakalářská práce. FAST VUT v Brně.
- [17] POLÁŠEK, Daniel. *Intenzifikace ČOV technologií MBR*. Brno, 2011. Diplomová práce. VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí práce Prof. Ing. Petr Hlavínek, CSc., MBA.
- [18] DIEZ, V., D. EZQUERRA, J.L. CABEZAS, A. GARCÍA a C. RAMOS. A modified method for evaluation of critical flux, fouling rate and in situ determination of resistance and compressibility in MBR under different fouling conditions. *Journal of Membrane Science*. 2014, 453, 1-11. DOI: 10.1016/j.memsci.2013.10.055. ISSN 03767388. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0376738813008673>
- [19] FOX, R.A. a D.C. STUCKEY. The effect of sparging rate on transmembrane pressure and critical flux in an AnMBR. *Journal of Environmental Management*. 2015, 151, 280-285. DOI: 10.1016/j.jenvman.2014.08.011. ISSN 03014797. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479714004149>

- [20] ROBLES, A., M.V. RUANO, F. GARCÍA-USACH a J. FERRER. Sub-critical filtration conditions of commercial hollow-fibre membranes in a submerged anaerobic MBR (HF-SAnMBR) system: The effect of gas sparging intensity. *Bioresource Technology*. 2012, 114, 247-254. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.03.085. ISSN 09608524. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852412005494>
- [21] KUBOTA Anaerobic MBR: Recovery of clean energy from organic waste - Brochure [katalog]. 2013.
- [22] *Biothane Anaerobic Technology Memthane 2.0* [online]. [cit. 2017-09-06]. Dostupné z: [http://technomaps.veoliawatertechnologies.com/processes/lib/pdfs/productbrochures/biothane/3272-150617\\_VWT\\_NL\\_European\\_Memthane\\_bro.pdf](http://technomaps.veoliawatertechnologies.com/processes/lib/pdfs/productbrochures/biothane/3272-150617_VWT_NL_European_Memthane_bro.pdf)
- [23] *GE Power & Water Anaerobic Membrane Bioreactor (AnMBR) For High Strength Industrial Wastewater: Fact Sheet* [online]. [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: <https://www.biogasworld.com/wp-content/uploads/2017/03/GE-Anaerobic-Membrane-Bioreactor-AnMBR.pdf>
- [24] SIMATE, Geoffrey S., John CLUETT, Sunny E. IYUKE, Evans T. MUSAPATIKA, Sehliselo NDLOVU, Lubinda F. WALUBITA a Alex E. ALVAREZ. The treatment of brewery wastewater for reuse: State of the art. *Desalination*. 2011, 273 (2-3), 235-247. DOI: 10.1016/j.desal.2011.02.035. ISSN 00119164. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0011916411001615>
- [25] GALIB, Mohamed, Elsayed ELBESHISHY, Robertson REID, Abid HUSSAIN a Hyung-Sool LEE. Energy-positive food wastewater treatment using an anaerobic membrane bioreactor (AnMBR). *Journal of Environmental Management*. 2016, 182, 477-485. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.07.098. ISSN 03014797. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479716305357>
- [26] LIAO, Bao-Qiang, Jeremy T. KRAEMER a David M. BAGLEY. Anaerobic Membrane Bioreactors: Applications and Research Directions. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2006, 36(6), 489-530. DOI: 10.1080/10643380600678146. ISSN 1064-3389. Dostupné také z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10643380600678146>
- [27] BUONOMENNA, M.G. a J. BAE. Membrane processes and renewable energies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015, 43, 1343-1398. DOI: 10.1016/j.rser.2014.11.091. ISSN 13640321. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032114010387>
- [28] KHAN, M.A., H.H. NGO, W.S. GUO, et al. Comparing the value of bioproducts from different stages of anaerobic membrane bioreactors. *Bioresource Technology*. 2016, 214, 816-825. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.05.013. ISSN 09608524. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852416306538>
- [29] SKOUTERIS, George, Daphne HERMOSILLA, Patricio LÓPEZ, Carlos NEGRO a Ángeles BLANCO. Anaerobic membrane bioreactors for wastewater treatment: A review. *Chemical Engineering Journal*. 2012, 198-199, 138-148. DOI: 10.1016/j.cej.2012.05.070. ISSN 13858947. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1385894712006420>
- [30] POLÁŠEK, D.; HLAVÍNEK, P.; ADAMEC, T.; POLÁŠEK, J.; MARŠÍK, M. *Výzkumná zpráva - Anaerobní membránový bioreaktor (AnMBR) pro čištění odpadních vod potravinářského průmyslu - Zkušební provoz pilotní jednotky AnMBR v Pivovaru Černá Hora*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, Centrum AdMaS, 2017. s. 1-52.
- [31] *Česká bioplynová asociace: Co je bioplyn?* [online]. [cit. 2016-11-10]. Dostupné z: <http://www.czba.cz/bioplyn/>
- [32] DOHÁNYOS, Michal: *Anaerobní reaktor není černou skříňkou - teoretické základy anaerobní fermentace*. Biom.cz [online]. 2008-11-17 [cit. 2016-11-10]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/anaerobni-reaktor-neni-cernou-skrinkou-teoreticke-zaklady-anaerobni-fermentace>. ISSN: 1801-2655.
- [33] *Bioprofit: Anaerobní technologie* [online]. [cit. 2016-11-10]. Dostupné z: [http://www.bioplyn.cz/at\\_popis.htm](http://www.bioplyn.cz/at_popis.htm)
- [34] *Schaumann: Biochemie výroby bioplynu* [online]. [cit. 2016-11-10]. Dostupné z: <http://bioplyn.schaumann.cz/vyroba/>
- [35] *Enviton: Technologie bioplynových stanic* [online]. [cit. 2016-11-10]. Dostupné z: <http://www.bioplynvestanice.cz/technologie-bps/>

- [36] BUONOMENNA, M.G. a J. BAE. Membrane processes and renewable energies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015, 43, 1343-1398. DOI: 10.1016/j.rser.2014.11.091. ISSN 13640321. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032114010387>
- [37] DVOŘÁK, Lukáš. *Seminář „Membránové bioreaktory“: Anaerobní membránové bioreaktory (prezentace)* [online]. 20.11.2013 [cit. 2016-11-10]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/4755682-Anaerobni-membranove-bioreaktory-mgr-ing-bc-lukas-dvorak-ph-d.html>
- [38] KHAN, M.A., H.H. NGO, W.S. GUO, et al. Comparing the value of bioproducts from different stages of anaerobic membrane bioreactors. *Bioresource Technology*. 2016, 214, 816-825. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.05.013. ISSN 09608524. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852416306538>
- [39] GALIB, Mohamed, Elsayed ELBESHISHY, Robertson REID, Abid HUSSAIN a Hyung-Sool LEE. Energy-positive food wastewater treatment using an anaerobic membrane bioreactor (AnMBR). *Journal of Environmental Management*. 2016, 182, 477-485. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.07.098. ISSN 03014797. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479716305357>
- [40] CHEN, Cheng, Wenshan GUO, Huo Hao NGO, Duu-Jong LEE, Kuo-Lun TUNG, Pengkang JIN, Jie WANG a Yun WU. Challenges in biogas production from anaerobic membrane bioreactors. *Renewable Energy*. 2016, 98, 120-134. DOI: 10.1016/j.renene.2016.03.095. ISSN 09601481. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148116302798>
- [41] MAO, Chunlan, Yongzhong FENG, Xiaojiao WANG a Guangxin REN. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015, 45, 540-555. DOI: 10.1016/j.rser.2015.02.032. ISSN 13640321. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032115001203>
- [42] *Schaumann: Tvorba bioplynu* [online]. [cit. 2016-11-10]. Dostupné z: <http://bioplyn.schaumann.cz/vyroba/vznik-bioplynu/>
- [43] DERELI, Recep Kaan, Mustafa Evren ERSAHIN, Hale OZGUN, Izzet OZTURK, David JEISON, Frank VAN DER ZEE a Jules B. VAN LIER. Potentials of anaerobic membrane bioreactors to overcome treatment limitations induced by industrial wastewaters. *Bioresource Technology*. 2012, 122, 160-170. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.05.139. ISSN 09608524. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852412009030>
- [44] PRETEL, R., A. ROBLES, M.V. RUANO, A. SECO a J. FERRER. Economic and environmental sustainability of submerged anaerobic MBR-based (AnMBR-based) technology as compared to aerobic-based technologies for moderate-/high-loaded urban wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*. 2016, 166, 45-54. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.10.004. ISSN 03014797. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479715303042>
- [45] VISVANATHAN, Chettiyappan a Amila ABEYNAYAKA. Developments and future potentials of anaerobic membrane bioreactors (AnMBRs). *Membrane Water Treatment*. 2012, 3(1), 1-23. DOI: 10.12989/mwt.2012.3.1.001. ISSN 2005-8624.
- [46] XIONG, Yanghui, Moustapha HARB a Pei-Ying HONG. Characterization of biofoulants illustrates different membrane fouling mechanisms for aerobic and anaerobic membrane bioreactors. *Separation and Purification Technology*. 2016, 157, 192-202. DOI: 10.1016/j.seppur.2015.11.024. ISSN 13835866. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1383586615303476>
- [47] LE, Ngoc Lieu a Suzana P. NUNES. Materials and membrane technologies for water and energy sustainability. *Sustainable Materials and Technologies*. 2016, 7, 1-28. DOI: 10.1016/j.susmat.2016.02.001. ISSN 22149937. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214993715300105>
- [48] PRETEL, R., B.D. SHOENER, J. FERRER a J.S. GUEST. Navigating environmental, economic, and technological trade-offs in the design and operation of submerged anaerobic membrane bioreactors (AnMBRs). *Water Research*. 2015, 87, 531-541. DOI: 10.1016/j.watres.2015.07.002. ISSN 00431354. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043135415301056>
- [49] DING, Yi, Yu TIAN, Zhipeng LI, Wei ZUO a Jun ZHANG. A comprehensive study into fouling properties of extracellular polymeric substance (EPS) extracted from bulk sludge and cake sludge in a mesophilic anaerobic membrane

- bioreactor. *Bioresource Technology*. 2015, 192, 105-114. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.05.067. ISSN 09608524. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852415007403>
- [50] WANG, Zhiwei, Jinxing MA, Chuyang Y. TANG, Katsuki KIMURA, Qiaoying WANG a Xiaomeng HAN. Membrane cleaning in membrane bioreactors: A review. *Journal of Membrane Science*. 2014, 468, 276-307. DOI: 10.1016/j.memsci.2014.05.060. ISSN 03767388. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S037673881400444X>
- [51] RAMOS, C., F. ZECCHINO, D. EZQUERRA a V. DIEZ. Chemical cleaning of membranes from an anaerobic membrane bioreactor treating food industry wastewater. *Journal of Membrane Science*. 2014, 458, 179-188. DOI: 10.1016/j.memsci.2014.01.067. ISSN 03767388. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0376738814000908>
- [52] CHARFI, Amine, Nihel BEN AMAR a Jérôme HARMAND. Analysis of fouling mechanisms in anaerobic membrane bioreactors. *Water Research*. 2012, 46(8), 2637-2650. DOI: 10.1016/j.watres.2012.02.021. ISSN 00431354. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043135412001248>
- [53] CERÓN-VIVAS, A., J.M. MORGAN-SAGASTUME a A. NOYOLA. Intermittent filtration and gas bubbling for fouling reduction in anaerobic membrane bioreactors. *Journal of Membrane Science*. 2012, 423-424, 136-142. DOI: 10.1016/j.memsci.2012.08.008. ISSN 03767388. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0376738812006059>
- [54] STUCKEY, David C. Recent developments in anaerobic membrane reactors. *Bioresource Technology*. 2012, 122, 137-148. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.05.138. ISSN 09608524. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852412009029>
- [55] GAO, W.J., X. QU, K.T. LEUNG a B.Q. LIAO. Influence of temperature and temperature shock on sludge properties, cake layer structure, and membrane fouling in a submerged anaerobic membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science*. 2012, 421-422, 131-144. DOI: 10.1016/j.memsci.2012.07.003. ISSN 03767388. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0376738812005133>
- [56] MARTIN-GARCIA, I., V. MONSALVO, M. PIDOU, P. LE-CLECH, S.J. JUDD, E.J. MCADAM a B. JEFFERSON. Impact of membrane configuration on fouling in anaerobic membrane bioreactors. *Journal of Membrane Science*. 2011, 382(1-2), 41-49. DOI: 10.1016/j.memsci.2011.07.042. ISSN 03767388. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0376738811005680>
- [57] LIN, Hongjun, Bao-Qiang LIAO, Jianrong CHEN, Weijue GAO, Limin WANG, Fangyuan WANG a Xiaofeng LU. New insights into membrane fouling in a submerged anaerobic membrane bioreactor based on characterization of cake sludge and bulk sludge. *Bioresource Technology*. 2011, 102(3), 2373-2379. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.10.103. ISSN 09608524. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852410017591>
- [58] GAO, W.J., H.J. LIN, K.T. LEUNG, H. SCHRAFT a B.Q. LIAO. Structure of cake layer in a submerged anaerobic membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science*. 2011, 374(1-2), 110-120. DOI: 10.1016/j.memsci.2011.03.019. ISSN 03767388. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0376738811001864>
- [59] OZGUN, Hale, Recep Kaan DERELI, Mustafa Evren ERSAHIN, Cumali KINACI, Henri SPANJERS a Jules B. VAN LIER. A review of anaerobic membrane bioreactors for municipal wastewater treatment: Integration options, limitations and expectations. *Separation and Purification Technology*. 2013, 118, 89-104. DOI: 10.1016/j.seppur.2013.06.036. ISSN 13835866. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1383586613004024>
- [60] ROBLES, A., M.V. RUANO, J. RIBES, A. SECO a J. FERRER. Global sensitivity analysis of a filtration model for submerged anaerobic membrane bioreactors (AnMBR). *Bioresource Technology*. 2014, 158, 365-373. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.02.087. ISSN 09608524. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852414002582>
- [61] POLÁŠEK, D. Membránové bioreaktory: Ucpávání a způsoby čištění membrán/ membránových modulů. In *JUNIORSTAV 2015*. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2015. s. 258-267. ISBN: 978-80-214-5091-2.

- [62] POLÁŠEK, D.; HLAVÍNEK, P. Zkušenosti z vývoje a pilotního provozu membránového anaerobního reaktoru pro čištění odpadních vod z potravinářského průmyslu. In *Nové trendy v čistírenství*. 1. Praha: ENVI-PUR, s.r.o., 2014. s. 27-37. ISBN: 978-80-905059-3-3.
- [63] *AnMBR, Anaerobic Membrane Bioreactor: From Concept to Full-Scale and Future Outlook* [online]. [cit. 2016-07-13]. Dostupné z: [http://technomaps.veoliawatertechnologies.com/processes/lib/pdfs/3521-160193\\_VWT\\_NL\\_Poster\\_IWA\\_A0\\_LR\\_Draf.pdf](http://technomaps.veoliawatertechnologies.com/processes/lib/pdfs/3521-160193_VWT_NL_Poster_IWA_A0_LR_Draf.pdf)
- [64] *KUBOTA Anaerobic MBR: Recovery of clean energy from organic waste - Brochure* [katalog]. 2013.
- [65] DVOŘÁK, Lukáš, Marcel GÓMEZ, Jan DOLINA a Aleš ČERNÍN. Anaerobic membrane bioreactors—a mini review with emphasis on industrial wastewater treatment: applications, limitations and perspectives. *Desalination and Water Treatment*. 2015, 57(41), 19062-19076. DOI: 10.1080/19443994.2015.1100879. ISSN 1944-3994. Dostupné také z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19443994.2015.1100879>
- [66] *Veolia AnMBR, Anaerobic Membrane Bioreactor: From Concept to Full-Scale and Future Outlook* [online]. [cit. 2017-09-06]. Dostupné z: [http://technomaps.veoliawatertechnologies.com/processes/lib/pdfs/3521-160193\\_VWT\\_NL\\_Poster\\_IWA\\_A0\\_LR\\_Draf.pdf](http://technomaps.veoliawatertechnologies.com/processes/lib/pdfs/3521-160193_VWT_NL_Poster_IWA_A0_LR_Draf.pdf)
- [67] *Pentair Anaerobic MBR: Treating high-strength wastewater while producing energy* [online]. [cit. 2017-09-06]. Dostupné z: <http://advancedfiltration.pentair.com/en/technologies/anaerobic-mbr>
- [68] *Anaerobic MBR Technology: Convert concentrated organic wastewater into high quality effluent and produce energy* [online]. [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: <https://www.gewater.com/products/anaerobic-mbr-technology>
- [69] *Immersed anaerobic MBRs: are they viable?* [online]. [cit. 2016-02-17]. Dostupné z: <http://www.thembrsite.com/features/immersed-anaerobic-mbrs-viable/>
- [70] ALLISON, Mike, Shannon GRANT, Scott CHRISTIAN a Dwain WILSON. Full-Scale Operating Experience with USA-based ADI-AnMBR Systems for Food Wastes. *Proceedings of the Water Environment Federation*. 2013, 2013(10), 5255-5270. DOI: 10.2175/193864713813692784. ISSN 19386478.
- [71] *Kubota MBR Case Study: Salad Dressing Factory (Ken's Foods)* [online]. [cit. 2016-02-17]. Dostupné z: [https://www.kubota-mbr.com/assets/uploads/pdf/18347-adi-kubota\\_kens-foods\\_final.pdf](https://www.kubota-mbr.com/assets/uploads/pdf/18347-adi-kubota_kens-foods_final.pdf)
- [72] CHRISTIAN, Scott. *The First Two Years of Full-Scale Anaerobic Membrane Bioreactor (AnMBR) Operation Treating High-Strength Industrial Wastewater*. 2011, 6(2), 1-2. DOI: 10.2166/wpt.2011.0032. ISSN 1751231x. Dostupné také z: <http://www.iwaponline.com/wpt/006/wpt0060032.htm>
- [73] SHIN, Chungheon a Jaeho BAE. Current status of the pilot-scale anaerobic membrane bioreactor treatments of domestic wastewaters: A critical review. *Bioresource Technology*. 2017, 6(2), -. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.09.002. ISSN 09608524. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852417315432>
- [74] SMITH, Adam L., Lauren B. STADLER, Nancy G. LOVE, Steven J. SKERLOS a Lutgarde RASKIN. Perspectives on anaerobic membrane bioreactor treatment of domestic wastewater: A critical review. *Bioresource Technology*. 2012, 122, 149-159. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.04.055. ISSN 09608524. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852412006608>
- [75] *The MBR Site: Membrane Products* [online]. Dostupné z: <http://www.thembrsite.com/products/>
- [76] *Koch Membrane Systems: PURON PULSION MBR* [brochure]. [cit. 2017-02-08]. Dostupné z: <http://www.kochmembrane.com/PDFs/Brochures/pulsion-brochure.aspx>
- [77] ABDEL-KARIM, Ahmed, Sebastian LEAPER, Monica ALBERTO, et al. High flux and fouling resistant flat sheet polyethersulfone membranes incorporated with graphene oxide for ultrafiltration applications. *Chemical Engineering Journal*. 2018, 334, 789-799. DOI: 10.1016/j.cej.2017.10.069. ISSN 13858947. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1385894717317837>
- [78] *The MBR Site: Largest MBR plants – Worldwide* [online]. [cit. 2017-10]. Dostupné z: <http://www.thembrsite.com/about-mbrs/largest-mbr-plants/>
- [79] *ScienceDirect* [online]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com>

- [80] *Scientific.net* [online]. Dostupné z: <https://www.scientific.net>
- [81] *Scientific Research* [online]. Dostupné z: <http://www.scirp.org>
- [82] *ResearchGate* [online]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net>
- [83] *Černá Hora* [online]. Dostupné z: <http://www.pivovarcernahora.cz>
- [84] *Jihomoravský kraj: Pivovar Černá Hora* [online]. [cit. 2017-01-26]. Dostupné z: <http://www.jizni-morava.cz/objekt/31069-pivovar-cerna-hora>
- [85] *Černá Hora: SOUČASNOST PIVOVARU* [online]. [cit. 2017-01-26]. Dostupné z: <http://www.pivovarcernahora.cz/soucasnost>
- [86] *CREA Hydro & Energy: Nové energeticky efektivní metody čištění průmyslových odpadních vod* [online]. [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <http://www.creacz.com/cz/Projekt3/>
- [87] *Czech Renewable Energy Alliance* [online]. Dostupné z: <http://www.creacz.com>
- [88] POLÁŠEK, Daniel. *Nové energeticky efektivní metody čištění průmyslových odpadních vod (AnMBR): Výstupní zpráva - Laboratorní testování ponorných plochých membránových modulů vhodných pro AnMBR*. Brno, 2015. Dostupné také z: <http://www.creacz.com/cz/Projekt3/>
- [89] *Kubota: Membrane Cartridge Specification Sheet (Type 203)*. Specification No.: KE-06-002.
- [90] *KUBOTA MBR Testing System with XJ3 O&M Manual*. 2004.
- [91] *BIO-CEL Lab: Submerged membrane module for wastewater treatment*. USER MANUAL Version M\_BC\_Lab\_V1\_00e.
- [92] *Labmate: BIO-CEL MBR Laboratory Module for Pilot Installations* [online]. [cit. 2014-11-03]. Dostupné z: <https://www.labmate-online.com/news/waste-management/21/microdyn-nadir/bio-celreg-mbr-laboratory-module-for-pilot-installations/14143>
- [93] *MICRODYN BIO-CEL MBR: Submerged MBR-Module based on Flat Sheet Membranes (Membrane Bioreactors)* [online]. [cit. 2015-02-04]. Dostupné z: <http://www.microdyn-nadir.com/en/products/bio-cel/>
- [94] *Sestava modelu: Výkres 1:20 číslo SV14-005-224-0*. ENVI-PUR, 2015.
- [95] CHEN, Han, Sheng CHANG, Qingbin GUO, Youngseck HONG a Ping WU. Brewery wastewater treatment using an anaerobic membrane bioreactor. *Biochemical Engineering Journal*. 2016, 105, 321-331. DOI: 10.1016/j.bej.2015.10.006. ISSN 1369703x. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1369703X15300772>
- [96] BASSET, Núria, Eric SANTOS, Joan DOSTA a Joan MATA-ÁLVAREZ. Start-up and operation of an AnMBR for winery wastewater treatment. *Ecological Engineering*. 2016, 86, 279-289. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2015.11.003. ISSN 09258574. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925857415302597>
- [97] FERRER, J., R. PRETEL, F. DURÁN, et al. Design methodology for submerged anaerobic membrane bioreactors (AnMBR): A case study. *Separation and Purification Technology*. 2015, 141, 378-386. DOI: 10.1016/j.seppur.2014.12.018. ISSN 13835866. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1383586614007631>
- [98] MARŠÍK, Miroslav. *Návod k obsluze poloprovozního modelu – Anaerobní reaktor s membránovou separací*. ENVI-PUR, 2015.
- [99] *Model AnMBR Separate: NÁVOD K OBSLUZE OPERÁTORSKÉHO PANELU*. DBD CONTROL SYSTEMS, 2015.
- [100] MARŠÍK, Miroslav. *Návod k obsluze poloprovozního modelu – Anaerobní reaktor s membránovou separací*. ENVI-PUR, 2015.
- [101] *BIO-CEL: Submerged membrane module for wastewater treatment*. USER MANUAL Version M\_BC\_V6\_03e.
- [102] *Model AnMBR: Výkres 1:20 číslo SV14-005-101*. ENVI-PUR, 2014.
- [103] CONTAINEX: Přepravní kontejner [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://www.containex.cz/cs/produkty/prepravni-kontejner>

## SEZNAM PUBLIKOVANÝCH PRACÍ

### 2017

- POLÁŠEK, D.; HLAVÍNEK, P.; ADAMEC, T.; POLÁŠEK, J.; MARŠÍK, M. *Výzkumná zpráva - Anaerobní membránový bioreaktor (AnMBR) pro čištění odpadních vod potravinářského průmyslu - Zkušební provoz pilotní jednotky AnMBR v Pivovaru Černá Hora*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, Centrum AdMaS, 2017. s. 1-52.
- POLÁŠEK, D.; HLAVÍNEK, P. *Anaerobní membránový bioreaktor (AnMBR) pro čištění průmyslových odpadních vod*. MEMPUR 2017, Sborník abstraktů. 1. Česká Lípa: Česká membránová platforma, z.s., 2017. s. 80-80. ISBN: 978-80-904517-9- 7.
- POLÁŠEK, D.; HLAVÍNEK, P. Anaerobní membránový bioreaktor (AnMBR). *Vodovod.info*, 2017, č. 3, s. 1-6. ISSN: 1804-7157.
- POLÁŠEK, D.; HLAVÍNEK, P. Anaerobní membránový bioreaktor (AnMBR) pro čištění odpadních vod potravinářského průmyslu. *Vodní hospodářství*, 2017, roč. 67., č. 9, s. 8-13. ISSN: 1211-0760.

### 2016

- POLÁŠEK, D.; HLAVÍNEK, P. Zkušenosti s provozem anaerobního membránového reaktoru. In *Městské vody 2016*. 1. Brno: ARDEC s.r.o., 2016. s. 147-152. ISBN: 978-80-86020-83- 9.

### 2015

- POLÁŠEK, D. Membránové bioreaktory: Ucpávání a způsoby čištění membrán/ membránových modulů. In *JUNIORSTAV 2015*. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2015. s. 258-267. ISBN: 978-80-214-5091- 2.
- POLÁŠEK, D.; HLAVÍNEK, P. Zkušenosti provozu membránového anaerobního reaktoru v Pivovaru Černá Hora. In *Rekonštrukcie stokových sietí a čistiarní odpadových vod*. 1. Bratislava, Slovenská republika: Výskumný ústav vodného hospodárstva Bratislava, 2015. s. 270-277. ISBN: 978-80-89740-08- 6.
- POLÁŠEK, D.; KOUPÁN, J. *Výstupní zpráva: Zpráva z testování membránových modulů pro průmyslové ČOV*. Brno: CREA Hydro&Energy, o.s., 2015. s. 1-63.
- POLÁŠEK, D.; KOUPÁN, J. *Výstupní zpráva: Zpráva o diseminaci projektu*. Brno: CREA Hydro&Energy, o.s., 2015. s. 1-10.

### 2014

- POLÁŠEK, D. Redukce dusičnanů z odpadních vod pomocí membránového biofilmového reaktoru. In *JUNIORSTAV 2014*. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2014. s. 278-280. ISBN: 978-80-214-4851- 3.
- POLÁŠEK, D. Anaerobní membránové bioreaktory - nadějná technologie s významnou budoucností?. In *JUNIORSTAV 2014*. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2014. s. 277-285. ISBN: 978-80-214-4851- 3.



- POLÁŠEK, D.; HLAVÍNEK, P. Zkušenosti z vývoje a pilotního provozu membránového anaerobního reaktoru pro čištění odpadních vod z potravinářského průmyslu. In *Nové trendy v čistírenství*. 1. Praha: ENVI-PUR, s.r.o., 2014. s. 27-37. ISBN: 978-80-905059-3-3.

## 2013

- POLÁŠEK, D.; KOUPÁN, J. *Výzkumná zpráva: Literární rešerše současného stavu, výběr a testování membránových modulů*. Brno: CREA Hydro&Energy, o.s., 2013. s. 1-110.
- POLÁŠEK, D.; KOUPÁN, J. *Výzkumná zpráva: Doplnění literární rešerše - případové studie (full-scale), příklady laboratorních a poloprovozních sestav*. Brno: CREA Hydro&Energy, o.s., 2013. s. 1-58.

## 2012

- HLAVÍNEK, P.; POLÁŠEK, D.; HLUŠTÍK, P. Využití membránových bioreaktorů pro čištění průmyslových odpadních vod. In *44. konference vodohospodářů v priemysle*. 1. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislavě, Katedra mapovania a pozemkových úprav, 2012. s. 124-133. ISBN: 978-80-227-3809-5.
- POLÁŠEK, D.; HLAVÍNEK, P. Sběr provozních zkušeností na membránové DČOV. In *Odpadové vody 2012*. 1. Bratislava: Asociácia čistiarenských expertov Slovenskej republiky, 2012. s. 173-175. ISBN: 978-80-970896-2-7.
  
- HLAVÍNEK, P.; POLÁŠEK, D.; STŘÍTESKÝ, L.; RACLAVSKÝ, J.: AN-DIGESTER; *Anaerobní fermentor*. AdMaS, budova P4, Purkyňova ul., Brno. URL: <http://www.admas.eu>. (funkční vzorek)
- HLAVÍNEK, P.; POLÁŠEK, D.; STŘÍTESKÝ, L.; RACLAVSKÝ, J.: MBR; *Membránová filtrační jednotka*. AdMaS, Purkyňova ul., Brno. URL: <http://www.admas.eu>. (funkční vzorek)

## ŽIVOTOPIS

### Osobní údaje

Jméno: Ing. Daniel Polášek  
Datum narození: 3. 10. 1984  
Adresa: Pod vrškem 3, 621 00 Brno, Česká republika  
Telefon: +420 605 234 646  
E-mail: polasek.d@fce.vutbr.cz / polasek.daniel@centrum.cz

### Vzdělání

2012 – současnost      Doktorský studijní program Stavební inženýrství s kombinovanou formou studia (prezenční formou studia do roku 2016)  
Vysoké učení technické v Brně  
Fakulta stavební, Vodní hospodářství a vodní stavby  
Veveří 331/95, 602 00 Brno  
Dizertační práce: *Anaerobní membránový bioreaktor (AnMBR) pro čištění odpadních vod potravinářského průmyslu*

2009 – 2011      Magisterský studijní program Stavební inženýrství s prezenční formou studia  
Vysoké učení technické v Brně  
Fakulta stavební, Vodní hospodářství a vodní stavby  
Veveří 331/95, 602 00 Brno  
Diplomová práce: *Intenzifikace ČOV technologií MBR*

2004 – 2009      Bakalářský studijní program Stavební inženýrství s prezenční formou studia  
Vysoké učení technické v Brně  
Fakulta stavební, Všeobecné zaměření / Vodní hospodářství a vodní stavby  
Veveří 331/95, 602 00 Brno  
Bakalářská práce: *Čištění odpadních vod se separací kalu membránovým modulem*

2000 – 2004      Gymnázium Brno, Křenová  
Křenová 304/36, 602 00 Brno

## Pracovní zkušenosti / praxe v oboru / vědecká činnost

- 03/2012 – současnost AQUA PROCON s.r.o.  
Projektová a inženýrská firma  
Palackého tř. 12, 612 00 Brno  
www.aquaprocon.cz  
Pozice: projektant, technolog, výzkumný pracovník (divize Kanalizace a ČOV, Rozvojové projekty) / plný úvazek
- 03/2012 – 12/2014 CREA Hydro&Energy, z.s.  
Traubova 1546/6, 602 00 Brno  
www.creacz.com  
Pozice: odborný pracovník / částečný úvazek  
*Nové energeticky efektivní metody čištění průmyslových odpadních vod*
- 04/2011 – 02/2012 FHNW School of Life Sciences  
Institute for Ecopreneurship  
Environmental and Water Technologies, Research and Development  
Gründenstrasse 40, CH-4132 Muttenz  
www.fhnw.ch  
Pozice: výzkumný pracovník / plný úvazek  
*Nitrification performance in a membrane bioreactor treating industrial wastewater; Comparison of two PAC/UF processes for the removal of micropollutants from wastewater treatment plant effluent: Process performance and removal efficiency*
- 2004 – 03/2011 AQUA PROCON s.r.o.  
Projektová a inženýrská firma  
Palackého tř. 12, 612 00 Brno  
www.aquaprocon.cz  
Pozice: pomocný projektant (divize Kanalizace a ČOV, 2005-2011) / částečný úvazek; brigádník (oddělení Planografie, 2004-2005)

## Jazykové znalosti

- Angličtina B2 (středně pokročilý)  
Němčina B2 (středně pokročilý)

## Počítačové dovednosti

MS Office, AutoCAD, MicroStation, Adobe Photoshop / Photoshop Lightroom, SketchUp

