



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

DISSERTATION THESIS

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.

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

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem dizertační práci zpracoval samostatně, a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

.....
Datum

.....
Ing. Daniel Polášek

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych na tomto místě poděkoval svému školiteli prof. Ing. Petru Hlavínkovi, CSc., MBA za jeho odborné vedení, předané profesní zkušenosti, cenné rady a připomínky.

Dizertační práce byla vytvořena především v rámci řešení projektu č. LO1408 „AdMaS UP - Pokročilé stavební materiály, konstrukce a technologie“ podporovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory programu „Národní program udržitelnosti I“, a také v rámci výzkumných aktivit klastru CREA Hydro & Energy, jehož partnery jsou mj. Vysoké učení technické v Brně a AQUA PROCON s.r.o. Poděkování patří vedení a zainteresovaným pracovníkům výzkumné instituce AdMaS za potřebné zázemí a výpomoc, Fakulty chemické VUT v Brně za analýzu vzorků, firmy ENVI-PUR, s.r.o. za činnosti spojené s dodáním pilotní jednotky AnMBR, firmy AQUA PROCON s.r.o. nejen za umožnění realizace a testování laboratorního AnMBR a Pivovaru Černá Hora za umístění pilotní jednotky a celkovou podporu výzkumných aktivit.

Za podporu během celého studia patří můj veliký dík také mé rodině a přátelům.

OBSAH

1.	ÚVOD.....	3
2.	CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE.....	4
3.	SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY – ČÁST TEORETICKÁ.....	5
3.1	Průmyslové odpadní vody, potravinářský průmysl, pivovarnictví.....	5
3.1.1	<i>Průmyslové odpadní vody.....</i>	<i>5</i>
3.1.2	<i>Potravinářský průmysl.....</i>	<i>5</i>
3.1.3	<i>Pivovarnictví.....</i>	<i>8</i>
3.2	Anaerobní technologie čištění odpadních vod.....	8
3.3	Princip tlakových membránových procesů a základní pojmy.....	13
3.4	Počátky membrán, membránových modulů, bioreaktorů (MBR a AnMBR) pro čištění odpadních vod.....	17
3.5	Výhody a nevýhody technologie.....	19
3.6	Bioplyn.....	20
3.7	Možnosti využití permeátu.....	22
3.8	Ucpávání membrán a způsoby prevence / čištění.....	22
3.9	Membrány a membránové moduly.....	25
3.10	AnMBR konfigurace.....	28
3.11	Komerční (full-scale) AnMBR, výzkumné aktivity.....	28
3.11.1	<i>Kubota Submerged Anaerobic Membrane Bioreactor.....</i>	<i>28</i>
3.11.2	<i>Veolia Biothane Anaerobic Technology Memthane 2.0 a Pentair Anaerobic MBR.....</i>	<i>29</i>
3.11.3	<i>GE AnMBR.....</i>	<i>31</i>
3.11.4	<i>Výzkumné aktivity - směry a trendy.....</i>	<i>32</i>
4.	VLASTNÍ ŘEŠENÍ DIZERTAČNÍ PRÁCE – ČÁST PRAKTICKÁ.....	35
4.1	Lokalita testování a stručný popis.....	35
4.1.1	<i>Přítok OV a mechanické předčištění.....</i>	<i>37</i>
4.1.2	<i>Anaerobní čištění.....</i>	<i>39</i>
4.1.3	<i>Biologické (aerobní) čištění.....</i>	<i>41</i>
4.1.4	<i>Dmychárna.....</i>	<i>42</i>
4.1.5	<i>Kalové hospodářství.....</i>	<i>43</i>
4.1.6	<i>Plynové a tepelné hospodářství.....</i>	<i>43</i>
4.2	Laboratorní testování membránových modulů.....	44
4.2.1	<i>Kubota.....</i>	<i>45</i>
4.2.2	<i>Microdyn-Nadir.....</i>	<i>45</i>
4.2.3	<i>Laboratorní sestava pro testování membránových modulů.....</i>	<i>46</i>
4.2.4	<i>Průběh.....</i>	<i>48</i>
4.2.5	<i>Výsledky a závěry.....</i>	<i>53</i>
4.3	Popis poloprovozní jednotky.....	54

4.3.1	Nádrže.....	54
4.3.2	Membránové moduly pilotní jednotky.....	58
4.3.3	Chemické hospodářství.....	59
4.3.4	Plynové hospodářství.....	60
4.3.5	Měření a regulace.....	61
4.4	Zkušební provoz poloprovozní jednotky	65
4.4.1	Pokyny, doporučení a upozornění dodavatele	65
4.4.2	Příprava a zapracování	67
4.4.3	Identifikace a odstraňování závad, úpravy a optimalizace	69
4.4.4	Zkušební provoz	84
4.4.5	Čištění a regenerace	86
4.4.6	Závěry a doporučení zkušebního provozu	88
5.	SHRNUTÍ A PŘÍNOSY DIZERTAČNÍ PRÁCE.....	92
5.1	Obecné shrnutí	92
5.2	Přínosy pro vědní obor a praxi	92
5.3	Doporučení dalších směrů/zaměření výzkumu, akademické práce	93
	POUŽITÁ LITERATURA / ZDROJE.....	94
	SEZNAM TABULEK	104
	SEZNAM OBRÁZKŮ	105
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	109
	SUMMARY	112
	SEZNAM PŘÍLOH.....	113
Příloha 1	Přehled membránové separace ve vztahu k velikosti pórů, respektive zachycených / propuštěných částic.....	I
Příloha 2	Poster / informační leták.....	II
Příloha 3	Technický list membránového modulu pro pilotní AnMBR	III
Příloha 4	Výkres AnMBR – popis.....	IV
Příloha 5	Výkres AnMBR – rozměry a hmotnost	V
Příloha 6	Schématický návrh kontejneru (40'HC) pro umístění pilotního AnMBR.....	VI
Příloha 7	Provozní deník pilotní jednotky AnMBR - příklad.....	VII

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 rozbory ČOV Pivovar Černá Hora a dokumentace místní ČOV, příslušné normy a předpisy.

3. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY – ČÁST TEORETICKÁ

3.1 Průmyslové odpadní vody, potravinářský průmysl, pivovarnictví

3.1.1 Průmyslové odpadní vody

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. Tyto mohou obsahovat znečišťující látky v různých kombinacích: [1]

- organické látky biologicky rozložitelné,
- organické látky biologicky nerozložitelné,
- toxické organické nebo anorganické sloučeniny,
- sypké látky,
- anorganické rozpuštěné soli,
- nerozpuštěné látky organické či anorganické,
- radioaktivní látky,
- tepelné znečištění,
- mikrobiologické znečištění.

Optimální postup čištění průmyslových odpadních vod vychází z hmotnostní a koncentrační analýzy přítomného znečištění. Některé procesy / technologie (mechanické, chemické, fyzikálně-chemické, biologické procesy) budou blíže rozebrány v následujících kapitolách.

3.1.2 Potravinářský průmysl

V České republice, obdobně jako v celé Evropské unii, patří výroba potravin k nosným odvětvím zpracovatelského průmyslu. Význam potravinářské výroby je dán zabezpečením 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 (ovoce a zelenina), nebo se jedná o výrobky potravinářského průmyslu (pečivo, uzeniny, jogurty, sýry apod.). Potravinářský průmysl je odvětví zpracovatelského průmyslu, které zpracovává zemědělské produkty z rostlinné i živočišné výroby (obilí, zeleninu, mléko, maso a další suroviny) do podoby potravin pro spotřebitele. Při potravinářské výrobě jsou využívány i některé průmyslové suroviny, např. konzervanty nebo barviva. [3]

Tab. 1 Produkce potravin - základní kategorie a stádia výroby [4] (úprava autor)

PRODUKCE POTRAVIN	
Stádia výroby	Základní kategorie
Příjem a kontrola kvality surovin	Masný průmysl
Základní zpracování surovin, případně uskladnění	Mlékárenský a tukový průmysl
Výroba produktů, případně meziproduktů	Zpracování obilovin a výroba pečiva
Balení a skladování	Konzervárenství, zpracování zeleniny a ovoce
Expedice	Výroba nápojů (lihovarnictví, pivovarnictví, vinařství...)

Potravinářský průmysl zahrnuje mlýny, pekárny, mlékárny, cukrovary, konzervárny, masokombináty a další výroby. Pod potravinářský průmysl spadá i výroba nápojů (alkoholických i nealkoholických) a v ČR tradičního piva. Pro toto odvětví průmyslu jsou velmi důležité systémy kontroly kvality výrobků z chemického i biologického pohledu, protože jakékoliv odchylky od standardů mohou vést k poškození zdraví spotřebitelů. Dohledem jsou pověřeny Státní zemědělská a potravinářská inspekce [5] a Státní veterinární správa [6]. [3]

Tab. 2 Výroba vybraných produktů v ČR [7]

Potravinářské výrobky a nápoje	Měrná jednotka	2013	2014	2015
Maso hovězí čerstvé nebo chlazené	t	55 201	56 617	57 830
Maso vepřové čerstvé nebo chlazené	t	198 493	212 196	201 071
Drůbež čerstvá nebo chlazená	t	45 483	48 035	47 137
Drůbež zmražená	t	10 154	8 452	8 891
Brambory upravené a konzervované	t	65 726	50 682	44 525
Zavařeniny, želé, marmelády a džemy	t	39 218	39 431	42 695
Mléko a smetany s obsahem tuku do 6%	tis.l	767 606	747 622	786 523
Mléko a smetany s obsahem tuku nad 6%	tis.l	45 328	44 684	47 367

Máslo	tis.l	40 047	39 614	41 408
Sýry a tvaroh	t	157 992	183 574	164 269
Mléčné výrobky kysané	t	179 842	172 214	181 834
Mouka pšeničná	t	732 623	733 380	738 907
Chléb čerstvý	t	295 967	278 434	273 395
Pečivo čerstvé běžné	t	272 280	273 638	276 395
Pečivo cukrářské	t	43 716	46 794	44 751
Cukr rafinovaný	tis.t	586	559	599
Výlov ryb v rybnících a tekoucích vodách	tis.t	23,2	23,9	24,0
Destiláty, likéry a ostatní lihové nápoje	tis.l	21 625	20 853	20 952
Víno z hroznů (kromě šumivého), vinný mošt	tis.l	66 150	52 258	70 500
Pivo	tis.hl	18 141	18 182	18 537
Minerální vody a soda bez přísad	tis.l	671 534	630 723	661 514
Ostatní nealkoholické nápoje	mil.l	1,525	1,691	1,878

Pozn.: přepočteno na 100% abs.lihu

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. Ve vodním prostředí způsobují OV z potravinářského průmyslu např. okyselení a eutrofizaci. Hlavními látkami znečišťujícími ovzduší jsou pevné částice a pachové látky. Vliv potravinářské výroby na životní prostředí je také bezprostředně spojen se zemědělskou výrobou. [8]

Velké objemy odpadních vod produkuje cukrovarnický průmysl, nejzávadnější je tzv. řízková voda s vysokou hodnotou BSK nad 1 500 mg.l⁻¹ a obsahem sacharózy, která snadno kvasí. Při výrobě sladu a piva mají velmi vysokou hodnotu BSK OV z omývání kvasných kádí, 2-13 000 BSK mg.l⁻¹. Nebezpečným odpadem z mlékárenské výroby je voda znečištěná mléčnými bílkovinami, které kvasí a obtížně se odstraňují z odpadních vod. Pokud jde o masokombináty a jatka, OV obsahují zbytky živočišných bílkovin, krve a možné infekce. Pro zajímavost, na jednu porážku v jatkách se spotřebuje přibližně 200-2 000 litrů vody, která obsahuje krev, tuky i dusíkaté látky. Do odpadních vod se může dostat i kyselina fosforečná (H₃PO₄), používaná v potravinářské výrobě a také při čištění či úklidu. [8]

3.1.3 Pivovarnictví

Pivo a pivovarnictví má v české historii a kultuře velmi dlouhou tradici. Podle Českého svazu pivovarů a sladoven (ČSPS) [9], resp. publikace Panorama zpracovatelského průmyslu ČR 2016, se pozitivní vnímání českého piva stále zvyšuje a jeho popularita stoupá. České pivovarnictví proslavilo naši zemi a i nadále posiluje její dobrou pověst po celém světě. Jedná se o důležité odvětví národního hospodářství, které spoluvytváří jedinečnost ČR v zahraničí, podporuje ekonomický rozvoj země a významně přispívá do státního rozpočtu. Vývoj pivovarnictví u nás odráží, jak se mění životní styl spotřebitelů i aktuální stav domácí i světové ekonomiky. Celkový výstav piva v ČR včetně nealkoholického v roce 2016 oproti roku 2015 stoupl o 1,9% na rekordních 20,5 milionů hektolitřů piva. Potěšující na tomto stavu je, že za nárůstem výroby piva stojí jak vyšší výstav pro tuzemský trh, tak pokračující trend v oblasti exportu, který stabilně roste již několik let za sebou. Průměrná spotřeba piva na jednoho Čecha se v posledních sedmi letech držela v rozmezí 143-146 litrů. [10]

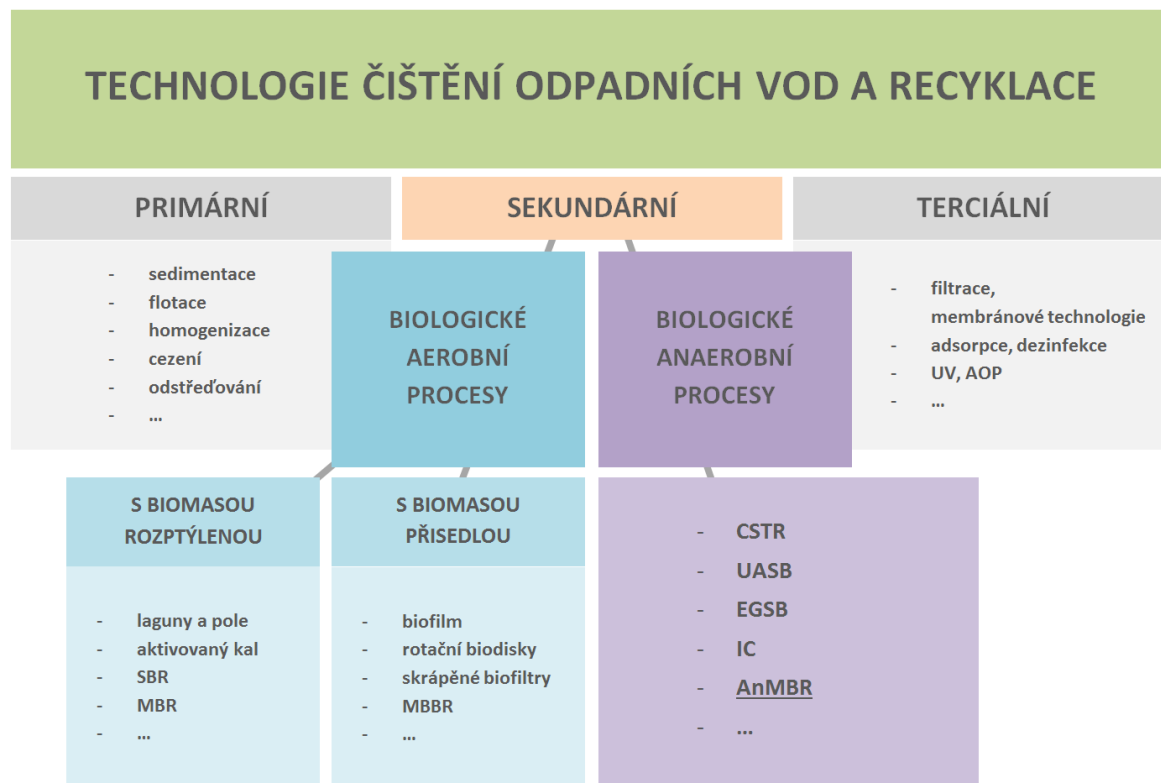


Obr. 1 Infografika – suroviny potřebné pro výrobu jednoho půllitru českého ležáku a základní hospodářské výsledky pivovarského oboru v roce 2016 [11][12]

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“ odpadní vody jako např. průmysl farmaceutický, chemický, petrochemický.

Na Obr. 2 je zjednodušeně znázorněno základní rozdělení způsobů čištění odpadních vod se zaměřením na způsoby anaerobní.



Obr. 2 Způsoby čištění odpadních vod – základní rozdělení [13][14][15][16] (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.

UASB reaktor (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) je konstrukčně starší typ reaktoru, který funguje na bázi kalového lože granulované biomasy, které je protékáno zespoda nahoru. Hlavní část přeměny znečištění na metan probíhá právě v tomto loži. Separace biomasy, bioplynu a vody je zajištěna pro tyto účely speciálně zkonstruovaným separátorem umístěným v horní části reaktoru. Reaktory jsou nejčastěji betonové a kovové s vnitřními vestavbami. Uvnitř reaktorů se nenachází žádná pohyblivá strojní část, což maximálně zjednodušuje jeho údržbu. V UASB reaktoru je díky nižšímu

objemovému zatížení (oproti např. EGSB) obecně delší doba zdržení, což je výhodnější zejména u odpadních vod, které obsahují složitější organické sloučeniny nebo nerozpustné látky organického charakteru. [17][18]

EGSB reaktor (Expanded Granular Sludge Bed) je novější typ (modifikací) reaktoru, který pracuje s granulovanou anaerobní biomasou v expandovaném loži. Díky tomu je ve srovnání s UASB reaktorem zajištěno intenzivnější míchání, a tak i homogenní distribuce substrátu. Toto uspořádání tedy ve svém důsledku umožňuje aplikovat vyšší objemové zatížení a EGSB reaktor je ve srovnání s UASB ještě kompaktnější. Princip průtoku odpadní vody granulovaným ložem je odspoda nahoru a k separaci dochází na třífázových separátorech. Konstantní intenzivní míchání a homogenní nátok, který je základem stabilního provozu reaktoru, je zajištěn externí recirkulací pomocí čerpadel a není závislý na produkci bioplynu. EGSB reaktory bývají v provedení nerezovém (kovovém) i betonovém s adekvátní vnitřní výstelkou. Pro případ nenadálých intoxikací procesu čištění je možné proces znovu zapracovat v průběhu několika dní, protože zásoba granulovaného kalu bývá dlouhodobě skladována v zásobní nádrži - není potřeba dlouhá doba k vytvoření specifické kultury mikroorganismů. [17][18]

IC reaktor (Internal Circulation) je v podstatě anaerobní kolona s vnitřní cirkulací kalu a dvojicí třífázových separátorů. OV se do reaktoru dostává přes distribuční systém umístěný ve spodní části kolony, kde se mísí s granulovaným kalem, který se vrací z vrchní části reaktoru. Nad distribučním systémem se nachází vysokozátěžová zóna. V této zóně dochází biologickými procesy k přeměně většiny organického znečištění na bioplyn. Produkovaný bioplyn je zachytáván v prvním separátoru, odkud je veden do plynové mamutky. Touto mamutkou se zaplynovaná směs granulovaného kalu a vody dostává díky nižší objemové hmotnosti do odplyňovací komory umístěné až v horní části reaktorové věže. V odplyňovači se bioplyn oddělí od směsi vody a kalu a je odváděn k dalšímu využití. Po nabytí původní specifické hmotnosti se směs kalu a OV gravitačně vrací do spodní části reaktoru, kde se smíchá s vodou přitékající do reaktoru. Předčištěná OV se dostává ze zóny vysokozátěžované do nízkozátěžované, kde probíhá její dočištění. Vzniklý bioplyn z této části se zachytává v druhém (horním) separátoru. Podobně jako ve spodním separátoru je směs vody a kalu vedena mamutkou do odplyňovače. Vyčištěná OV se z reaktoru odvádí přes přepad gravitačně. Technologie IC se montuje zpravidla do stojatých válcových kovových nádrží s výškou 16-24 m a průměrem 3-11 m. [17][18]

AnMBR (Anaerobic Membrane BioReactor) je poměrně nová inovativní pokročilá technologie anaerobního způsobu čištění odpadních vod (stručnou historii naleznete v kapitole 3.3). Tato technologie je skládá ze dvou hlavních částí – je určitou kombinací typu anaerobního reaktoru a vhodné membránové separace. V anaerobním reaktoru probíhá mikrobiální rozklad organické hmoty za anaerobních podmínek a membránová separace zajišťuje průchod či zadržení požadovaných částic uvnitř systému. Podrobnější informace jsou uvedeny v následujících kapitolách a částech dizertační práce. O obecných výhodách / nevýhodách souhrnně pojednává kapitola 3.4.

Tab. 3 Porovnání konvenčního aerobního a anaerobního čištění, MBR a AnMBR [19] (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, mohou způsobovat celou řadu nežádoucích stavů.

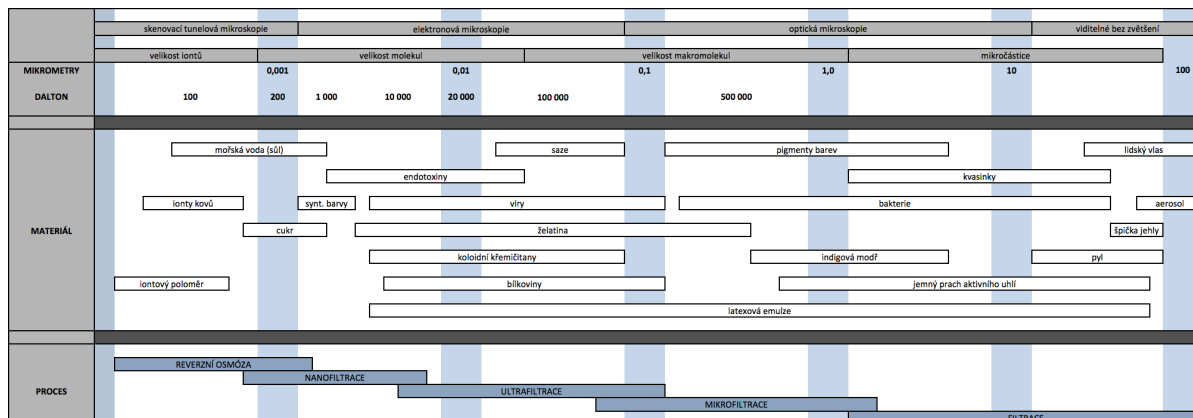
Tab. 4 Výhody a nevýhody AnMBR pro zmírnění potíží vyvolaných průmyslovými OV v extrémních podmínkách [20] (úprava autor)

Extrémní podmínky	Účinky (dopady) na anaerobní proces	Výhody / nevýhody AnMBR
Vysoký obsah nerozpuštěných látek	<ul style="list-style-type: none"> potíže s nátokem u reaktorů s granulovaným ložem ucpávání anaerobních filtrů méně efektivní granulace akumulace pomalu rozložitelných organických látek v kalovém loži, zejména u USAB reaktorů zhoršení kvality na odtoku kvůli nerozpuštěným látkám 	<ul style="list-style-type: none"> retence biomasy nezávislá na granulaci není zapotřebí speciální nátok, jestliže je kontinuálně míchaný reaktor užíván jako bioreaktor veškeré částice jsou zadrženy uvnitř reaktoru; nastavením příslušné vhodné látkové doby zdržení lze očekávat kompletnější rozklad pomalu rozložitelných organických látek, zlepšení účinnosti rozkladu v porovnání s konvenční kalovou digescí inertní částice se mohou hromadit v reaktoru a toto může vyžadovat vypouštění kalu odtok z reaktoru bez nerozpuštěných látek
Obsah tuků a mastnot	<ul style="list-style-type: none"> rozpad granulí flotace biomasy a vymývání rozvrstvení (stratifikace) substrátu v kalovém loži způsobuje zvýšenou inhibici LCFA a srážení 	<ul style="list-style-type: none"> nevymývání biomasy systemy celkově promíchávaných reaktorů jsou možné účinky tuků a mastnot jak na biomasu, tak na

	<ul style="list-style-type: none"> tuků/mastnot na částicích kalu • potlačení metanogenní aktivity kvůli omezení přenosu hmoty 	<ul style="list-style-type: none"> membrány v AnMBR prozatím nejsou dobře dokumentované
Termofilní podmínky	<ul style="list-style-type: none"> • potíže s granulací anaerobní biomasy 	<ul style="list-style-type: none"> • retence biomasy není závislá na granulaci • inokulace reaktoru neadaptovaným mezofilním kalem může zapříčinit vážné ucpávání membrán kvůli rozkladu mezofilních bakterií za termofilních podmínek • teplotní výkyvy mohou na biomasu vyvíjet tlak (stres) a zvyšovat ucpávání membrán • díky snížené viskozitě kalu za termofilních podmínek mohou být dosahovány vyšší specifické průtoky membránou (flux) • za termofilních podmínek byly zaznamenávány nižší hodnoty specifického průtoku membránou (flux) než za podmínek mezofilních - kvůli kompaktnější vrstvě nánosů na povrchu membrány
Toxicita	<ul style="list-style-type: none"> • inhibice SMA nebo rozklad biomasy, závisí na druhu a koncentraci toxické látky a stupni stratifikace v kalovém loži • dlouhý aklimatizační čas pokud nepřilnou bakterie potřebné k přeměně organické biologicky odbouratelné toxické látky • možné potíže s granulací a úniky biomasy • struktura granulí zapříčiňuje omezenou přeměnu přestupu hmoty a tím zvyšuje odolnost systému vůči toxickým látkám 	<ul style="list-style-type: none"> • zajišťuje lepší zředění během zatížení toxickými šoky, jestliže je kontinuálně míchaný reaktor užíván jako bioreaktor • systémy s rozptýlenou biomasou jsou náchylnější na toxické látky než systémy založené na biofilmu nebo granulovaném kalu • žádná ztráta biomasy • veškeré bakterie jsou zadržovány v reaktoru nehledě na jejich sedimentační/granulační vlastnosti, což může poskytnout lepší adaptaci na toxické sloučeniny • bioaugmentace specializovaných bakterií na specifické sloučeniny je jednodušší
Vysoká solnost	<ul style="list-style-type: none"> • snížení aktivity • dlouhá doba adaptace • rozklad biomasy • negativní dopad na stabilitu granulí 	<ul style="list-style-type: none"> • produkty bakteriálního rozkladu v důsledku výkyvů osmotického tlaku mohou negativně ovlivnit filtrační výkon • všechny bakterie jsou zadržovány v reaktoru nehledě na jejich sedimentační/granulační vlastnosti, což může poskytnout lepší adaptaci na solnost
Výkyvy v látkových a hydraulických dobách zdržení	<ul style="list-style-type: none"> • ztráta biomasy • pokles v čistícím výkonu • okyselení 	<ul style="list-style-type: none"> • žádné vymývání biomasy kvůli hydraulickým výkyvům • přípustné výkyvy v hydraulických dobách zdržení jsou nastaveny při instalaci membránové plochy, veškerý kal a pevné částice jsou zadrženy v reaktoru • podobná náchylnost k okyselení, výkyvy v organickém zatížení mohou podněcovat uvolňování EPS/SMP a zvýšit tak ucpávání membrán
Vápenatění	<ul style="list-style-type: none"> • ztráta aktivity kvůli vysrážení vápníku v/na granulích vyvolaného vysokou specifickou produkcí zásaditosti • cementace kalového lože • tvorba krystalů 	<ul style="list-style-type: none"> • menší tvorba krystalů a větší nukleace jemných sraženin díky podmínkám úplného smíchování • vápenatění na vločkovité biomase méně škodlivé díky nízké specifické produkci zásaditosti • vápník a jiné ionty mohou zvyšovat anorganické ucpávání membrán

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 ΔP (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 **nástřík**. [21][22][23]



Obr. 3 Přehled membránové separace ve vztahu k velikosti pórů, respektive zachycených / propuštěných částic (Příloha 1) [24]

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. **Technologické aplikace** tlakových separačních metod lze rozdělit do tří základních oblastí: dělení směsí, zahušťování a řízené uvolňování (např. v lékařství - léky, oxysličování; zemědělství - chemikálie a hnojiva aj.). [21][22][23]

Tab. 5 Hlavní membránové procesy [21]

Membránový proces	Mechanismus dělicího účinku	Hnací síla	Nejdůležitější aplikace
Mikrofiltrace (MF)	Sítový efekt	Tlakový rozdíl mezi oběma stranami membrány	Zadržování mikročástic dispergovaných v kapalinách
Ultrafiltrace (UF)	Sítový efekt		Separace vysokomolekulárních sloučenin z vodných roztoků
Nanofiltrace (NF)	Kombinace sítového efektu, mechanismu rozpouštění-difuze a odpuzování molekul s elektrickým nábojem		Změkčování vody; separace nízkomolekulárních organických sloučenin z vodných roztoků

	materiálem membrány		
Reverzní osmóza (RO)	Rozpouštění-difuze		Odsolování vody
Dialýza	Sítový efekt	Koncentrační rozdíl rozpuštěných látek mezi oběma stranami membrány	Hemodialýza
Elektrodialýza	Interakce mezi molekulami s elektrickým nábojem a membránami s elektrickým nábojem	Rozdíl elektrických potenciálů	Odsolování vody a vodných roztoků
Separace plynů a par	Rozpouštění-difuze	Tlakový rozdíl mezi oběma stranami membrány	Separace směsí plynů; odstraňování par ze vzduchu
Pervaporace	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 výrobcí 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. [21][22][23]

Pro výpočet intenzity toku permeátu bylo navrženo několik modelů založených jak na teoretických úvahách, tak na empirických zjištěních. Teoretické modely filtrace popisují na základě fyzikálních a matematických představ jevy odehrávající se v blízkosti membrány a z nich předpovídající procesní charakteristiky a intenzitu toku permeátu. Záleží však vždy na konkrétním systému (membrána, disperze, pracovní podmínky), který je určující pro výběr příslušného modelu tak, aby i se zjednodušujícími předpoklady co nejvíce odpovídal skutečnosti. [21]

Selektivitu membrány vůči směsi látek lze vyjádřit pomocí součinitele retence R . Při vlastním membránovém procesu je separovaná látka částečně nebo zcela zachycena, zatímco molekuly rozpouštědla (vody) procházejí volně membránou. Retence je dána rovnicí (1) [21]

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

kde: c_F ... je koncentrace separované složky ve vstupním proudu,

c_P ... koncentrace látky v permeátu.

Protože R je bezrozměrná veličina, nezáleží na jednotkách, ve kterých je koncentrace vyjádřena. Hodnota R se mění v rozmezí od 0% (separovaná látka i rozpouštědlo procházejí volně membránou) do 100% (úplná retence složky); v tomto případě se jedná o ideální semipermeabilní membránu.

Intenzita objemového toku permeátu je definována rovnicí (2) [21] jako objem tekutiny, který projde membránou za jednotku času, vztažený na jednotku plochy membrány

$$J_V = \frac{1}{A} \frac{dV_p}{d\tau} \quad (2)$$

kde: J_V ... je intenzita objemového toku permeátu [$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$],
 A ... separační plocha membrány [m^2],
 V_p ... objem permeátu [m^3],
 τ ... čas [s].

$$J_V = \frac{\Delta P - \Delta \pi}{\mu(R_m + R_r + R_{ir})} \quad (3)$$

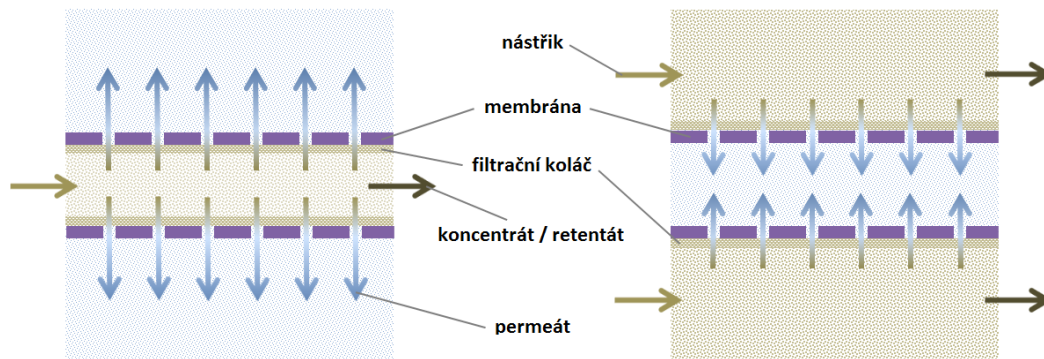
Rovnice (3) [21][25] je vyjádřením objemového průtoku membránou (permeate flux) podle základního modelu toku látek porézními membránami – modelu sériově řazených odporů, kde:

J_V ... je objemový (prů)tok membránou [$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$],
 ΔP ... transmembránový tlak TMP [Pa],
 $\Delta \pi$... osmotický tlak [Pa],
 μ ... dynamická viskozita [Pa.s],
 R_m ... vlastní odpor membrány [m^{-1}],
 R_r ... vratný odpor daný koncentrační polarizací [m^{-1}],
 R_{ir} ... nevratný odpor daný (částečným) ucpáním membrány [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“. [21]

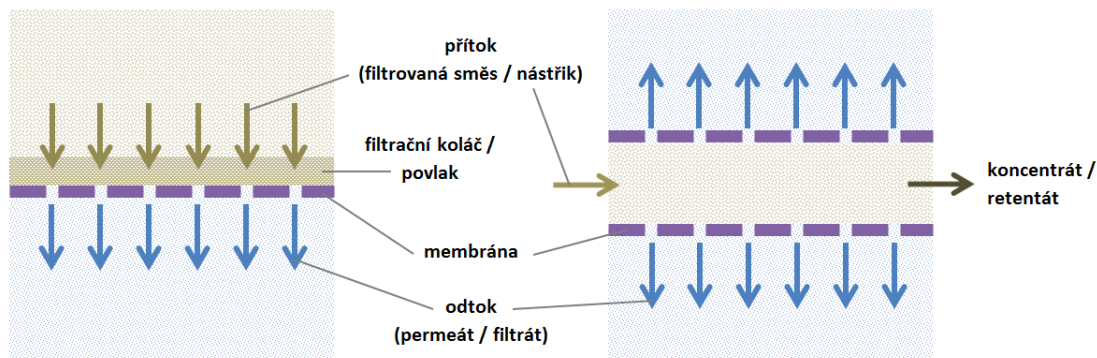
Průtok média membránou může být buď tlakově zevnitř ven (inside-out), nebo podtlakově zvenku dovnitř (outside-in). V prvním případě je zapotřebí vyšších rychlostí proudění kapaliny, což je energeticky náročnější. Tento způsob však umožňuje efektivní proplachování pevných látek díky charakteru cross-flow proudění a lepší zpětný proplach. V druhém případě dochází k menšímu

filtračnímu zatížení, protože je využívána větší filtrační plocha. Další výhodou je obecně snadnější čištění. [23][26]



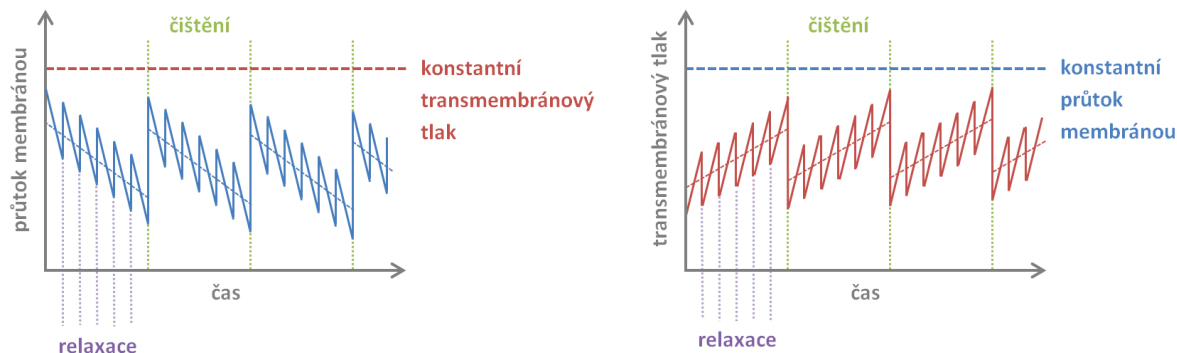
Obr. 4 Průtok membránou inside-out a outside-in [23][26] (úprava autor)

Jak je znázorněno na obrázku níže, 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. [23][26]



Obr. 5 Filtrace dead-end a cross-flow [23][26] (úprava autor)

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. [23][26][27]



Obr. 6 Filtrační režim s konstantním tlakem / konstantním průtokem [27] (úprava autor)

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. Jakmile je J_{crit} překročen, částice tvoří stojatou, konsolidovanou a agregovanou strukturu, která se obtížně rozbíjí a rozptýluje – tento proces je nazýván depolarizace. Nejčastěji používanou metodou zjištění, zda dochází k ucpávání, je sledování stability TMP při filtraci za určitého fluxu – tzv. skokovou / schodovou metodou. Zvyšující se TMP svědčí o větším odporu způsobeném nárůstem polarizační vrstvy, filtračního koláče či ucpáváním. Jinými slovy je zapotřebí vyvinout větších tlaků k překonání odporu a dosažení daného průtoku permeátu. Oblast s hodnotami nižšími než J_{crit} je také nazývána podkritickou oblastí. Filtrace v této oblasti je žádoucí, protože zde nedochází k ucpávání a membránový systém by teoreticky mohl být provozován v naprosto čistém režimu - komplexnost čištění a regenerace by tímto byla eliminována a celkový návrh zařízení by tak mohl být výrazně zjednodušen. Naopak provoz nad kritickým (prů)tokem způsobuje ucpávání / znečištění membrán. Dalším konceptem vztahujícím se k průtoku je **limitní flux** - hodnota průtoku membránou, nad kterou není možný trvalý provoz. Jedná se o maximální průtok, kterého lze při ustáleném provozu dosáhnout - odpovídá hodnotě kritického (prů)toku dosažené ve všech místech membránového povrchu. Hodnota může být shodná s J_{crit} . [25][28][29][30]

3.4 Počátky membrán, membránových modulů, bioreaktorů (MBR a AnMBR) pro čištění odpadních vod

V roce 1748 Abbé Nollet popsal první permselektivní membránu (membránu, která je pro některé látky více propustná než pro jiné) - jednalo se o pokusy na prasečím měchýři. V roce 1829 Thomas Graham experimentoval s rybím měchýřem - zabýval se difuzí plynů a objevil dialýzu (děj, při kterém přecházejí látky permselektivní membránou z prostředí s vyšší koncentrací těchto látek do prostředí s koncentrací nižší, přičemž větší molekuly přecházejí pomaleji než molekuly menší). V roce 1909 Martin Knudsen formuloval zákonitosti toku plynů malými póry – zákon Knudsenova toku říká, že počet molekul plynu, které projdou úzkým pórem v membráně, je úměrný tlaku plynu a nepřímo úměrný jeho molekulové hmotnosti. V roce 1855 publikoval Adolph Fick dvě rovnice popisující difuzi.

Podle prvního Fickova zákona je rychlost přenosu látky difuzí úměrná gradientu koncentrace v uvažovaném místě. Podle druhého Fickova zákona je rychlost změny koncentrace v daném místě, způsobená difuzí, úměrná změně gradientu koncentrace v tomto místě. Dalším důležitým milníkem byly rovnice osmotického tlaku od van't Hoffa (1887-8), který byl za tento přínos v roce 1901 oceněn Nobelovou cenou v oblasti chemie. Phillipe Kober položil v roce 1917 základy separace kapalin pomocí neporézní membrány – pervaporace. Federick Donnan publikoval v roce 1911 teorii popisující vztahy mezi rovnovážnou koncentrací iontů v roztoku a koncentrací iontů v gelové vrstvě s elektrickým nábojem. První palivový článek sestrojil v roce 1839 Sir William Robert Grove – elektřina však v té době neměla uplatnění, proto jeho vynález zapadl (až do šedesátých let 20. století, kdy se NASA rozhodla pro užití v rámci projektu Gemini). Začátkem šedesátých let 20. století Sidney Loeb a Srinivasa Sourirajan připravili první výkonné membrány ze syntetických polymerů, čímž významně ovlivnili vývoj reverzní osmózy (RO), UF, MF a separace plynů. První továrna na výrobu pitné vody z vody slané využívající jejich membrány byla postavena v Kalifornii. [21]

První komerční membránové bioreaktory (MBR) vyráběli Dorr-Oliver koncem šedesátých let 20. století – jednalo se o kombinaci UF a konvenčního procesu aktivovaného kalu (CASP – Conventional Activated Sludge Process) pro aplikaci čištění splaškových odpadních vod na lodi. Byly použity ploché ponorné membrány v side-stream konfiguraci. Koncem 80. a začátkem 90. let byly vyvíjeny další aktivity (japonskou vládou podnícený program recyklace vod) za účelem vytvořit ponorný HF UF MBR proces a také FS MF MBR od Kubota – toto vyústilo v pilotní projekt v Hiroshima v roce 1990 ($25 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$). V roce 1996 již bylo v Japonsku 60 čistíren Kubota pro čištění komunálních OV a později i OV průmyslových. Začátkem 60. let 20. století byl také patentován ponorný systém HF UF MBR a v roce 1993 byl na trh uveden ponorný modul Zenon (ZeeWeed ZW145). [23]

Během osmdesátých a počátkem devadesátých let 20. století bylo vynaloženo značné úsilí vyvinout komerčně životaschopný AnMBR - například MASR (Membrane Anaerobic Reactor System) od Dorr-Oliver - ADUF (Anaerobic Digestion Ultrafiltration) představený Stellenbosch University a Aqua Renaissance Project iniciovaným japonskou vládou. Tyto snahy byly nakonec neúspěšné kvůli kombinaci faktorů jako ekonomická nekonkurenceschopnost a technické obtíže - nestabilita reaktoru a ucpávání membrán. První komerčně úspěšný AnMBR se objevil až začátkem 21. století, kdy společnost Kubota v Japonsku vytvořila řadu demonstračních AnMBR zpracovávajících odpadní vody potravinářského průmyslu, destilek a hnojiva (průtoky $0,1-2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$). Na základě úspěchu těchto demonstračních projektů (demo-scale) byl v roce 2008 firmou ADI zkonstruován první plnohodnotný (full-scale) AnMBR využívající ponorné ploché membránové moduly Kubota. Jednalo se o čištění odpadních vod z výroby dressingů (průtok $12,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$). Nadále ADI postavili další dva plnohodnotné AnMBR. V roce 2008 byl také konstruován první demonstrační AnMBR s externími ultrafiltračními tubulárními membránovými moduly Pentair (dříve Norit) – pro zpracování syrovátky. Na základě tohoto úspěchu ve spolupráci společnosti Veolia (Biothane) a Pentair vyvinuly energeticky nenáročný AnMBR systém pod značkou Memthane. Více informací je uvedeno v kapitole 3.11. [23][31][32]

3.5 Výhody a nevýhody technologie

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 - podrobnější výčet je uveden v Tab. 6.

Tab. 6 Výhody, nevýhody / omezení, potenciály a výzvy / úkoly AnMBR [33] (úprava autor)

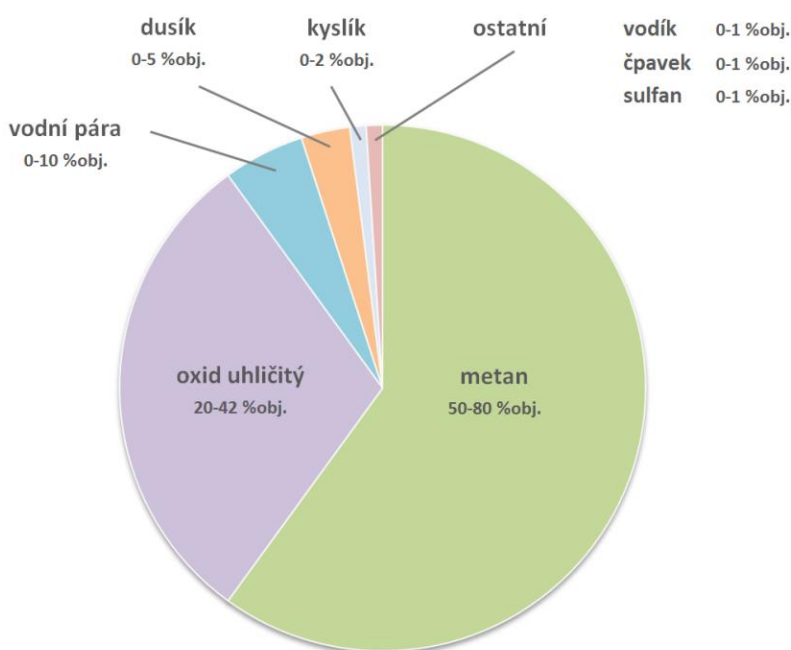
VÝHODY	NEVÝHODY / OMEZENÍ	POTENCIÁLY	VÝZVY / ÚKOLY
<ul style="list-style-type: none"> • produkce bioplynu (CH₄) – zdroj (uchovatelné) energie (bez nutnosti dodávat vzduch/kyslík jako u MBR) • vysoká kvalita odtoku (permeátu) • vysoká účinnost odstranění organických látek (CHSK) • vysoké stáří a koncentrace kalu v systému • schopnost pracovat s (velmi) vysokým zatížením biomasy – menší reaktory a prostorové nároky • nízká produkce kalu – snížení provozních nákladů, minimalizace event. toxického působení složek OV • retence pomalu rostoucích metanogenních mikroorganismů v systému – vyšší produkce bioplynu, zlepšení energetické bilance • retence specifických mikroorganismů pro danou aplikaci – odstraňování specifických polutantů • rychlejší náběh technologie v porovnání s konvencí 	<ul style="list-style-type: none"> • zanášení / ucpávání membrán – nejvýznamnější faktor • nutnost pravidelného čištění membránových modulů (mechanické, chemické...) • nedostatečné odstraňování nutrientů - nutnost dočištění • vyšší investiční náklady (?) • složitější provoz systému – vyšší nároky na údržbu a obsluhu (?) • horší filtrovatelnost anaerobního kalu – rychlejší ucpávání membrán, více energie na dosažení požadovaného hydraulického výkonu 	<ul style="list-style-type: none"> • vhodné především pro čištění průmyslových OV • důraz na opětovné využívání vody, možnost úspor vody v rámci procesů • rostoucí potenciál u specifických výroben a provozů • adaptace biomasy na velmi specifické podmínky • 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.) • vhodné především při koncentraci CHSK v přítoku více jak 2 g.l⁻¹ • až 98% CHSK v přítoku do bioplynu • odtok z AnMBR lze dále využívat, recyklace surovin • modulární systém umožňující snadnější budoucí rozvoj a úpravy 	<ul style="list-style-type: none"> • dosažitelný dostatečný hydraulický výkon (flux) • aplikovatelnost je dána technicko-ekonomickou bilancí, energetickou bilancí • pochopení rozdílů zanášení mezi MBR a AnMBR – provozní podmínky, strategie čištění, aditiva... • možnost začlenění i odstraňování nutrientů • možnosti dočištění/využití odtoku z AnMBR • zlepšení výtěžnosti metanu, především při nižších provozních teplotách

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. [34][35][36][37][38][39]

3.6 Bioplyn

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_4) a oxidu uhličitého (CO_2). Literatura uvádí poměrné zastoupení obou hlavních složek v širokých mezích. Procentuální složení závisí na mnoha parametrech, především kvantitě a kvalitě organických látek (přítoku), typu reaktoru, dobách zdržení, skladbě mikroorganismů, obsahu sušiny, teplotě, pH aj. Při anaerobní digestaci vzniká kromě bioplynu ještě tzv. digestát (tuhý zbytek po vyhnutí, lze za určitých podmínek dále využívat) a fugát (tekutý zbytek po vyhnutí). Výhřevnost bioplynu s obsahem 55-70% metanu leží v rozsahu $18\text{-}26 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ neboli $5\text{-}7,2 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$. [40][41][42][43][44][45]

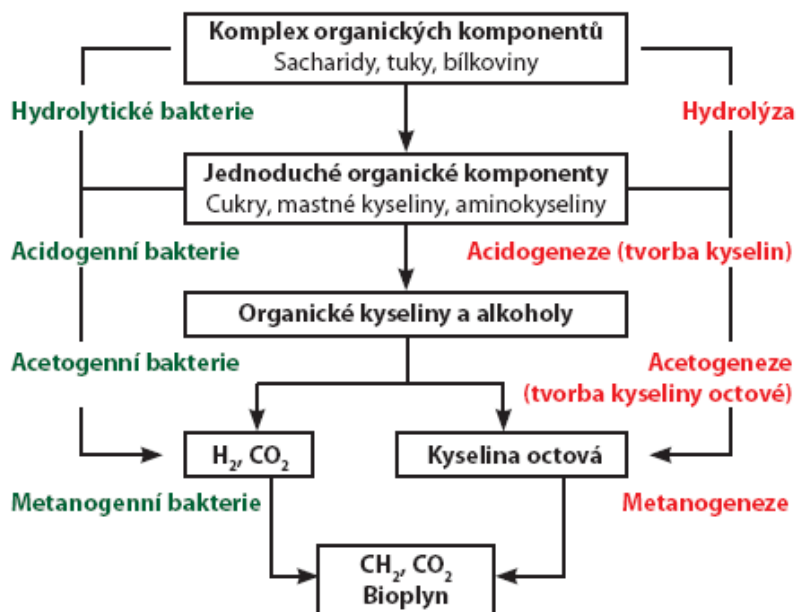
$$1 \text{ kg CHSK}_{odstr.} \approx 0,35 \text{ m}^3 \text{ CH}_4; 1 \text{ m}^3 \text{ BP} - 60\% \text{ CH}_4 \approx 0,6 \text{ kWh} \quad (4) [46]$$



Obr. 7 Běžné složení bioplynu [40][41][42][47] (úprava autor)

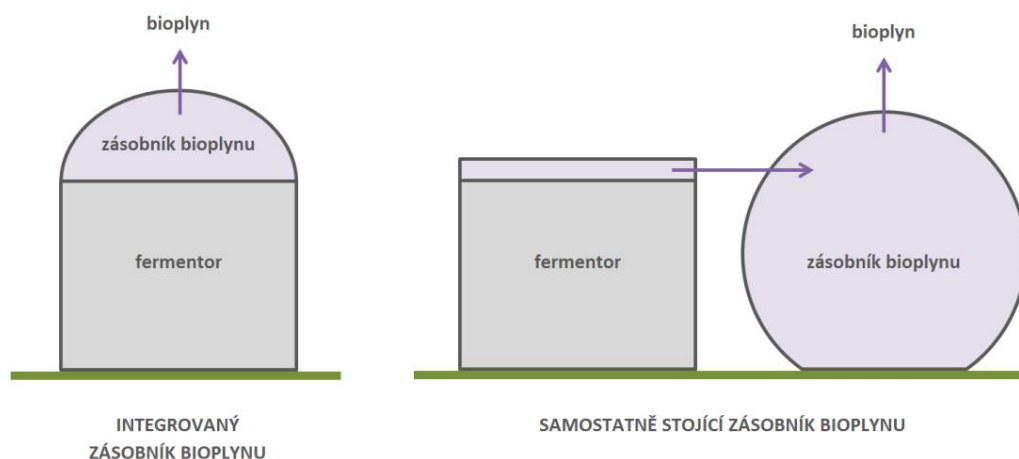
Bioplyn vzniká rozkladem organických látek v anaerobním prostředí. Tento proces se dá v podstatě rozdělit do čtyř fází. Na každém stupni procesu se podílejí odlišné mikroorganismy s rozličnými enzymy, které vzájemně spolupracují v těsné blízkosti a tvoří jistý druh symbiózy. V prvním kroku, fáze - hydrolýzy - jsou štěpeny sacharidy na jednodušší cukry, tuky na mastné kyseliny a bílkoviny na aminokyseliny. Produkty hydrolýzy jsou ve fázi tvorby kyselin (acidogeneze) odbourány na organické kyseliny a nižší alkoholy. Fáze tvorby kyseliny octové (acetogeneze) představuje spojovací článek k tvorbě metanu. Zde jsou produkty fáze tvorby kyselin přeměněny na kyselinu

octovou, oxid uhličitý a vodík, které jsou výchozími substráty pro tvorbu metanu (metanogeneze). [40][41][42]

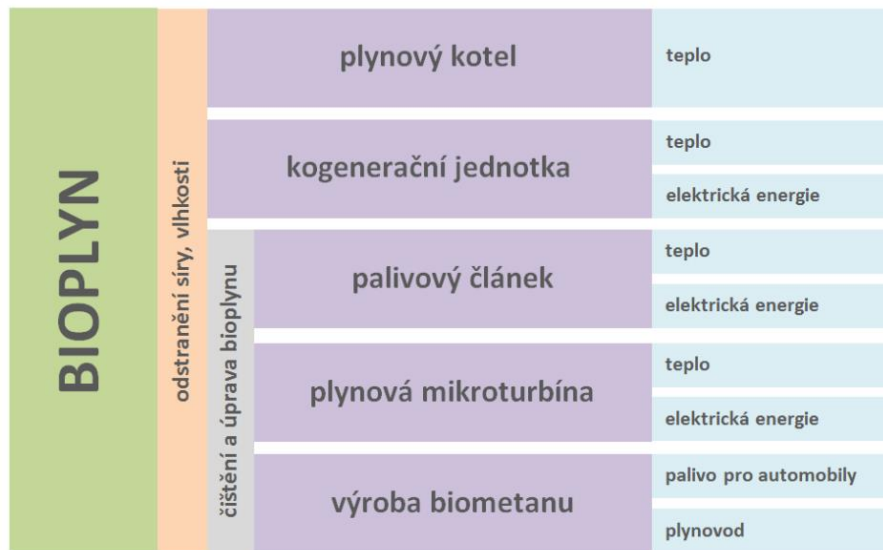


Obr. 8 Schéma anaerobního rozkladu za tvorby bioplynu [48]

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 (neutralizace v přípravné nádrži pomocí příslušných chemikálií). [40][41][45][49][50][52][58]



Obr. 9 Zásobníky bioplynu [51] (úprava autor)



Obr. 10 Využití bioplynu [47] (úprava autor)

Reakční rychlost a produkce bioplynu je velmi závislá na teplotě a provoz/proces lze zařadit do čtyř hlavních skupin: [42]

- 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

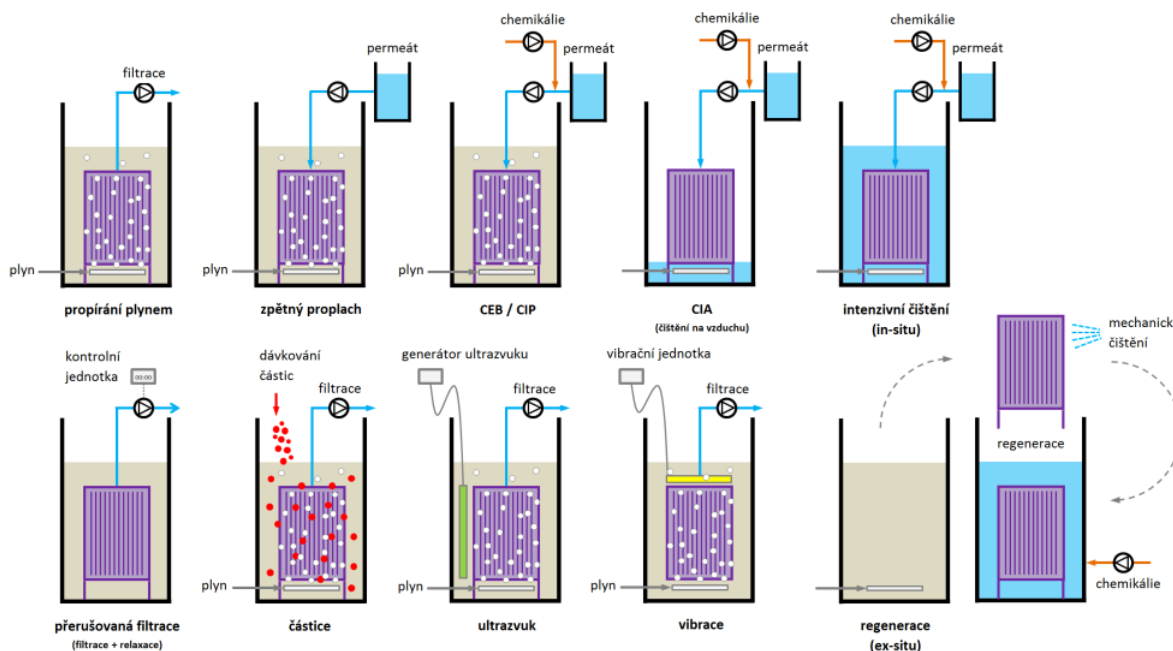
3.7 Možnosti využití permeátu

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. [20][21][23][34][36][38][59]

3.8 Ucpávání membrán a způsoby prevence / čištění

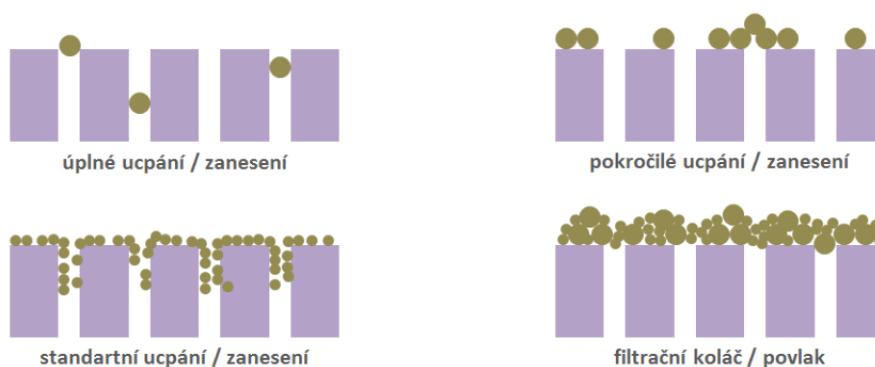
Ucpávání membrán zůstává hlavní nevýhodou těchto pokročilých procesů čištění OV, protože zvyšuje provozní náklady (čištění, energie), snižuje průtok membránou a její životnost. Proto byl tento nežádoucí jev v posledních letech z různých pohledů rozsáhle zkoumán [19][20][28-30][36][39][53-57][60-71], 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. 11 uvedeny i způsoby pokročilé - přestože některé z nich mají potenciál, v současné době jsou z různých důvodů nepoužitelné (náklady, nedostatečné ověření aj.).



Obr. 11 Obecné způsoby omezení ucpávání/zanášení membrán (mechanické a chemické) [60][71] (úprava autor)

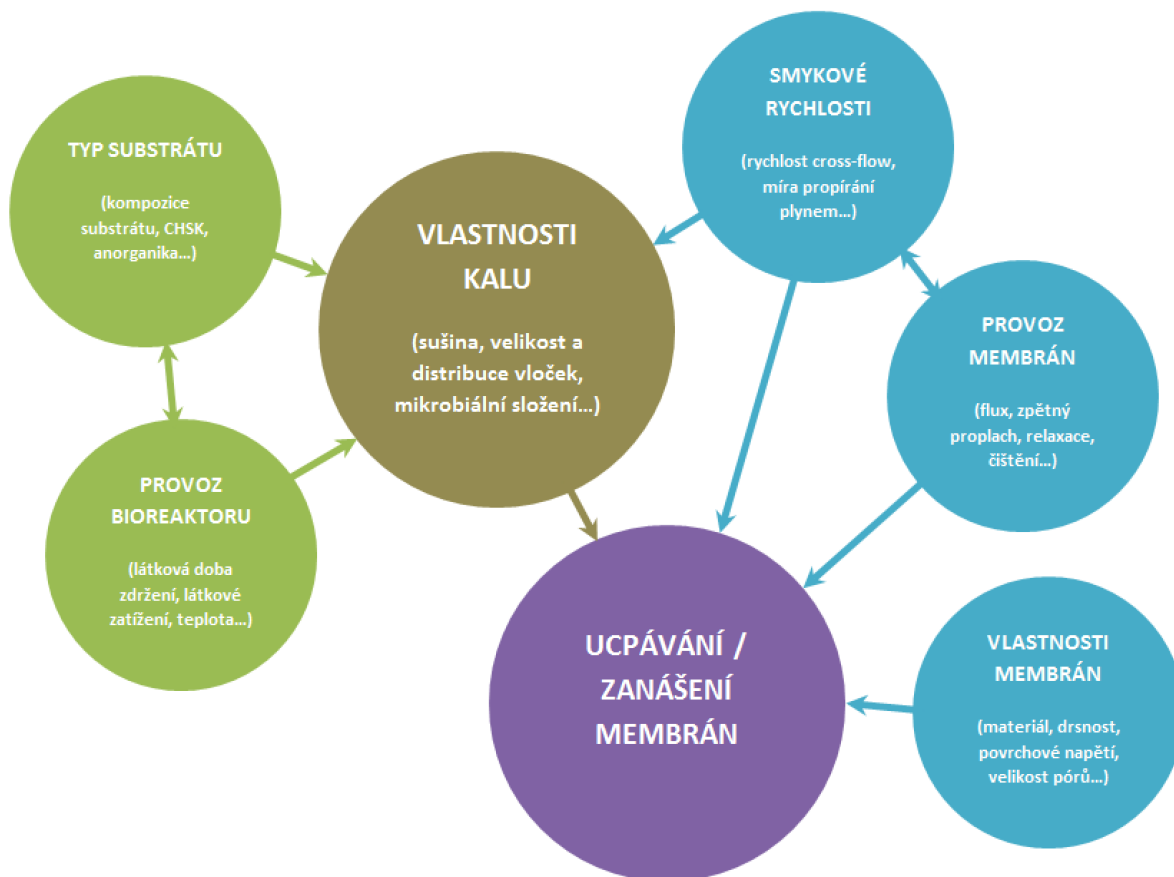
Existuje celá řada faktorů ovlivňujících životnost membránových modulů souvisejících s konstrukcí membrán, návrhem systému a způsobem provozování. Zhoršení filtračních vlastností lze zařadit do dvou obecných kategorií - jednou je samotná degradace membrány z mechanických, chemických nebo biologických příčin a druhou je náchylnost k ucpávání.



Obr. 12 Druhy ucpávání / zanášení membrán [62] (úprava autor)

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.

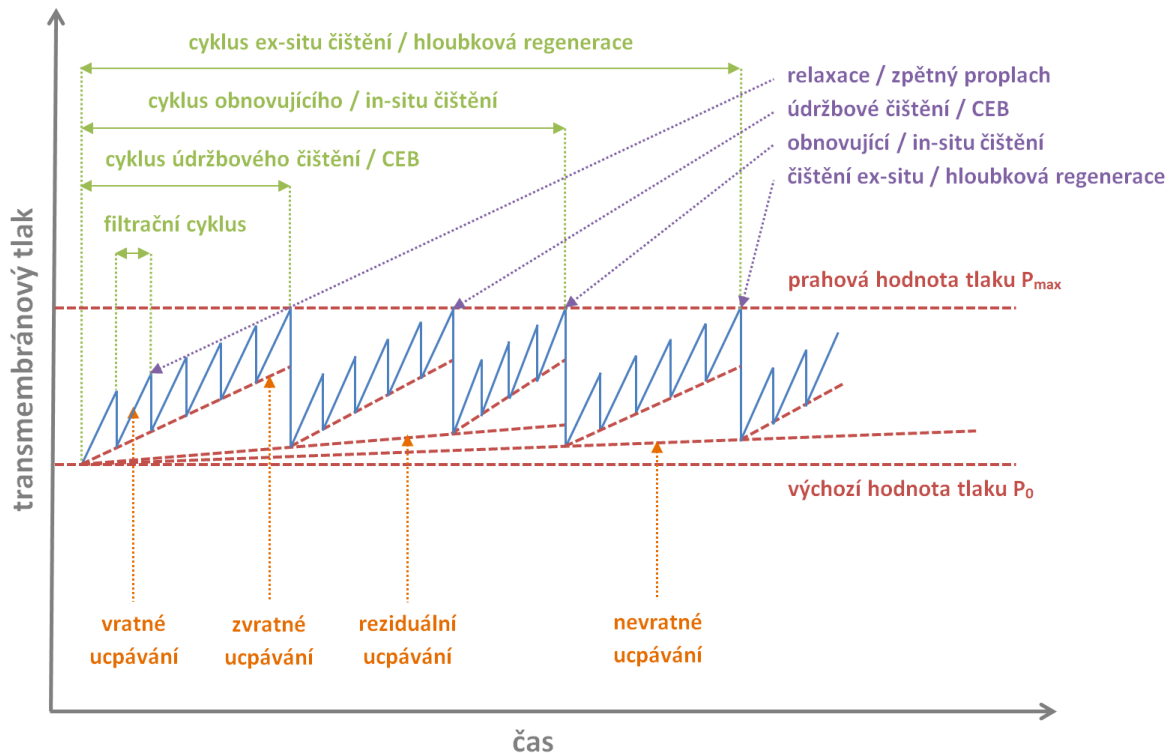
K zajištění stabilního odtoku je nutné membrány v pravidelných intervalech (dle daných podmínek) čistit. S rostoucí kvalitou předčištění se prodlužuje interval mezi čištěním a regeneracemi.



Obr. 13 Faktory ovlivňující ucpávání / zanášení membrán v AnMBR [20][64] (úprava autor)

Mezi hlavní způsoby prevence ucpávání membrán u (An)MBR patří (kromě způsobů předčištění) propírání plynem (u AnMBR nejčastěji vyprodukovaným bioplynem). 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). [19][20][60][61][64]

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). [60][71]



Obr. 14 Ucpávání a čištění membrán během dlouhodobého provozu reaktoru [60] (úprava autor)

3.9 Membrány a membránové moduly

Základem každé membránové technologie je samotná membrána, případně membránový modul. Pro účely AnMBR se nejčastěji využívá filtračních separačních procesů, u kterých je základní hnací silou tlakový gradient ΔP . Membrána tvoří polopropustnou bariéru mezi dvěma fázemi - částicemi a kapalinou. Zachycená část se nazývá retentát (koncentrát) a fáze procházející membránou permeát (filtrát). Základní třídění těchto membránových procesů se odvíjí od velikosti pórů a potřebného transmembránového tlaku (TMP, bar) umožňujícího separaci, který vzrůstá se zmenšujícími se póry.

Čtyři klíčové procesy tlakové membránové separace jsou mikrofiltrace (MF), ultrafiltrace (UF), nanofiltrace (NF) a reverzní osmóza (RO), přičemž u (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). Pro účely projektu byly zvoleny ploché ultrafiltrační membránové moduly. [21][23][26]



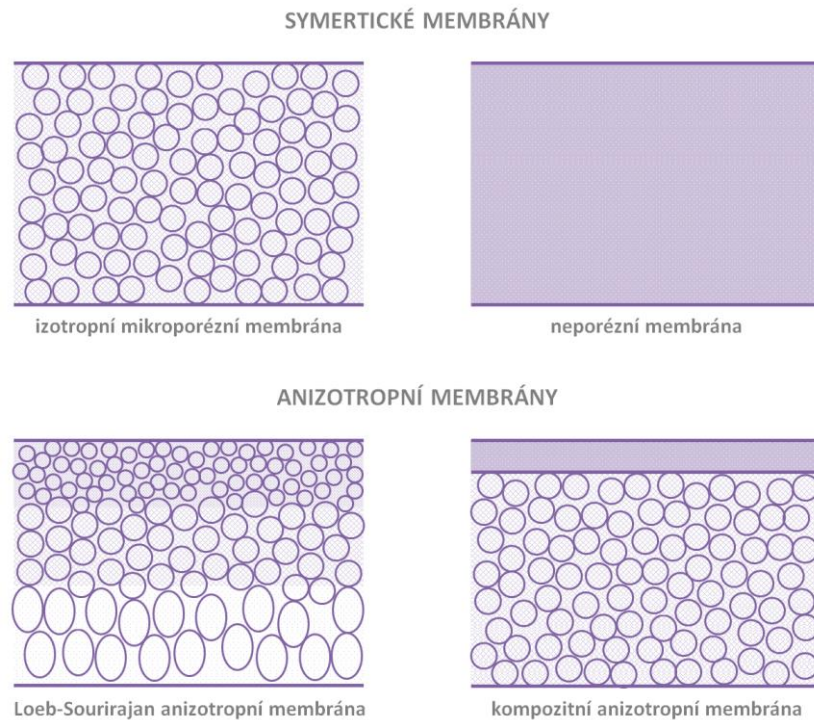
Obr. 15 Příklady komerčních membránových modulů –
deskové (Microdyn-Nadir BIO-CEL), tubulární (Pentair X-Flow), dutá vlákna (GE ZeeWeed) [72-74]

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. Typickými materiály používanými k tvorbě organických membrán jsou syntetické polymery: PVDF (PolyVinylidene DiFluoride), PES (PolyEtherSulfone), PS (PolySulfone), PE (PolyEthylene), PP (PolyPropylene) aj. Anorganické membrány bývají nejčastěji keramické či kovové. Na rozdíl od levnějších organických membrán mají membrány anorganické lepší mechanickou, teplotní a chemickou odolnost. [23][26][27][55][81]

Membrány mohou na základě svých chemických vlastností vykazovat různě silné hydrofilní (snadno smáčitelné) nebo hydrofobní (vodoodpudivé) vlastnosti. Podle povrchového napětí má membrána různou tendenci k ucpávání. Obecně platí, že membránové materiály nesou záporný náboj, nebo jsou tak upraveny, protože organické látky ve vodě při neutrálním pH mají také záporný náboj, a tím pádem dochází ke vzájemné odpudivosti.

Membrány mohou být porézní nebo neporézní. Z organických látek mohou být vyráběny pouze membrány porézní. Póry mohou mít stejnou (symetrické membrány) nebo různou velikost (asymetrické membrány). U asymetrických membrán není velikost pórů v řezu konstantní – na povrchu se nachází velice tenká vrstva s menšími póry, která udává separační vlastnosti a permeabilitu, ve směru filtrace pak materiál tvoří spíše podpůrnou funkci.

Dále lze membrány dělit podle množství použitých materiálů. Buď jsou utvořeny z jednoho materiálu, nebo se jedná o membrány kompozitní. Kompozitní membrány jsou, stejně jako je tomu u asymetrických membrán, složeny z více vrstev plnicích rozdílné funkce; vrstvy jsou však vyrobeny z několika materiálů. Díky nosné vrstvě může být svrchní vrstva o mnoho tenčí, což přispívá k žádoucímu lepšímu průtoku membránou (menší odpor). Zatímco při nanofiltraci a reverzní osmóze jsou používány membrány neporézní, mikrofiltrační a ultrafiltrační membrány jsou porézní a dochází na nich k podobnému dělení jako na sítu. [23][26]



Obr. 16 Znázornění základních struktur membrán (průřez) [23] (úprava autor)

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
- nízkooenergetické požadavky systému

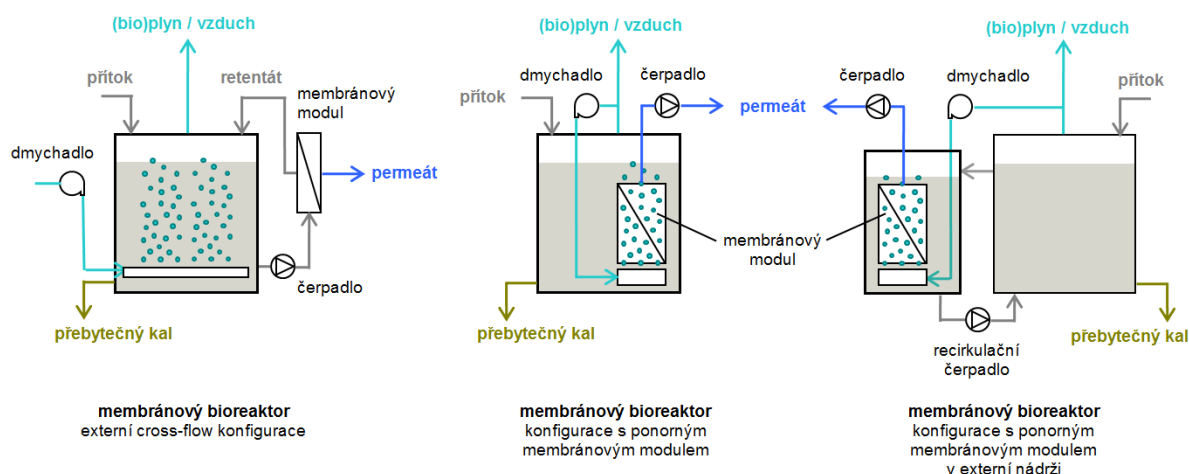
Žádná konfigurace (FS, HF, TM) však není schopna plně uspokojit všechny výše uvedené požadavky.

Na současném trhu (nejen) ponorných membránových modulů existuje celá řada výrobců/výrobců/dodavatelů. Jejich vhodnost použití v anaerobních bioreaktorech však až na výjimky (viz kapitola 3.11) zůstává předmětem zkoumání, respektive pouze několik výrobců má v této oblasti prokázané zkušenosti a tuto aplikaci nevyklučují/doporučují (především z hlediska konstrukce, použitých materiálů, odolností apod.).

3.10 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. 17 Základní konfigurace membránových bioreaktorů [75] (úprava autor)

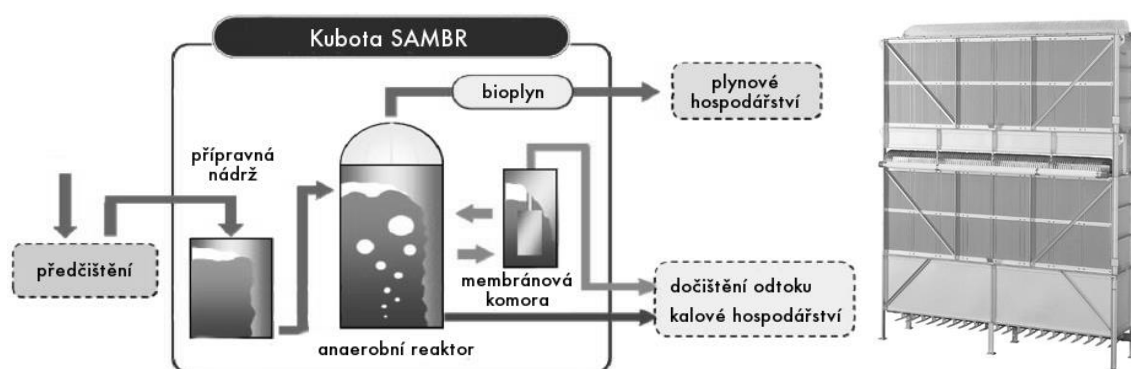
V rámci výzkumného úsilí byl jako nejvhodnější koncept pro pilotní AnMBR zvolen membránový bioreaktor s ponorným membránovým modulem v externí nádrži. Tato konfigurace sice obecně představuje vyšší investiční i provozní náklady (komplikovanější systém), ale na druhou stranu umožňuje lepší optimalizaci provozu - anaerobní reaktor / membránová separace.

3.11 Komerční (full-scale) AnMBR, výzkumné aktivity

3.11.1 Kubota Submerged Anaerobic Membrane Bioreactor

Kubota Corporation [76] je průkopníkem a předním dodavatelem membránových systémů pokročilého zpracování odpadních vod [23]. Jejich cílem je poskytovat vysoce kvalitní a spolehlivé čisté technologie, které zároveň zůstávají jednoduché a snižují provozní náklady. Kubota Submerged Membrane Unit [77][78] je již od 90. let 20. století osazován na komunálních i průmyslových čistírnách odpadních vod po celém světě jako součást membránových bioreaktorů (MBR). Společnost

Kubota vybuodovala již řadu plnohodnotných (full-scale) AnMBR [79], resp. dle jejich označení a terminologie SAMBR (Submerged Anaerobic Membrane Bioreactor - anaerobní membránový reaktor s ponorným membránovým modulem) či Membrane Methane Fermentation Unit (membránový metanový fermentační jednotka). Dle jejich vlastních slov [80] je tento systém vhodný především pro potravinářský průmysl. Provozní teplota je obvykle okolo 55°C, tudíž se řadí k termofilním procesům. Ploché ponorné membránové moduly jsou založeny na membráně z chlorovaného polyetylenu s maximální velikostí pórů 0,4 μm (průměr 0,2 μm). Výrobce nabízí celou škálu membránových modulů s filtrační plochou od 8 do 580 m² (standardně, značná modularita).

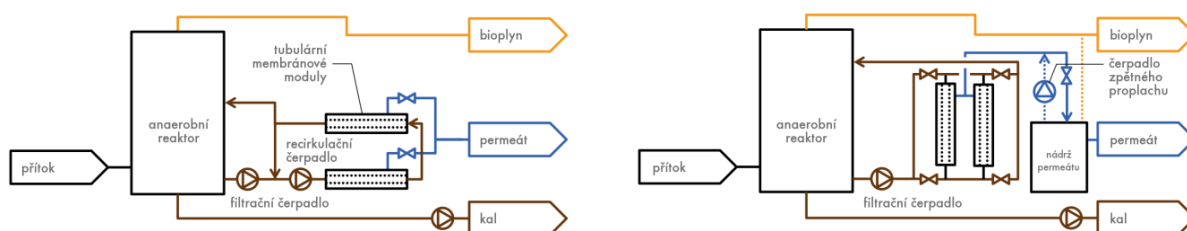


Obr. 18 Kubota SAMBR – schéma procesu a membránový modul [80][78]

3.11.2 Veolia Biothane Anaerobic Technology Memthane 2.0 a Pentair Anaerobic MBR

Jak bylo zmíněno již v kapitole 3.4, spolupracovaly společnosti Veolia Water Technologies [82] a Pentair [83] (první demonstrace v roce 2008) na vývoji komerčního AnMBR, proto jsou nadále společně uvedeny informace dostupné od obou výrobců. Jen v letech 2012 až 2015 bylo realizováno 7 průmyslových instalací s filtračními rychlostmi v rozmezí 15 až 40 l.m⁻².h a průtoky 15 až 174 m³.h⁻¹. Provozní teploty se pohybují v mezofilním rozmezí. [84]

Dle Veolia a Pentair je Memthane [85] ideálním řešením pro nakládání s vysoce koncentrovanými odpadními vodami s hodnotami CHSK 5-250 000 mg.l⁻¹ (jako např. mléčná syrovátka), bioetanolová zařízení, přítoky obsahující tuky/oleje/mastnoty, škrobárny apod.

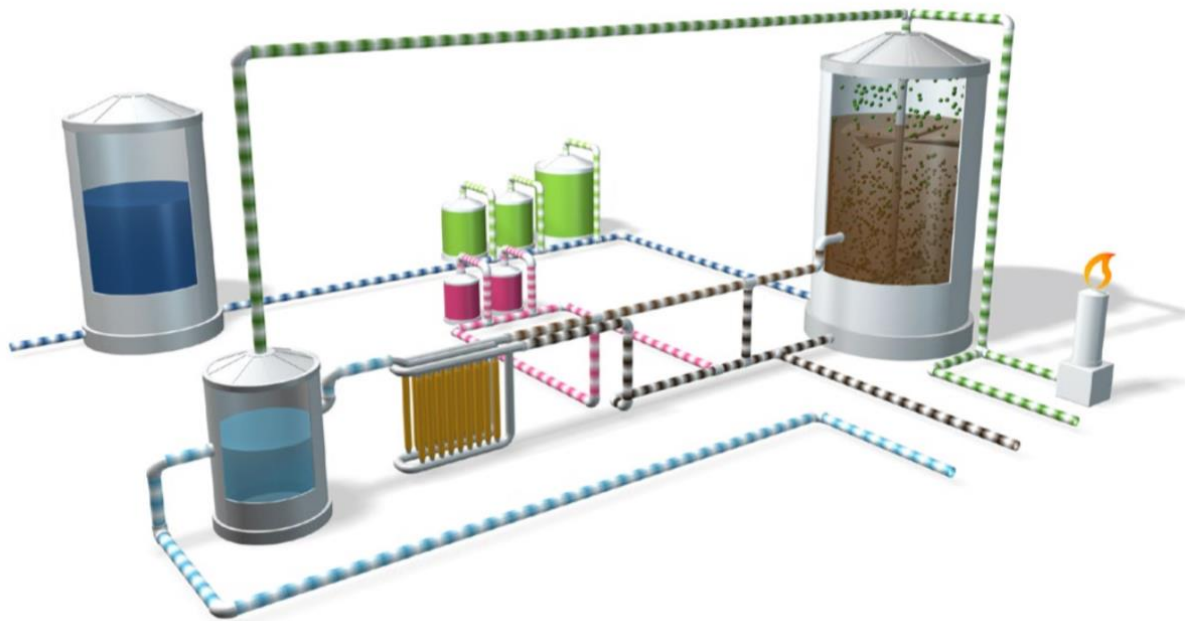


Obr. 19 Veolia-Pentair AnMBR – sériová a paralelní konfigurace tubulárních membránových modulů [84]

Po vyrovnání jsou
odpadní vody
s vysokým zatížením
upraveny dle potřeby.

Přítok je dávkován do anaerobního
reaktoru kde jsou organické látky
přetvořeny na bioplyn s vysokou
výtežností.

Snadnou údržbu
membrán zajišťuje
integrováný systém
čištění.



Po anaerobním čištění
odděluje UF
membránová jednotka
permeát od biomasy.

UF permeát neobsahuje nerozpuštěné
látky, má nízkou koncentraci BSK a je
vhodný k vypouštění nebo různým
způsobům znovužití. Podle potřeb je
možné zařadit další technologie ke splnění
požadavků na jakost procesních vod.

Většina biomasy je
vracena zpět do
bioreaktoru, zatímco
malé množství
přebytečné po
odvodnění odstraněno.

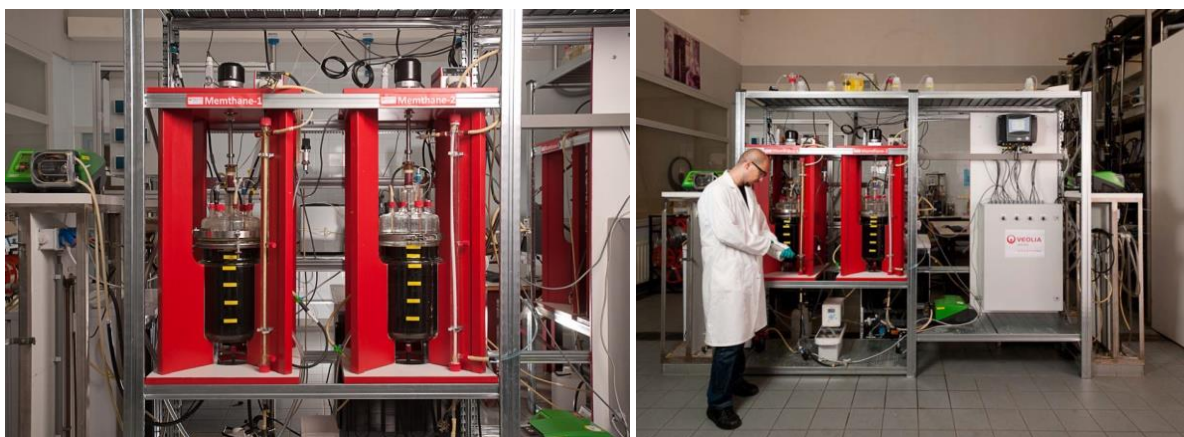
Obr. 20 Veolia Memthane 2.0 – schéma procesu [86]

Tubulární ultrafiltrační membránové moduly Pentair X-Flow jsou umístěny mimo reaktor a tím umožňují jednoduchou údržbu. Paralelní konfigurace přináší oproti sériové řadě výhod, jako např. vyšší filtrační rychlosti (potažmo menší počet potřebných membránových modulů, a tím mj. finanční úspory) a zpětný proplach (tudíž menší závislost na kvalitě předčištění a současné plné využití filtrační plochy membránových modulů). [84]



Obr. 21 Veolia Memthane – příklad a membránové moduly Pentair X-Flow [86][84]

Biothane zájemcům nabízí řadu testovacích a konzultačních služeb, včetně pilotních / demonstračních jednotek. [86]



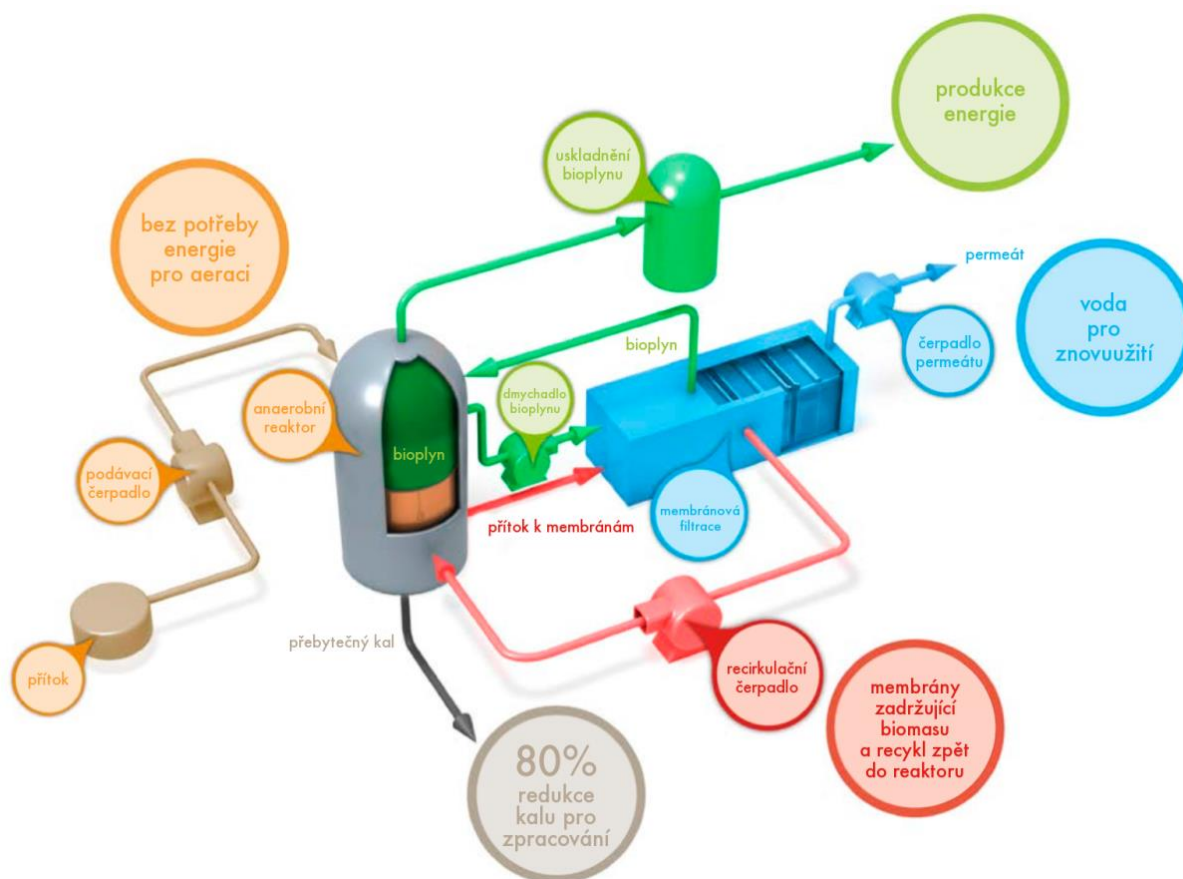
Obr. 22 Pilotní / demonstrační jednotka Veolia Memthane [87][86]

3.11.3 GE AnMBR

GE v roce 2014 uvedli na trh AnMBR [88] s membránami ZeeWeed 500 [89] – ponorné ultrafiltrační moduly tvořené PVDF dutými vlákny s velikostí pórů $0,04 \mu\text{m}$ a maximální provozní teplotou 40°C . Dle dostupných informací GE s více než dvěma desetiletími zkušeností s konstrukcí membrány optimalizovali ZeeWeed 500 tak, aby zlepšila průtok, dosáhla větších hodnot permeability, snížila spotřebu energie a prodloužila životnost membrány. AnMBR od společnosti GE je ideálním řešením pro průmyslové odpadní vody s vysokými hodnotami BSK a CHSK vyžadujícími vyšší provozní náklady v případě aerobního čištění [90].



Obr. 23 GE AnMBR – jednotka a membránový modul ZeeWeed 500 [88][89]



Obr. 24 GE AnMBR – schéma procesu [90]

3.11.4 Výzkumné aktivity - směry a trendy

AnMBR se s rostoucím počtem full-scale referencí stávají ověřenou a průmyslově atraktivní technologií [20][31][53][79][81][84][85][88][91-96]. Velký potenciál nabízí především v kombinaci

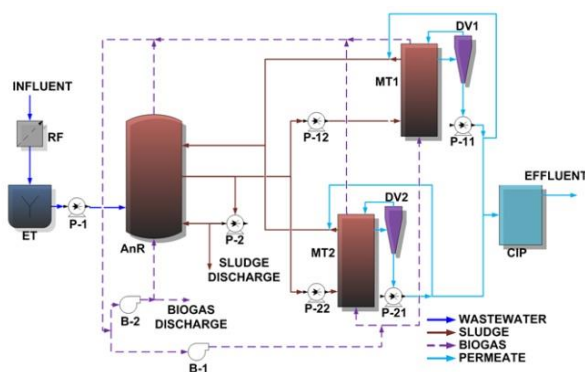
s dalšími technologiemi. Vývoj samotných membrán neustále pokračuje [97-99], což má za následek snižování investičních / provozních nákladů. Do budoucna by se tak (díky svým přínosům a naopak potlačování negativ) rozšířenost anaerobních membránových aplikací mohla přiblížit již dobře zavedeným aplikacím aerobním [100].

Mezi **hlavní proudy výzkumných aktivit** v oblasti anaerobních membránových technologií v současnosti patří: [101-104]

- 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.

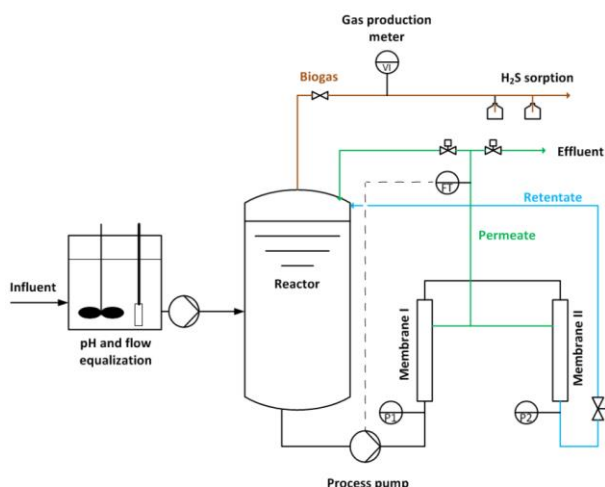
Níže je pro příklad uvedeno několik testovacích zařízení různých velikostí a konfigurací.

Na Obr. 25 je pilotní AnMBR s ponornými membránovými moduly tvořenými dutými vlákny Puron (Koch Membrane Systems) [105]. Jednotka se skládá z anaerobního reaktoru o objemu 1,3 m³, dvou 0,8 m³ membránových komor (každá z nich obsahuje 1,8 m dlouhé HF UF membránové moduly s celkovou filtrační plochou 30 m²), mechanického předčištění v podobě rotačního filtru s oky velikosti 0,5 mm a 0,3 m³ přípravné nádrže. [91]



Obr. 25 Pilotní AnMBR s ponornými membránovými moduly tvořenými dutými vlákny (Puron, KMS) [91]

Následující (Obr. 26) poloprovozní AnMBR je konfigurace side-stream s osazenými tubulárními keramickými membránami. [106-7]



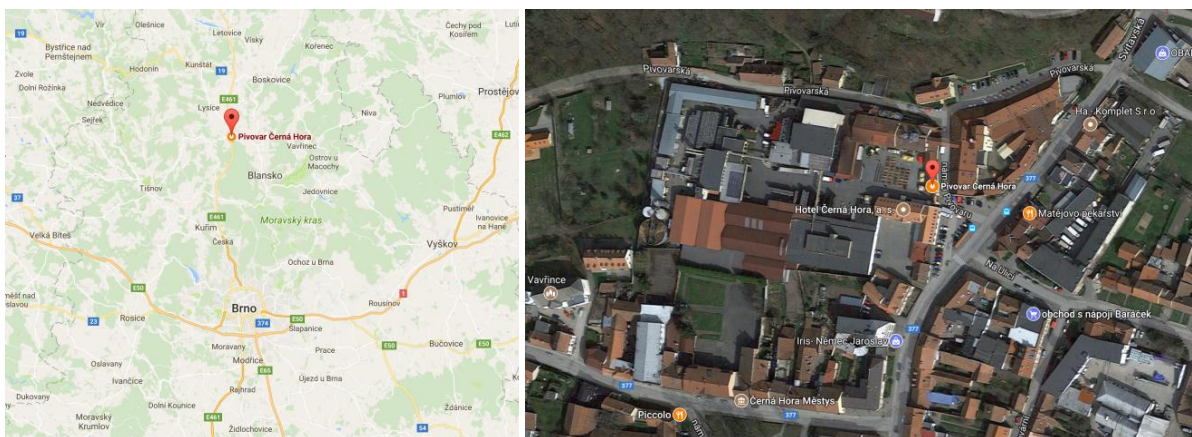
Obr. 26 Poloprovozní side-stream AnMBR pro čištění farmaceutických OV [107]

Pilotní AnMBR tuzemské firmy ASIIO, spol. s r.o. [108], která v rámci projektu „Inovativní technologie pro znovuvyžití vody a jejich demonstrace v reálných aplikacích“ s pracovním názvem DEMOWARE [109][110] (řešen s finanční podporou sedmého rámcového programu EU v letech 2014-2016) byla zodpovědná za návrh a dodávku poloprovozního anaerobního membránového reaktoru (objem reaktoru 700 l, ponorný plochý polymerní membránový modul s filtrační plochou 0,6 m²), jehož výstupem měla být voda pro zavlažování (Obr. 27 vlevo). Druhý AnMBR (Obr. 27 vpravo) je výsledkem projektu „Recyklace energie ze splaškových odpadních vod v anaerobních membránových reaktorech v prostředí střední Evropy“ s pracovním názvem AnMem [111] (řešen s finanční podporou Technologické agentury České Republiky v rámci programu pro podporu aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje EPSILON [112] v letech 2015 - 2017).



Obr. 27 Pilotní AnMBR tuzemské firmy ASIIO, spol. s r.o. [110][111]

v roce 2012 potom k otevření nové spilky s 10 otevřenými kvasnými káděmi. Pivovar každý rok investuje nemalé prostředky do výrobních zařízení. V nedávné době uvedl do provozu dva nové roboty na (de)paletizaci sudů a přepravek, které nahradily těžkou manuální práci, instaloval již třetí linku na stáčení sudů nebo vybudoval linku na stáčení 5l soudků. V roce 2012 se pivovar zařadil mezi české inovátory ve výrobě nealkoholických nápojů. Nejprve zakoupil nové zařízení, umožňující vyrábět limonádové sirupy z bází přímo v pivovaru. [114][115]



Obr. 29 Pivovar Černá Hora [116]

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. Informace následujících podkapitol (4.1.X) vycházejí z několika absolvovaných exkurzí a provozovatelem poskytnutých materiálů (projektová dokumentace, provozní řád).

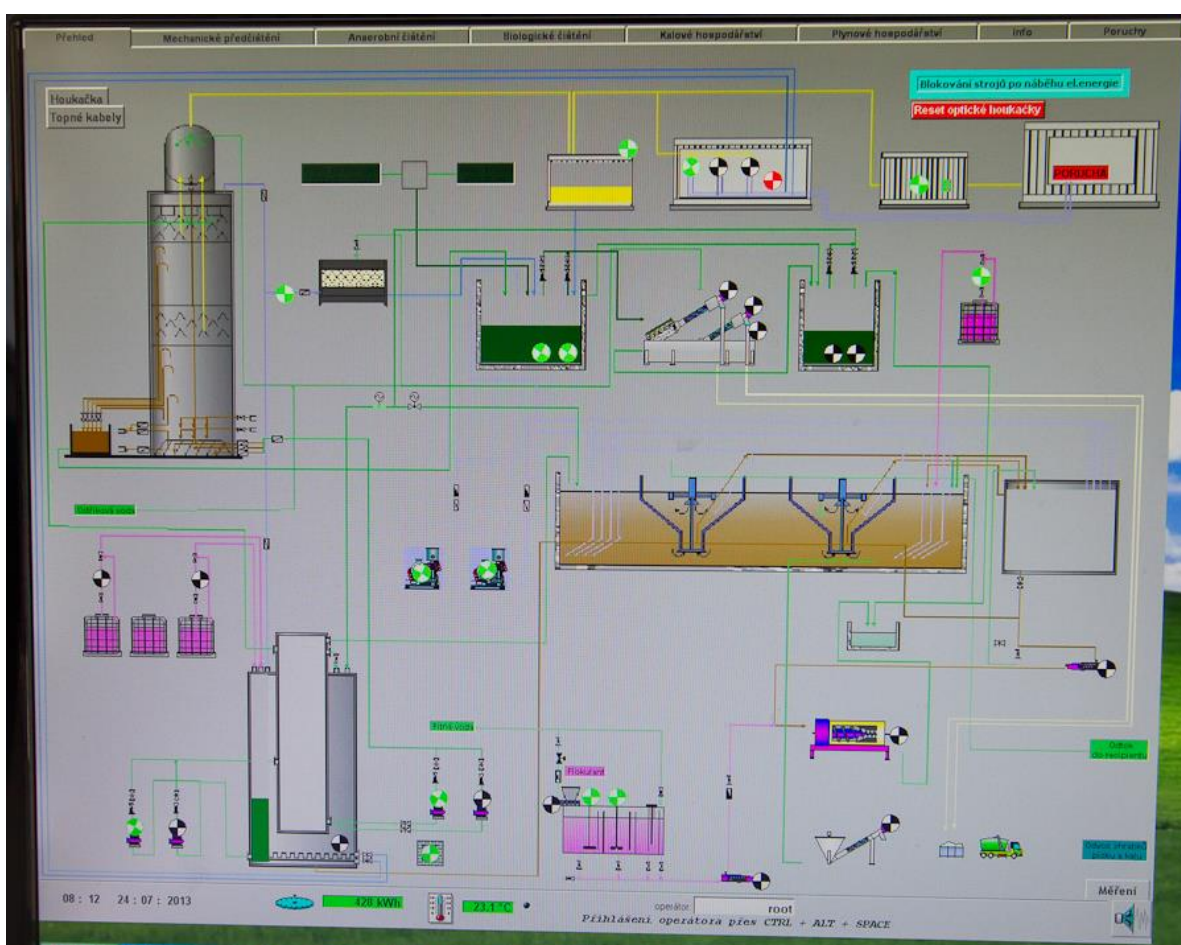
Tab. 7 Kvalita OV ČOV Pivovar Černá Hora na přítoku (data poskytl provozovatel)

PŘÍTOK 30. 3. 2016	AOX	BSK ₅	CHSK	P _c	NL	RL	RAS	pH
	[mg.l ⁻¹]	[mg.l ⁻¹]	[mg.l ⁻¹]	[mg.l ⁻¹]	[mg.l ⁻¹]	[mg.l ⁻¹]	[mg.l ⁻¹]	[-]
	0,096	1 720	3 140	4,27	413	1 790	1 180	6,06
	anorg. N	dusič. a dusit. N	dusičnany	N dle Kjeldala	dusitany	amoniak. N	dusičnan. N	dusitan. N
	[mg.l ⁻¹]	[mg.l ⁻¹]	[mg.l ⁻¹]	[mg.l ⁻¹]	[mg.l ⁻¹]	[mg.l ⁻¹]	[mg.l ⁻¹]	[mg.l ⁻¹]
	0,5	0,4	0,27	48,5	0,005	0,37	0,06	0,002

PŘÍTOK 9. 8. 2016	AOX	BSK ₅	CHSK	P _c	NL	RL	RAS	pH
	[mg.l ⁻¹]	[mg.l ⁻¹]	[mg.l ⁻¹]	[mg.l ⁻¹]	[mg.l ⁻¹]	[mg.l ⁻¹]	[mg.l ⁻¹]	[-]
	0,069	938	1 740	4,41	253	2 370	1 790	7,23
	anorg. N	dusič. a dusit. N	dusičnany	N dle Kjeldala	dusitany	amoniak. N	dusičnan. N	dusitan. N
	[mg.l ⁻¹]	[mg.l ⁻¹]	[mg.l ⁻¹]	[mg.l ⁻¹]	[mg.l ⁻¹]	[mg.l ⁻¹]	[mg.l ⁻¹]	[mg.l ⁻¹]
	13	0,4	0,27	55,9	0,005	13	0,06	0,002



Obr. 30 Anaerobně-aerobní ČOV Pivovar Černá Hora (foto autor, 2013)



Obr. 31 ČOV Pivovar Černá Hora - řídicí systém - přehled (foto autor, 2013)

4.1.1 Přítok OV a mechanické předčištění

Odpadní vody jsou vedeny do čerpací stanice ČS I, ze které jsou rovnoměrně čerpány na mechanické předčištění Huber. ČS I je provzdušňována hrubobublinnými aeračními elementy z důvodu zabránění usazování NL a křemeliny. Hladina v nádrži je sledována čidlem kontinuálního snímání hladiny. ČS je vybavena havarijním přepadem vedoucím do ČS II. Havarijní přepad je pro případ poruchy

čerpadel, jinak kapacita čerpadel a vyrovnávací kapacita ČS I je schopna pojmout veškeré nerovnoměrnosti přítoku. Zařízení Huber je vysoce účinnou kombinací lapáku písku a shrabků. Shrabky a písek jsou dopravovány do oddělených kontejnerů pomocí šneků s dutým středem. Po oddělení shrabků a písku zařízením Huber je mechanicky předčištěná voda vedena do ČS II, odkud je ponornými čerpadly čerpána do acidifikační nádrže. Hladina v ČS je sledována čidlem kontinuálního snímání hladiny, dále je měřena teplota. Z ČS II je také čerpána předčištěná OV na nedalekou pilotní jednotku AnMBR.



Obr. 32 ČOV Pivovar Černá Hora - čerpací stanice (foto autor, 2013)



Obr. 33 ČOV Pivovar Černá Hora - mechanické předčištění (foto autor, 2013)

4.1.2 Anaerobní čištění

V acidifikační nádrži probíhá acidifikační proces, důležitý prekurzor metanizačního procesu získávání bioplynu z organické hmoty. Do nádrže jsou přiváděny veškeré vody z ČS II. Obsah nádrže je ohříván dvěma topnými registry, jedním proudí teplá voda ze systému tepelných čerpadel a druhým teplá voda z kogeneračních jednotek. Nádrž je zaizolována pro udržení teploty a je míchána míchadlem pro zajištění homogenní směsi čerpané do směšovací nádrže. V acidifikační nádrži jsou měřeny pH, teplota a hladina. Nádrž je zastropena a vzdušina je odsávána na dezodorační filtr. Požadovaná hodnota pH v acidifikační nádrži je udržována dávkováním neutralizačních činidel, 25% roztoku NaOH (louhu) nebo 37% roztoku HCl (kyseliny chlorovodíkové). Acidifikované médium je čerpáno do směšovací nádrže (mixtank) čerpadly umístěnými v armaturním přístavku IC reaktoru v zapojení 1+1, řízenými přes frekvenční měnič dle požadovaného průtoku v závislosti na proměnné hladině v acidifikační nádrži, která současně slouží jako vyrovnávací nádrž. Provozní teplota vody v acidifikační nádrži se pohybuje mezi 25-40°C.



Obr. 34 ČOV Pivovar Černá Hora - acidifikační nádrž, mixtank (foto autor, 2013)



Obr. 35 ČOV Pivovar Černá Hora - chemické hospodářství (foto autor, 2013)

Účelem směšovacího reaktoru je zajištění externí recirkulace IC reaktoru, řízené ředění vstupního média a oddělování metanizačně zpracované kapalně fáze, která je dále vedena do aerobní části ČOV. Mixtank je zabudován v acidifikační nádrži. Díky navrženému tvaru je míchán hydrodynamicky. Část anaerobně předčištěné vody je zavedena i do acidifikační nádrže pro dodržení optimálních podmínek při průběhu předmetanizačních reakcí. Z mixtanku je OV pomocí dvou čerpadel řízeně čerpána do IC reaktoru. Na výtlaku z čerpadel je nainstalován indukční průtokoměr. Navržený IC reaktor je vysoko zatěžovaný anaerobní reaktor o průměru 2,85 m a výšce 16 m s dvoustupňovým separátorem bioplynu. IC reaktor je typem anaerobního reaktoru s expandovaným ložem granulovaného anaerobního kalu a dvěma stupni selekce bioplynu a kalu. Anaerobně předčištěná voda je sbírána systémem odtokových žlabů a odváděna z reaktoru odtokovým potrubím. Do mixtanku, kde je pomocí speciální vestavby dle technologických požadavků její část vracena do pracovního objemu mix-tanku (externí recykl). Poměr externího recyklu k zacidifikované OV vstupující do IC reaktoru je měněn změnou výkonu čerpadla čerpajícího zacidifikovanou OV z acidifikační nádrže do mixtanku a čerpadla čerpajícího OV z mixtanku do IC reaktoru.



Obr. 36 ČOV Pivovar Černá Hora - IC reaktor (foto autor, 2013)

Pro zabránění možným pachovým obtížím a pro udržení atmosféry pod mezí výbušnosti je prostor mezi hladinou a stropem mixtanku, prostor mezi hladinou a stropem acidifikační nádrže a prostor nad horním separátorem IC reaktoru kontinuálně odtahován. Kontaminovaná vzdušina je přivedena pomocí ventilátoru do dezodoračního kompostového filtru (biofiltru). Dezodorační kompostový filtr je naplněn směsí kůry, rašeliny a zlehčujících přísad a tato náplň je skrápěna vodou. Na tomto nosiči je naočkována kultura desulfurikačních bakterií, která bisorpcí zpracovává sloučeniny s možným pachovým vlivem jako např. sirovodík. Vzdušina je po průchodu dezodoračním biofiltrem a odstranění biologicky rozložitelných organických příměsí z odpadního vzduchu vypouštěna volně do atmosféry.



Obr. 37 ČOV Pivovar Černá Hora - dezodorační kompostový filtr (foto autor, 2013)

4.1.3 Biologické (aerobní) čištění

Biologický stupeň sestává z aktivační, dvou vestavěných dosazovacích nádrží a z kalové nádrže. Anaerobně předčištěná voda natéká do aktivační nádrže, která je provzdušňována jemnobublinnou aerací. Koncentrace kyslíku v aktivaci je kontinuálně snímána kyslíkovou sondou, která je řídicím prvkem pro regulaci chodu dmychadel. V aktivační nádrži probíhá odstranění zbytku organického znečištění. Do aktivační nádrže je v případě potřeby dávkován Prefloc pro zvýšení účinnosti odstranění fosforu. Aktivovaná směs je poté vedena do dvou dosazovacích nádrží vestavěných do aktivační nádrže. V dosazovacích nádržích se aktivovaný kal sedimentací oddělí od biologicky vyčištěné vody. Aktivovaný kal sedimentuje ve spodní části dosazovací nádrže, odkud je vrácen (recirkulován) mamutkou zpět do aktivační nádrže nebo odtažen jako přebytečný kal do kalové nádrže. Množství odtékající vyčištěné vody je měřeno indukčním průtokoměrem.



Obr. 38 ČOV Pivovar Černá Hora - aktivační nádrž s vestavnými dosazovacími nádržemi, uskladňovací nádrž kalu, armaturní komora (foto autor, 2013)

4.1.4 Dmychárna

Vzduch potřebný pro aeraci aktivační nádrže, kalové nádrže, čerpací stanice I a funkci mamutek dopravujících vratný kal je v současnosti dodáván třemi dmychadly. Dmychadla jsou řízena pomocí frekvenčního měniče v závislosti na koncentraci kyslíku v aktivační nádrži.



Obr. 39 ČOV Pivovar Černá Hora - dmychárna (foto autor, 2013)

4.1.5 Kalové hospodářství

Přebytečný kal produkovaný z aerobního stupně ČOV je uskladněn v kalové nádrži a odvodněn na stávající odstředivce. Flokulant pro odvodnění kalu je připravován ve flokulační stanici. Kal anaerobní granulovaný je akumulován přednostně v IC reaktoru. Po naplnění kapacity IC reaktoru, pokud není odbyt, je anaerobní kal přečerpán do kalové nádrže. Po vyčerpání kapacity je zlikvidován odvodněním společně s kaly z ČOV.



Obr. 40 ČOV Pivovar Černá Hora - kalová odstředivka a flokulační stanice (foto autor, 2013)

4.1.6 Plynové a tepelné hospodářství

Anaerobní reaktor produkuje bioplyn s vysokým obsahem metanu (cca 75%). Tento plyn oddělený v třífázovém separátoru IC reaktoru je veden do plynového hospodářství ČOV. Bioplyn je dopravován průmyslovým plynovodem z IC reaktoru do membránového plynojemu. Bioplyn je spalován na kogeneračních jednotkách, v případě poruchy je možné bioplyn spálit na kotelně pivovaru. Pro zabezpečení optimálních podmínek v acidifikační nádrži je nutná teplota směsi 25-40°C. Ohřev je zabezpečen dvěma topnými registry. V provozu je nezávisle na chodu ČOV topný registr vedoucí

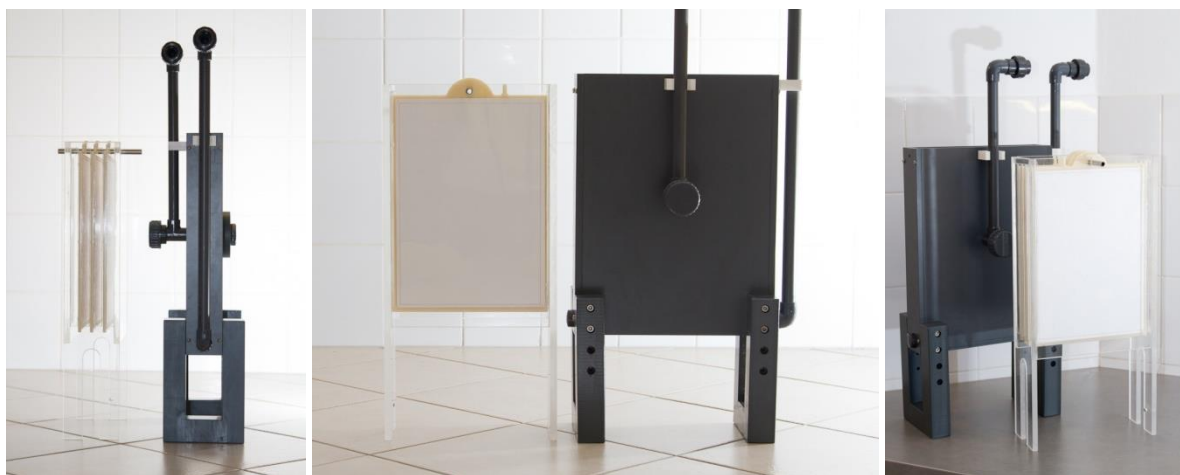
teplou vodu z tepelných čerpadel, která jsou řízena řídicím systémem pivovaru. Druhý topný registr ohřívá acidifikaci pomocí teplé vody z chlazení kogeneračních jednotek. V případě překročení limitní teploty cca 40°C v acidifikaci je výkon kogeneračních jednotek postupně omezován tak, aby limitní teplota nebyla překročena. Pokud teplota v acidifikační nádrži klesne pod stanovenou (nastavitelnou) hodnotu, je aktivováno přehřívání topného okruhu kogeneračních jednotek výměníkem z kotelny.



Obr. 41 ČOV Pivovar Černá Hora - kogenerační jednotky, plynové hospodářství (foto autor, 2013)

4.2 Laboratorní testování membránových modulů

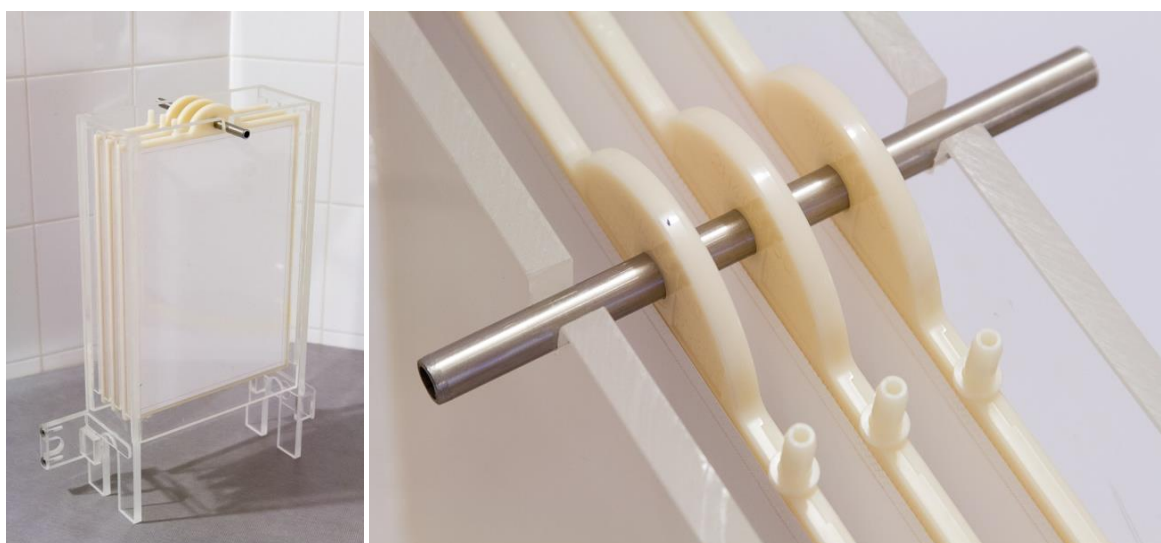
V rámci výzkumného projektu (Nové energeticky efektivní metody čištění průmyslových odpadních vod [117][123]) klastru firem, výzkumných institucí a vysokých škol CREA Hydro&Energy, z.s. [118], jehož členem je i Vysoké učení technické v Brně, byly na základě literární rešerše zaměřené na nejvhodnější polymerní ponorné membránové moduly (oblast mikrofiltrace a ultrafiltrace) pro použití k čištění průmyslových odpadních vod s důrazem na průmysl potravinářský a produkci bioplynu, vytipovány 2 komerčně dostupné výrobky vhodné pro laboratorní testování - Kubota Membrane Cartridge Type 203 [119][120] a Microdyn Nadir BIO-CEL LAB BC25x25 [121][122]. Oba membránové moduly jsou navzájem porovnatelné. Jsou typu FS (flat sheet; ploché membrány, deskové, panely) a mají efektivní filtrační plochu $3 \times 0,11 \text{ m}^2$ a $0,34 \text{ m}^2$.



Obr. 42 Laboratorní moduly Kubota a Microdyn-Nadir (foto autor)

4.2.1 Kubota

Výhodou Kubota je fakt, že mají na poli anaerobních membránových bioreaktorů několikaleté zkušenosti a řadu instalací (komerčně nabízený AnMBR systém - Kubota Anaerobic MBR [79]), 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 μm . 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.



Obr. 43 Membránové panely Kubota Cartridge Type 203 a vyrobený housing (foto autor)

4.2.2 Microdyn-Nadir

Nespornou výhodou ponorných membránových modulů Microdyn-Nadir [72] 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 μm , materiál membrány je PES.



Obr. 44 Membránový modul Microdyn Nadir BIO-CEL LAB BC25x25 (foto autor)

Tab. 8 Srovnání laboratorně testovaných membránových modulů [119][121][123] (úprava autor)

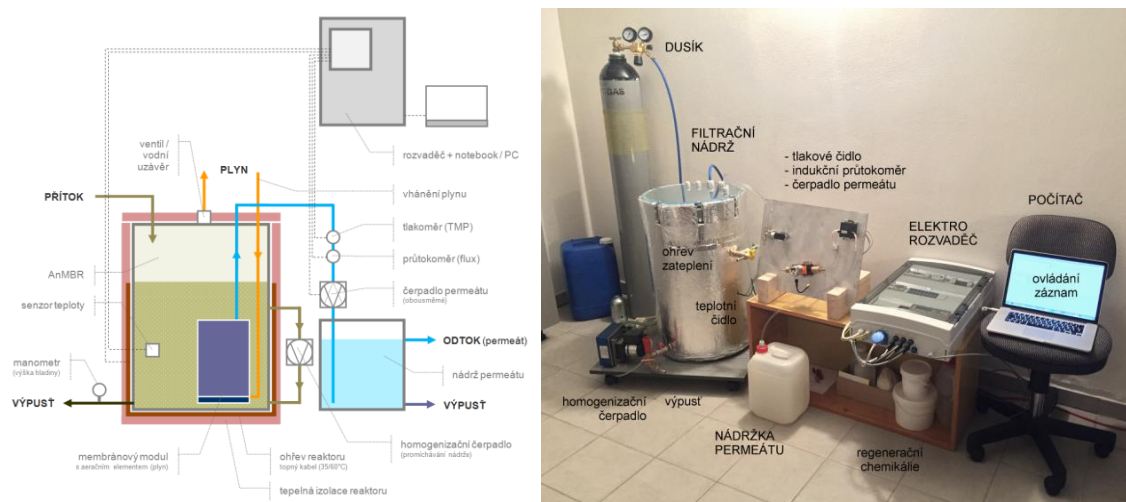
Parametr / výrobce	Jednotka	Kubota	Microdyn Nadir
Označení membrány / modulu	-	Membrane Cartridge Type 203 / XJ3	Nadir UP 150 / BIO-CEL LAB
Materiál membrány	-	CPE	PES
Filtrační režim	-	mikrofiltrace	ultrafiltrace
Typ membrány	-	FS	FS
Filtrační plocha modulu	m ²	0,33 (3ks)	0,34 (3ks)
Velikost pórů	μm (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.

4.2.3 Laboratorní sestava pro testování membránových modulů

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 (Monos Technology EKO 100L, výška 750 mm, průměr 410 mm, síla materiálu 0,6 mm, nerezová ocel AISI 304) 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⁻¹, 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 l = 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 ml.min⁻¹ pro hadičku 3 mm resp. 200 ml.min⁻¹ pro hadičku 5 mm) 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⁻¹), transmembránový tlak 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. 45 Laboratorní sestava pro testování ponorných membránových modulů - schéma a foto [123] (autor)



Obr. 46 Laboratorní AnMBR sestava - ovládání a záznam [123] (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 - $CHSK_{Cr}$ 5 300 $mg.l^{-1}$, NL sušené (105°C) 1 000 $mg.l^{-1}$. Rozbory kalu vykazovaly hodnoty - usaditelné látky 800 $ml.l^{-1}$, sušina při 105°C 1,85%, ztráta žiháním při 550°C 78,5% suš.

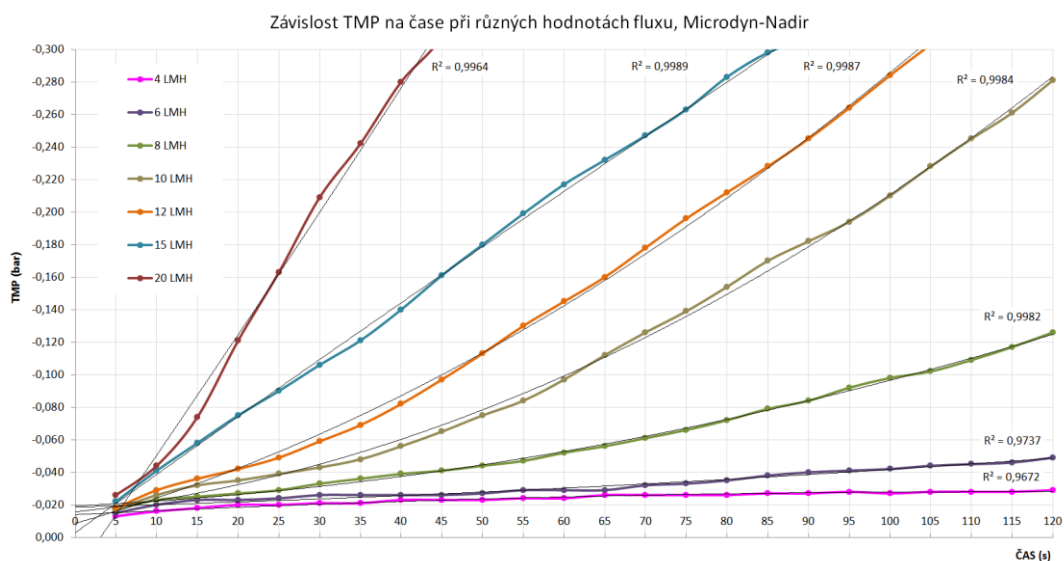
4.2.4 Průběh

U zvolených membránových modulů byly stanoveny závislosti TMP při různých hodnotách fluxu na čase (a vypočtena permeabilita), a to za mezofilních (35°C) i termofilních (55°C) podmínek. Z těchto křivek byl stanoven vhodný flux pro testování a následné porovnání různých provozních cyklů:

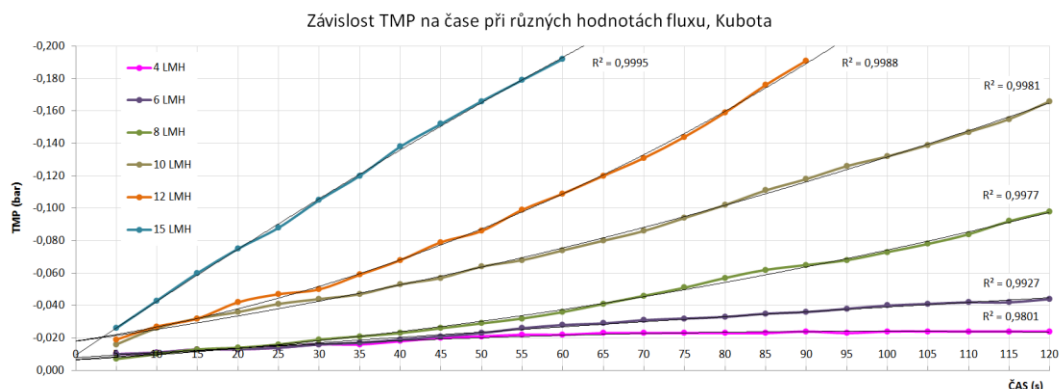
- filtrace + relaxace;
- filtrace + propírání plynem;
- filtrace + zpětný proplach;
- filtrace + zpětný proplach / relaxace + propírání plynem.

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).

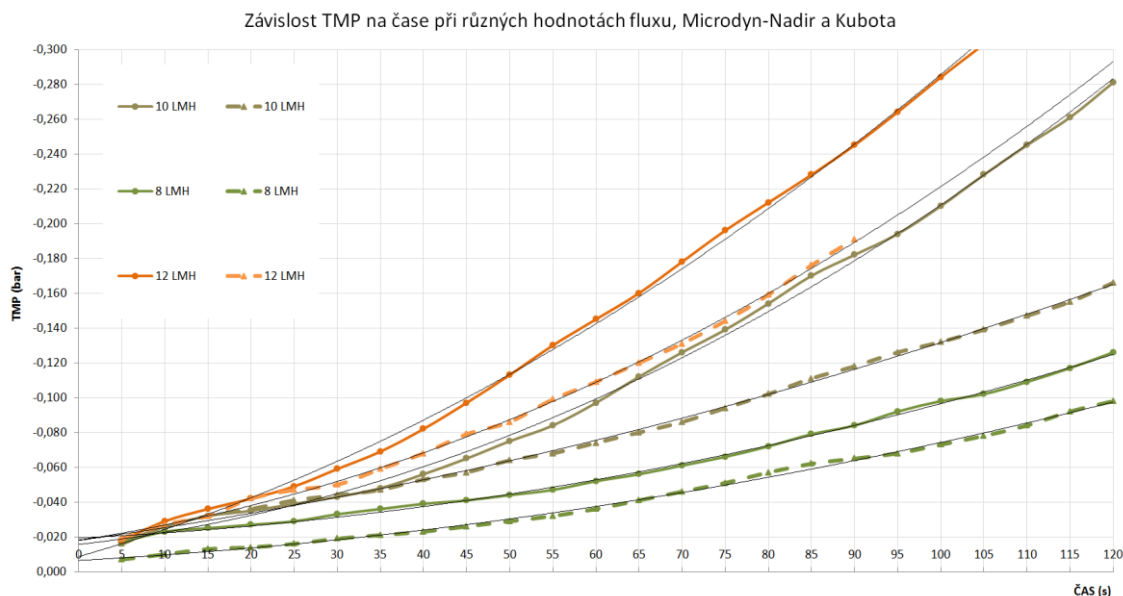


Obr. 47 Laboratorní testování membránových modulů: závislost TMP na čase při různých hodnotách fluxu, mezofilní režim, modul Microdyn-Nadir [123] (autor)



Obr. 48 Laboratorní testování membránových modulů: závislost TMP na čase při různých hodnotách fluxu, mezofilní režim, modul Kubota [123] (autor)

Obrázky 47 a 48 zobrazují závislosti TMP na čase pro jednotlivé hodnoty fluxu (4, 6, 8, 10, 12, 15 a 20 l.m⁻².h⁻¹) u obou testovaných membrán. Jedná se pouze o filtrační zkoušku, testování nebylo ničím přerušováno – relaxací, propíráním plynem ani zpětným proplachem. Uvedeny jsou pouze grafy pro mezofilní režim (35°C), hodnoty u režimu termofilního (55°C) lišily nepatrně. Následující graf (obrázek 49) zobrazuje porovnání závislostí obou membránových modulů pro střední hodnoty fluxu - 8, 10 a 12 l.m⁻².h⁻¹. Hodnoty Microdyn-Nadir jsou zobrazeny plnými čarami, Kubota čarami přerušovanými.

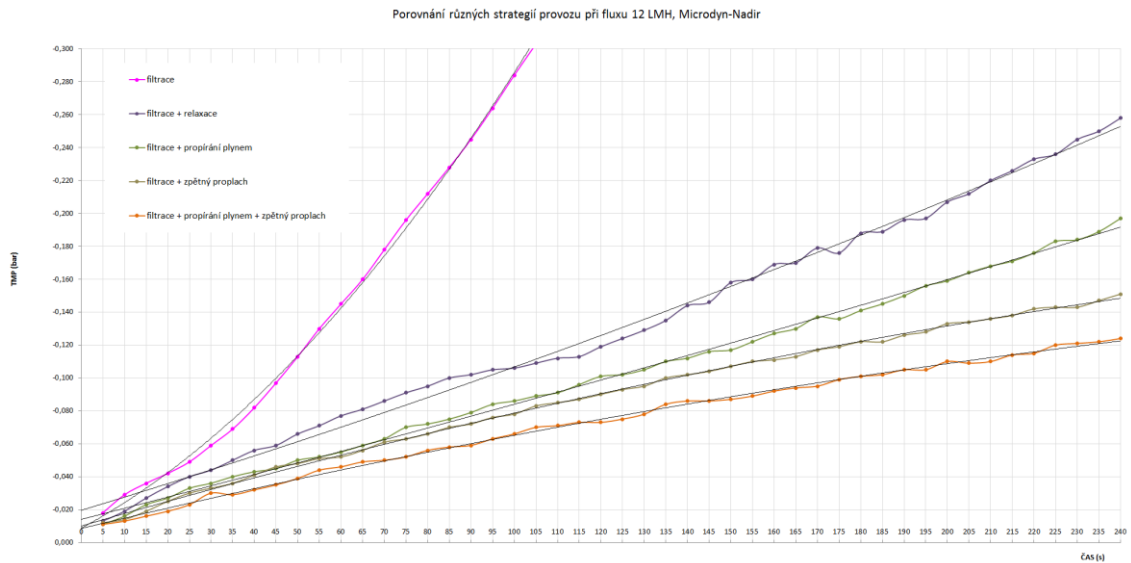


Obr. 49 Laboratorní testování membránových modulů: porovnání závislosti TMP na čase obou membránových modulů při středních hodnotách fluxu [123] (autor)

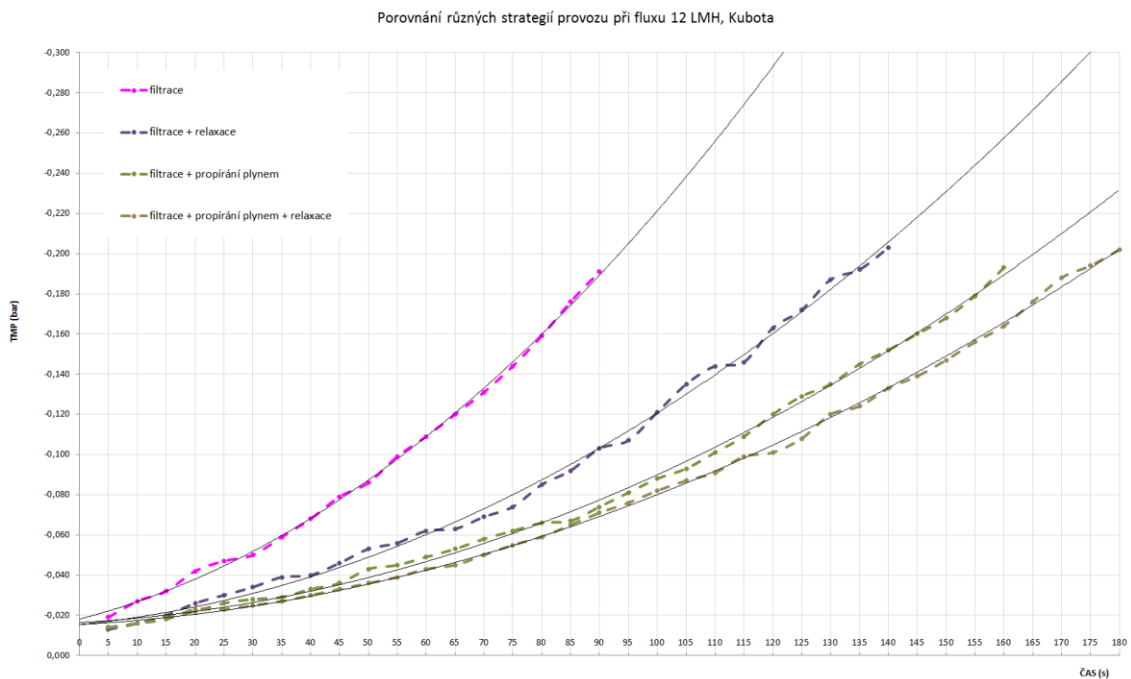
Jak je patrné, membránový modul Kubota vykazuje při stejných hodnotách fluxu nižší hodnoty TMP než membránový modul Microdyn-Nadir, což se vzhledem k větším pórům předpokládalo.

Pro následující krátkodobé (4 hod. / 240 min.) testování jednotlivých provozních strategií byl z důvodu názornosti zvolen flux $12 \text{ l.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ – filtrační čerpadlo bylo nastaveno tak, aby ve všech případech bylo ve výsledku získáno stejné množství permeátu. Nejedná se o optimální specifický průtok membránou blížící kritickému fluxu! Jsou uvedeny tyto varianty:

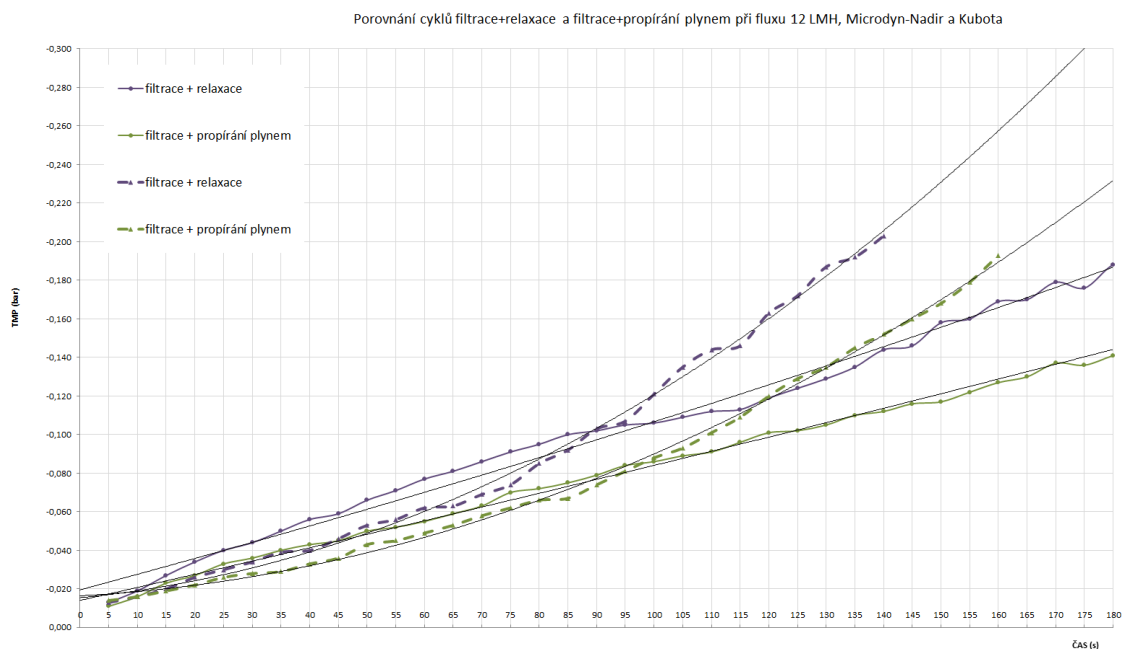
- **filtrace:** hodnoty shodné s hodnotami v Obr. 49 (resp. 47 a 48);
- **filtrace+relaxace:** filtrace 9 min. (540 s), relaxace 1 min. (60 s);
- **filtrace+propírání plynem:** kontinuální propírání stlačeným lahvovaným dusíkem 4 l.min^{-1} ;
- **filtrace+zpětný proplach (Microdyn-Nadir):** filtrace 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 l.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 l.min^{-1} .



Obr. 50 Laboratorní testování membránových modulů: porovnání jednotlivých testovaných provozních cyklů při hodnotě fluxu $12 \text{ l} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, Microdyn-Nadir [123] (autor)

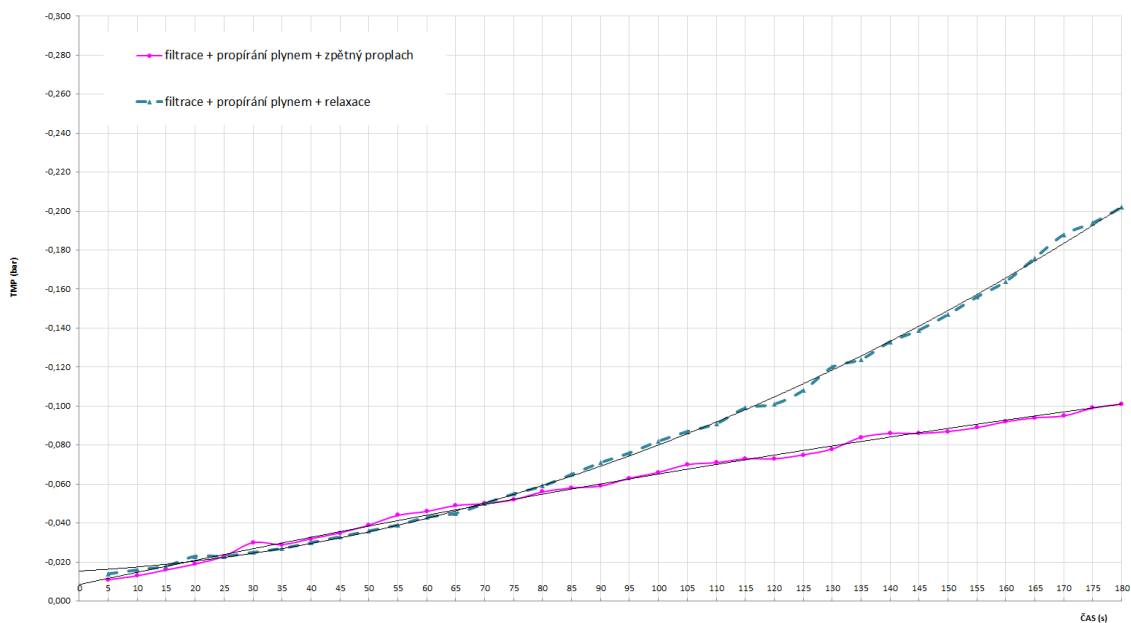


Obr. 51 Laboratorní testování membránových modulů: porovnání jednotlivých testovaných provozních cyklů při hodnotě fluxu $12 \text{ l} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, Kubota [123] (autor)



Obr. 52 Laboratorní testování membránových modulů: porovnání cyklů filtrace+relaxace a filtrace+propírání plynem při hodnotě fluxu $12 \text{ l.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$, Microdyn-Nadir (plné čáry) a Kubota (čárkované) [123] (autor)

Z předchozích uvedených grafů je patrné, že všechny křivky (kromě prosté filtrace) jednotlivých cyklů Kubota jsou strmější - k ucpávání membrán dochází sice zpočátku pomaleji, ale po chvíli TMP narůstá výrazněji než u Microdyn-Nadir. Toto bude dáno charakterem filtrátu a velikostí pórů membrány.



Obr. 53 Laboratorní testování membránových modulů: porovnání cyklů filtrace+propírání plynem+relaxace (Kubota, čárkované) a filtrace+propírání plynem+zpětný proplach (Microdyn-Nadir, plné čáry) při hodnotě fluxu $12 \text{ l.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ [123] (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.



Obr. 54 Membránové moduly před regenerací chemickou lázní v laboratorním AnMBR (foto autor)

4.2.5 Výsledky a závěry

Přínosem této aktivity [123] 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 ($0,33 \text{ m}^2$) 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 $\sim 8 \text{ l.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$.

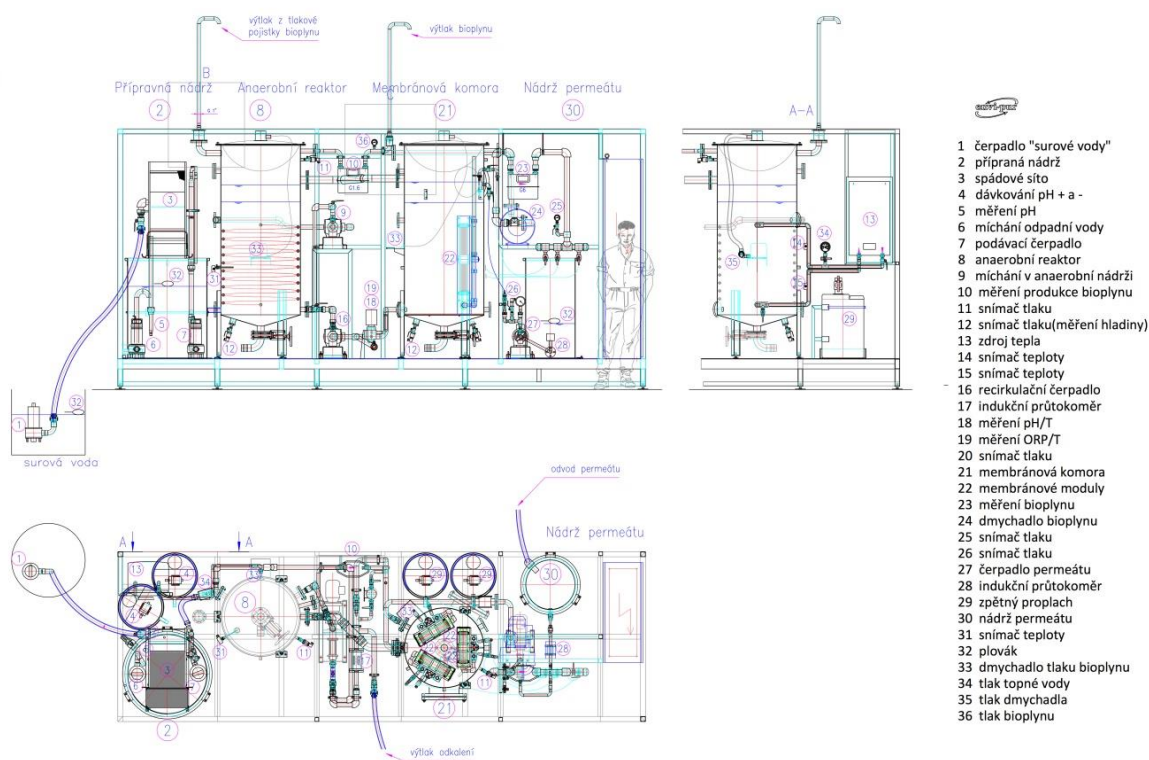
Oba výrobci uvádějí maximální provozní teplotou 40°C . Dlouhodobější osazení membránových modulů do reaktorů pracujících v mezofilním režimu (okolo 35°C) by tedy mělo být bezproblémové. Během krátkodobého laboratorního testování v podmínkách termofilních (55°C) nedošlo k žádné znatelné degradaci membrány.

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 [124][130-132], ale také stanovit vhodné počáteční nastavení provozních parametrů.

4.3 Popis poloprovozní jednotky

Mobilní poloprovozní model je určený pro experimentální čištění odpadních vod především z průmyslových objektů. Jedná se o anaerobní čištění průmyslových odpadních vod s membránovou separací. Hlavní částí modelu je anaerobní reaktor s tepelným výměníkem a membránová komora, kde jsou umístěny ultrafiltrační membránové moduly.

Navržený AnMBR [124] 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 [125][126] a ze zkušeností z provozu [33].



Obr. 55 Poloprovozní AnMBR - výkres s popisem (Příloha 4) [124]

4.3.1 Nádrže

4.3.1.1 Přípravná nádrž

Surová odpadní voda je čerpána ponorným kalovým čerpadlem na spádové síto, které je umístěno nad PP přípravnou nádrží (\varnothing 1m a h = 1,5 m). Odpadní voda je čerpána do klidové části spádového

síta, z které voda 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 ($Q = 2,3 \text{ l.h}^{-1}$) dákovány chemikálie - například kyselina citronová nebo hydroxid sodný. Na dně přípravné nádrže je osazeno míchací čerpadlo, které zajišťuje dostatečnou homogenizaci v celém objemu nádrže. Hladina v nádrži je řízena dle plovákových spínačů. Z přípravné nádrže je odpaní voda dopravována do anaerobního reaktoru pomocí ponorného kalového čerpadla. Na propojovacím potrubí je osazena zpětná klapka (domontována) a elektroventil.



Obr. 56 Poloprovozní 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 zahřívat 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 anaerobním reaktoru je kontinuálně

měřena pomocí tlakové sondy umístěné v dolní části pláště reaktoru. Další z měřených veličin je teplota v reaktoru - jedná se o stonkové teplotní čidlo umístěné v nerezové jímce. Čidlo je umístěné v 1/2 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 odpadní vody (a částečně ve vnější straně vzduchového vaku). 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 g.l^{-1}), je nutné odčerpat přebytečný kal. To lze provést otevřením deskového šoupěte (spodní výpusti) jedné z nádrží - anaerobního reaktoru a/nebo membránové komory.



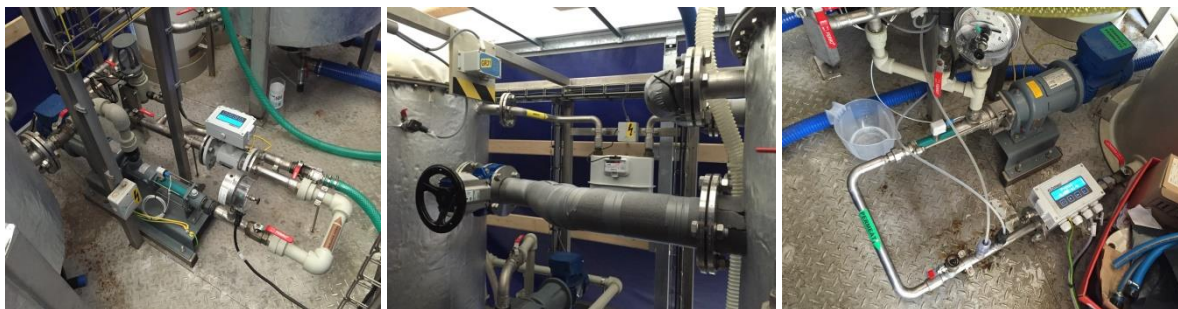
Obr. 57 Poloprovozní AnMBR - anaerobní reaktor, ohřev (foto autor)



Obr. 58 Poloprovozní AnMBR - vřetenové míchací čerpadlo, spodní výpusti (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 ostřiku vodou.



Obr. 59 Poloprovozní AnMBR - recirkulační potrubí, přepadové potrubí, potrubí permeátu (foto autor)



Obr. 60 Poloprovozní AnMBR - membránová komora, membránové moduly (foto autor)

V membránové komoře jsou osazeny 3 membránové filtrační moduly (viz odstavec níže). 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.

4.3.1.4 Nádrž permeátu

Výtlačk 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 průhledítkách 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. 61 Poloprovozní AnMBR - nádrž permeátu (foto autor)

Tab. 9 Rozměry a pracovní objemy nádrží poloprovozního AnMBR [125]

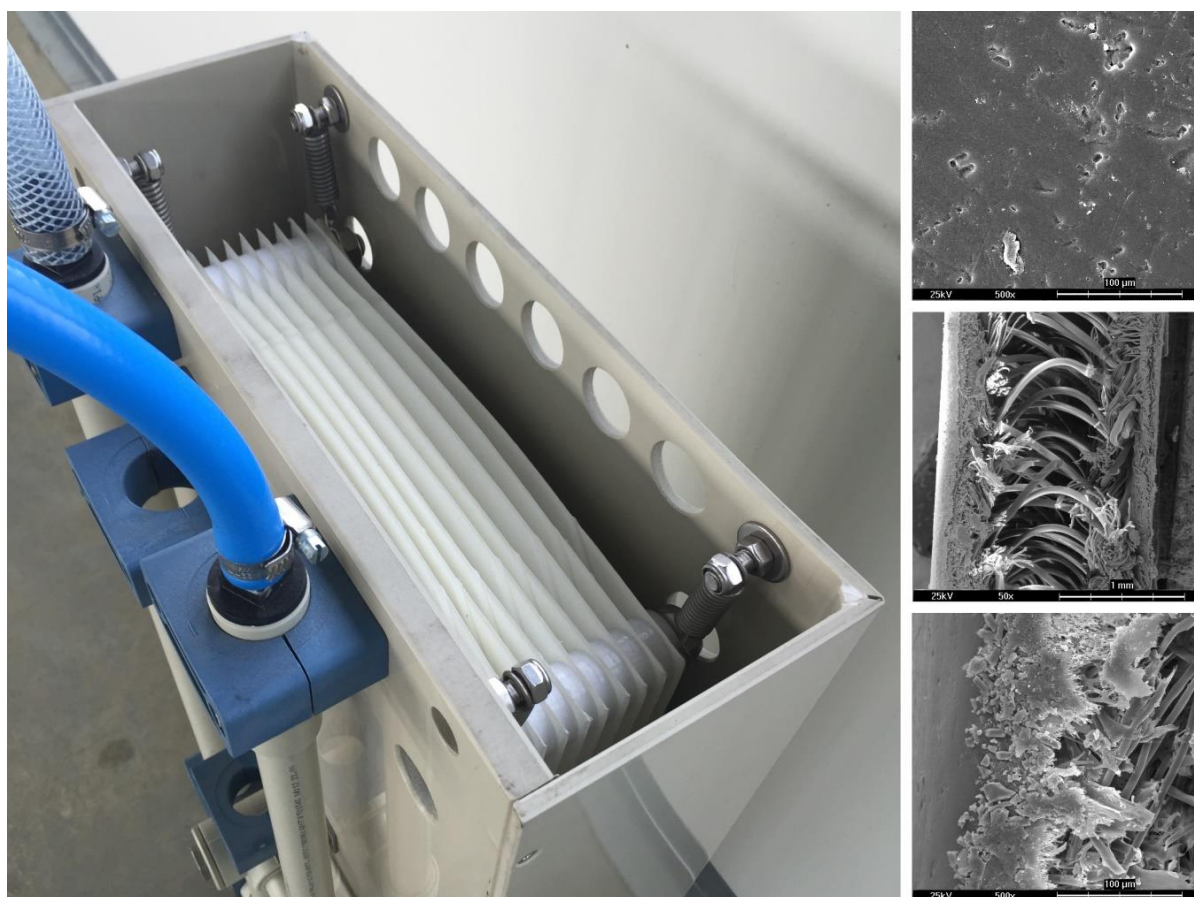
Typ nádrže	Výška hladiny	Pracovní objem	Rozměry nádrže (výška x průměr)
Egalizační nádrž	0,72 m (pracovní)	0,36 m ³	1,0 x 0,8 m
Anaerobní reaktor	1,41 m (pracovní)	0,71 m ³	2,41 x 0,8 m
Membránová komora	1,41 m (pracovní)	0,71 m ³	2,41 x 0,8 m
Nádrž permeátu	1,10 m (přepad)	0,22 m ³	1,0 x 0,5 m

4.3.2 Membránové moduly pilotní jednotky

Pro pilotní AnMBR byly na základě rešerše a předchozích zkušeností při laboratorním testování [123] vybrány ponorné ploché polymerní (PES) membránové moduly Microdyn-Nadir BIO-CEL s velikostí pórů 0,04 µm / selektivitou 150 kDa s filtrační plochou 3,5 m². 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. Jednou namočený membránový modul nesmí vyschnout, jinak dojde k jeho nevratnému zničení (lze za jistých podmínek konzervovat a uchovat pro další použití).



Obr. 62 Vybrané membránové moduly osazené v poloprovozním AnMBR, SEM snímky (foto autor)

4.3.3 Chemické hospodářství

Chemické hospodářství slouží k úpravě pH v přípravné nádrži a chemicky obohaceným 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.



Obr. 63 Poloprovozní AnMBR - chemické hospodářství pro přípravnou nádrž a membránovou komoru (foto autor)

4.3.4 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 (dle nastavení). 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 odebrat vzorky, případně bioplyn nadále využívat. Tlak v nádrži vyrovnávají vaky, do kterých je samostatnými dmychadly 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. Pojistný ventil membránové komory je nastaven na 250 Pa.



Obr. 64 Poloprovozní AnMBR - plynové hospodářství: dmychadlo, filtr, sběrná nádržka kondenzátu, aerační elementy pod membránovými moduly a rozdělovací objekt, plynoměry a plynové vaky anaerobního reaktoru / membránové komory, signalizace úniku plynu (foto autor)

4.3.5 Měření a regulace

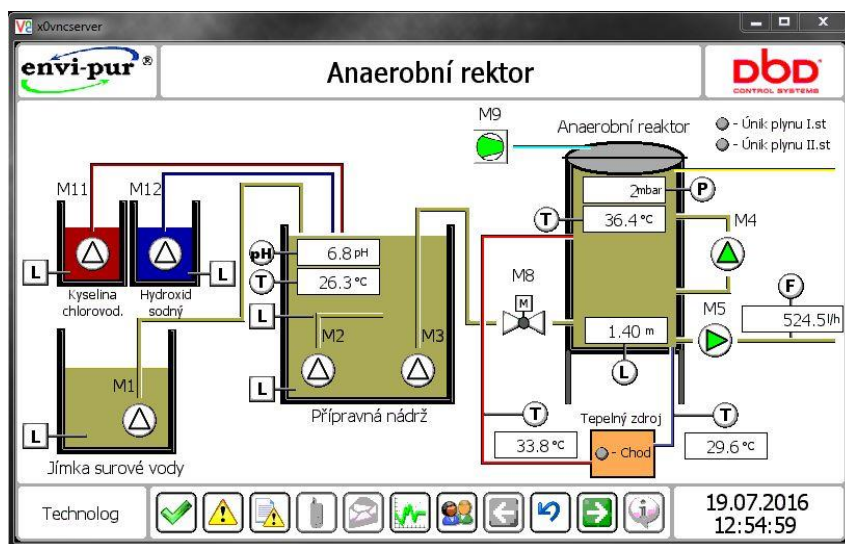
Poloprovozní model je ovládán řídicím systémem, plováky, tlakovými a hladinovými sondami, průtokoměry atd. Model je možné sledovat a řídit pomocí vzdáleného přenosu přes internet (SIM). Provoz modelu se kontroluje na displeji panelu řídicí jednotky, kde je uveden provozní stav (automatický nebo manuální 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

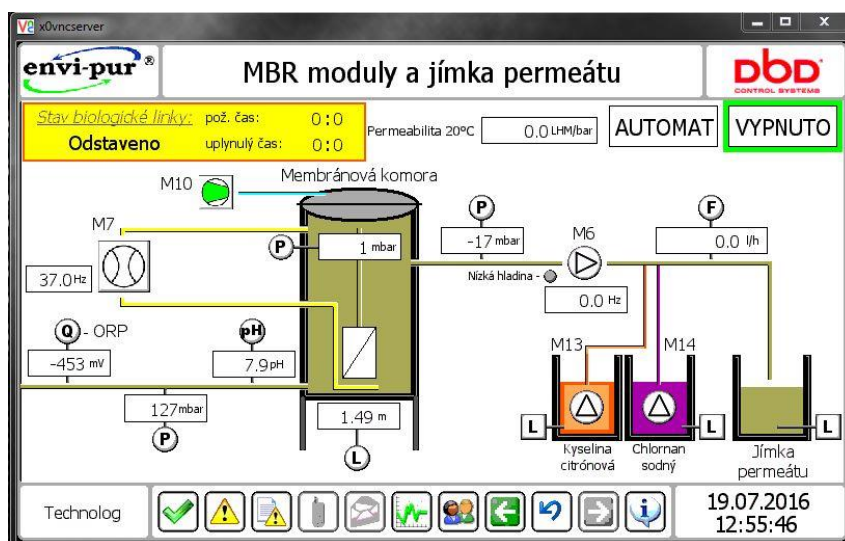
disk / paměťová karta (umístěný/á na zadní straně panelu) je nutné nahrát do PC a otevřít v EasyConverter. Poté lze s daty libovolně pracovat.

Na vizualizaci je zobrazeno schéma poloprovozního modelu. Každé zařízení má své označení. Při kliknutí na označení se u každého zařízení zobrazí jeho aktuální stav i historický průběh. V případě kliknutí na samotné zařízení se uživateli naskytne volba automatického nebo manuálního chodu zařízení. Další informací v této nabídce je suma motohodin.

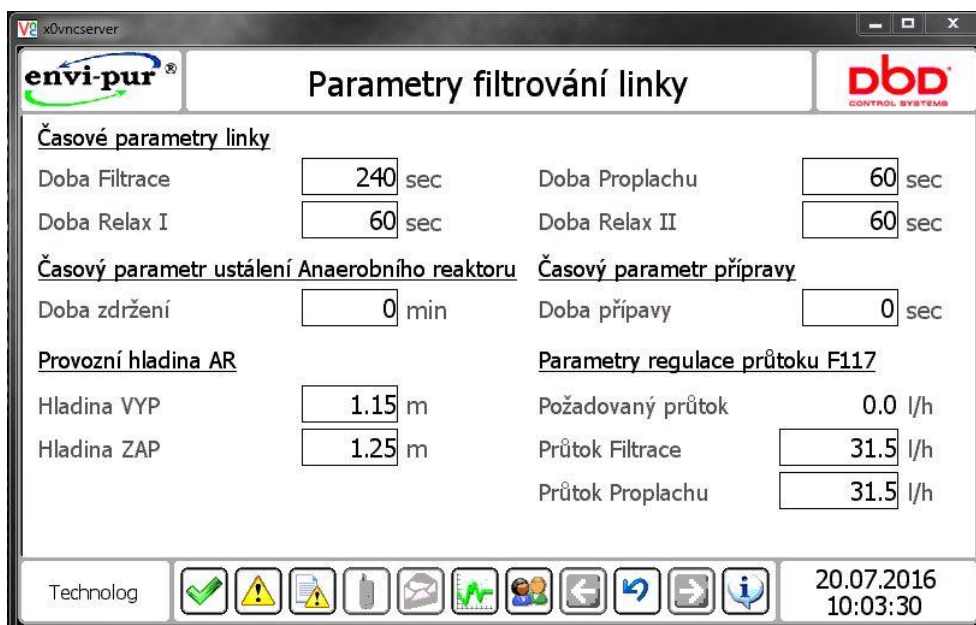
V pravém horním rohu MaR vizualizace č. 2 „automat/vypnuto“ značí chod filtrace. V případě zvolení filtrace vypnuto se odstaví čerpadlo permeátu a dmychadlo bioplynu jde v režimu „nízká hladina“. V pravém horním rohu MaR vizualizace č. 1 je signalizace úniku bioplynu. V případě aktivace druhého stupně dojde k odstavení celého modelu.



Obr. 65 Poloprovozní AnMBR - MaR - vizualizace č. 1 [125]



Obr. 66 Poloprovozní AnMBR - MaR - vizualizace č. 2 [125]



Obr. 67 Poloprovozní AnMBR - MaR - parametry filtrování linky [125]

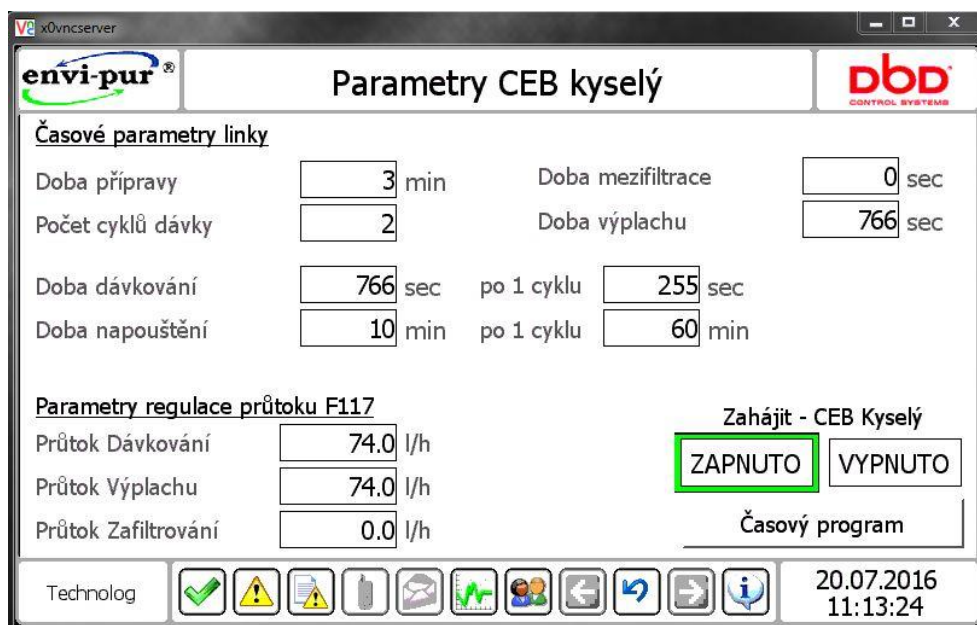
Časové parametry linky - zde je možno volit dobu jednotlivých fází filtračního cyklu. Filtrační cyklus začíná vždy filtrací, poté následuje relax I (chod dmychadla bioplynu), zpětný proplach (reverzní chod čerpadla permeátu) a poslední fází je relax II.

Časový parametr ustálení anaerobního reaktoru - doba přípravy anaerobního kalu před spuštěním poloprovozního modelu. Zařízení jsou v režimu odstaveno.

Provozní hladina AR - doplnění anaerobního reaktoru se provádí pomocí podávacího čerpadla. Čerpal je řízeno následovně: hladina zap. + 0,05 m zahájení čerpání a hladina zap. + 0,15 m požadavek na ukončení čerpání.

Parametry regulace průtoku F117 - volba filtrace a zpětného chodu čerpadla permeátu.

Zpětný proplach lze spustit ikonou zahájit CEB kyselý/oxidační – zapnuto (spustí se po skončení filtračního cyklu), nebo v časovém programu dle v plánovacím kalendáři. CEB oxidační - po homogenizaci chemikálie by se měla koncentrace pohybovat od 400 do 500 mg.l⁻¹. CEB kyselý - po homogenizaci chemikálie by mělo být pH v rozmezí 2-3. Doba napouštění značí dobu, po kterou se chemikálie zdržuje v listech membránových modulů. Případné změny v parametrech CEBu je nutné konzultovat s dodavatelem technologie.



Obr. 68 Poloprovozní AnMBR - MaR - Chemický zpětný proplach (CEB) [125]

Další algoritmy hlavních zařízení

- Čerpadlo surové vody je v chodu, klesne-li hladina pod spodní plovák v přípravné nádrži. Čerpá do té doby, než sepne horní plovák v přípravné nádrži. Čerpadlo nelze uvést do chodu, je-li rozepnutý jeho ochranný plovák.
- Čerpadlo míchací v přípravné nádrži je v chodu dle nastavených časových parametrů z panelu. Dále vždy, když je v chodu čerpadlo surové vody, podávací čerpadlo do anaerobního reaktoru, dávkovací čerpadla přípravné nádrže.
- Podávací čerpadlo do anaerobního reaktoru je v chodu při povelu doplnění anaerobního reaktoru.
- Míchací čerpadlo anaerobního reaktoru a recirkulační čerpadlo je v chodu dle nastavených časových parametrů z panelu. Čerpadlo je v chodu (dle časového nastavení) při jakémkoli stavu biologické linky.
- Čerpadlo permeátu je v chodu dle požadavku na filtrační cyklus, případně CEB.
- Dmychadlo je v chodu vždy při filtraci, zpětném proplachu a relaxu. Při režimu odstaveno má časové parametry nízké hladiny v anaerobním reaktoru.
- Elektronická klapka mezi přípravnou nádrží a anaerobním reaktorem se otevírá / uzavírá s provozem podávacího čerpadla do anaerobního reaktoru.
- Dmychadla tlakových vaků jsou v provozu nepřetržitě.
- Dávkovací čerpadla přípravné nádrže jsou v chodu dle nastavených mezí v nabídce regulace pH. Hodnota pH je kontinuálně snímána pH sondou.
- Dávkovací čerpadla membránové komory jsou v případě požadavku na CEB spuštěna spolu s čerpadlem permeátu.

4.4 Zkušební provoz poloprovozní jednotky

4.4.1 Pokyny, doporučení a upozornění dodavatele

Poloprovozní model je navržen a umožňuje především čištění průmyslových odpadních vod. Odpadní voda nesmí obsahovat žádné materiály, které mohou způsobovat blokace 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.

Model je navržen a vybudován tak, aby splňoval příslušné bezpečnostní předpisy a aby se vyloučily možnosti úrazu při obsluze a údržbě. Je nutné zajistit v maximální možné míře čisté, suché a nekorozi prostředí – především ovětrání vlhkosti, CO₂, Cl, bioplynu a popř. dalších plynů.

Předpokládaná časová náročnost obsluhy je po zapracování biologického stupně 2 hodiny denně.

Tab. 10 Intervaly kontrol obsluhy poloprovozního AnMBR dle dodavatele [125]

	Interval				Činnost
	den	týden	měsíc	jiný	název
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

4.4.1.1 Čerpací jímka – čerpání surové vody

Údržbu čerpadla je nutno provádět v souladu s technickou dokumentací. Čerpadlo je zavěšeno na řetězu a lze ho manuálně vytáhnout ven (manipulace pro 1 osobu, hmotnost čerpadla = 10,2 kg). Dále je nutné provádět čištění a kontrolu plováků minimálně 1x za měsíc. Může docházet k zachycení nečistot na plováku, který pak nemusí vyslat signál k zapnutí či vypnutí čerpadla. Při odčerpání vody

pod bezpečnostní hladinu může dojít ke spálení čerpadla. Při jakékoliv manipulaci s čerpadlem je nutné jej odpojit od sítě a zabránit jeho připojení omylem.



Obr. 69 Čerpací jímka, čerpání surové vody, ČOV Pivovar Černá Hora (foto autor)

4.4.1.2 Přípravná nádrž

Jemné předčištění v podobě spádového síta vyžaduje denní údržbu. Jedná se především o kontrolu transportu shrabků do připravené nádoby, resp. přepadového potrubí. V přípravné nádrži jsou osazena dvě ponorná čerpadla. Čerpadlo míchací zajišťuje homogenizaci při dávkování pH+ a pH- a dále i v časových intervalech. Čerpadlo podávací zajišťuje dávkování upravené surové vody do anaerobního reaktoru. V přípravné nádrži jsou osazena shodná ponorná čerpadla jako v čerpací jímce. Platí tedy shodné pokyny pro údržbu jako pro zařízení v čerpací jímce. Obsluha pravidelně kontroluje plováky v nádržích, zda jsou volné a nejsou např. zaseklé. Dále je v přípravné nádrži osazena pH sonda, kterou je řízena úprava pH. Sondy je doporučeno minimálně 1x měsíčně očistit od případných nánosů na snímacím senzoru.

4.4.1.3 Biologické čištění

Správná funkce biologického čištění je podmíněna vhodnou úpravou surové vody v egalizaci, jelikož hodnota pH výrazně ovlivňuje průběh biologických procesů. Dalším důležitým provozním parametrem je teplota, která ovlivňuje rychlost všech reakcí. Je tedy důležité pravidelně kontrolovat hodnoty čidel umístěných na anaerobním reaktoru a membránové komoře. Dále obsluha modelu musí kontrolovat intenzitu mechanické regenerace bioplynem.

Zásadně smějí být veškeré práce s čerpadlem prováděny pouze po odpojení elektrického přívodu od elektrické sítě. Čerpadlo nevyžaduje žádnou zvláštní údržbu, ložiska jsou mazána trvalou náplní. Kontrola provozu - čerpadlo nesmí běžet na sucho, hnací motor nesmí být přetížen, kontrola těsnosti sacího a výtlačného potrubí, sledování přístrojů zobrazující tlak a průtok.

4.4.1.4 Dmychadlo bioplynu

Dmychadlo bioplynu je jedním z nejdůležitějších zařízení na poloprovozním modelu. Odchytky od normálních provozních podmínek (např. mimořádná hlučnost, vibrace atd.) signalizují abnormality, které mohou vést k poškození jednotky.

Obsluha kontroluje hodnotu tlaku na manometru, jestli nestoupá tlaková ztráta. Pravidelně odpouští vzniklý kondenzát v dmychadle a na potrubí mezi membránovou komorou a dmychadlem bioplynu. V pravidelných intervalech čistí filtr na větvi bioplynu.

4.4.1.5 Provoz poloprovozního modelu v zimním období a dlouhodobé odstavení

V období s velmi nízkými teplotami je nutno zajistit zvýšenou kontrolu všech zařízení (jestliže klesne teplota pod 5°C), zabránit tvorbě ledu v otevřených nádržích, po výpadku el.energie dbát zvýšené ostražitosti při spouštění jednotlivých zařízení do provozu, zvýšit četnost spínání strojních zařízení (jestliže to nenaruší experimentální provoz). Při udržování poloprovozního modelu v provozu v zimním období je třeba ve zvýšené míře dbát na dodržování předpisů BOZ. Zvláště je nutno dbát, aby přístupy k obsluhovaným zařízením a objektům byly udržovány v provozuschopném stavu (odstraňovat sníh a likvidovat náledí).

Před dlouhodobým odstavením:

- odstraňte plovákové spínače a vytáhněte je z nádrže,
- odmontujte čerpadla a dmychadla,
- odstraňte pH sondu,
- vypusťte permeát z obou stran výtlačku a sání čerpadla permeátu.

V případě dlouhodobého odstavení přes zimní období doporučujeme demontovaná zařízení uskladnit v temperovaných prostorech, aby nedošlo k jejich poškození mrazem.

4.4.2 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. 70 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 ústícího 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;
- zapracování kalem 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 zapracována pomocí kalu místního (ČOV Pivovar Černá Hora) IC reaktoru s konečnými hodnotami - sušina 1,1 %, ztráta žiháním 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 odpadních vod 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 dle dodavatele cca. 4 až 16 týdnů.

4.4.3 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.).

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. 11 Souhrnný přehled závad a úprav poloprovozního AnMBR (autor)

Umístění	Popis	Řešení / závěr
Projekční / konstrukční / provozní a pravidelné závady, optimalizace / doplňky / zásahy / přestavby		
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	Zahlčení 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 rotometrů 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

4.4.3.1 Přítok

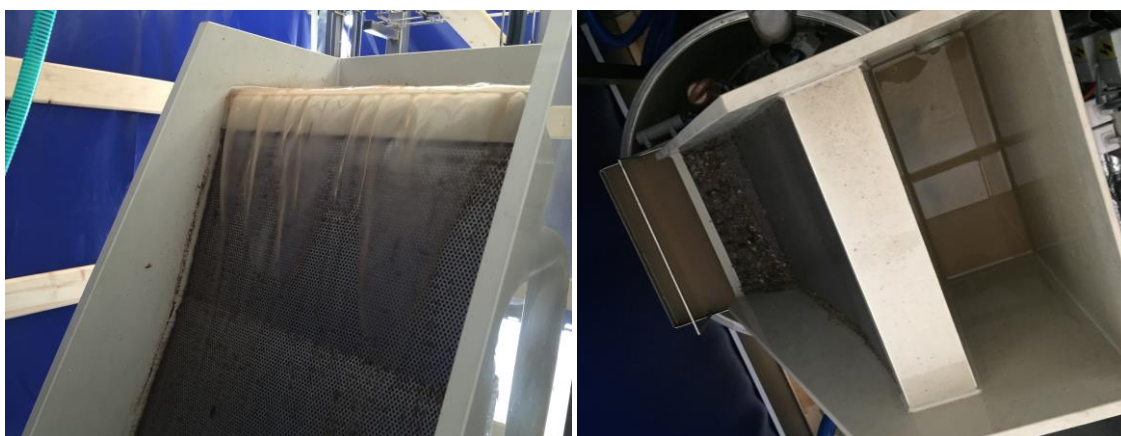
- V zimních měsících nastávají komplikace spojené se zamrzáním přítoku, obsahu nádrží s volnou hladinou (egalizační nádrž, nádrž permeátu, některé barely chemikálií) a některých prvků systému (části větve bioplynu...). Jako možné řešení se nabízí umístění jednotky do temperovaných prostor ČOV, nebo uzpůsobeného přepravního kontejneru. Vytápění současného zaplachtovaného vozíku by bylo příliš nákladné. Samotná izolace přívodního potrubí

(délka cca 40 m) je nedostatečná, jako možné řešení se nabízí instalace vinutého topného kabelu.



Obr. 71 Zamrzání poloprovozního AnMBR (foto autor)

- Nátok surové vody je řešen přes uklidňující prostor mechanického předčištění a následné spádové síto. Přelivná hrana má nevhodný tvar – dochází k odtržení přepadového paprsku a ostříku okolí. Sklon spádového síta je poměrně velký, což na jednu stranu usnadňuje separaci shrabků, ale na stranu druhou dochází k značným rychlostem a proud surové vody má velkou energii – většina surové OV propadá až sběrným košem, případně přetéká nekontrolovaně bočním prostorem. Uklidňující prostor mechanického předčištění je nutné manuálně čistit od sedimentů. Možným řešením je zkosení přelivné hrany a spádování dna uklidňujícího prostoru spolu s dobudováním otvoru pro komfortnější kontrolu a čištění. Úprava sklonu spádového síta je nereálná, resp. příliš komplikovaná.



Obr. 72 Poloprovozní AnMBR - nevhodný tvar přelivné hrany a velký sklon spádového síta (foto autor)

- Původní řešení mechanického předčištění se prokázalo jako nevyhovující - při provozu docházelo k častému zahlcení sběrného koše shrabky a vzhledem k velkému proudu přítoku surové vody docházelo k přepadu do egalizační nádrže i mimo ni. Jako řešení tohoto problému byl dobudován přepad sběrného koše. I toto ovšem není ideální řešení, protože nadále narázově

dochází k zahlcení koše a surová voda spolu se shrabky odtéká přepadovým potrubím do sběrné nádoby, resp. kanalizace ČOV. Automatický provoz jednotky je řízen pomocí plováků (nastavení min. a max. hladiny egalizační nádrže), takže čerpadlo surové vody je v neustálém provozu. Možností je umístění webkamery pro vzdálenou vizuální kontrolu a/nebo osazení čidla / plováku i na přepadové potrubí (časová prodleva, dočasné odstavení čerpadla surové vody).



Obr. 73 Poloprovozní AnMBR - zahlcení sběrného koše mechanického předčištění a dobudování přepadu na shrabky (foto autor)

- Během provozu docházelo ke znečišťování egalizační nádrže a pění obsahu - kvůli konceptu mechanického předčištění a nevhodným algoritmům řídicího systému (příliš dlouhá doba zdržení OV, dlouhý chod míchacího čerpadla egalizace apod.). Byly změněny / vyladěny algoritmy řídicího systému a optimalizováno mechanické předčištění (viz výše).



Obr. 74 Poloprovozní AnMBR - znečišťování egalizační nádrže a pění obsahu (foto autor)

4.4.3.2 Anaerobní reaktor

- Elektricky ovládaný ventil na vstupu do anaerobního reaktoru má určité zpoždění, podávací čerpadlo propouští – anaerobní kal unikal do egalizace. Bylo nutné osadit zpětnou klapku.



Obr. 75 Poloprovozní AnMBR - doplnění zpětné klapky mezi podávací čerpadlo a elektroventil na vstupu do anaerobního reaktoru, netěsnosti potrubí (foto autor)

- Na větvi ohřevu docházelo k poklesu tlaku – bylo nutné najít netěsnosti a opravit sváry, opětovně zaizolovat.



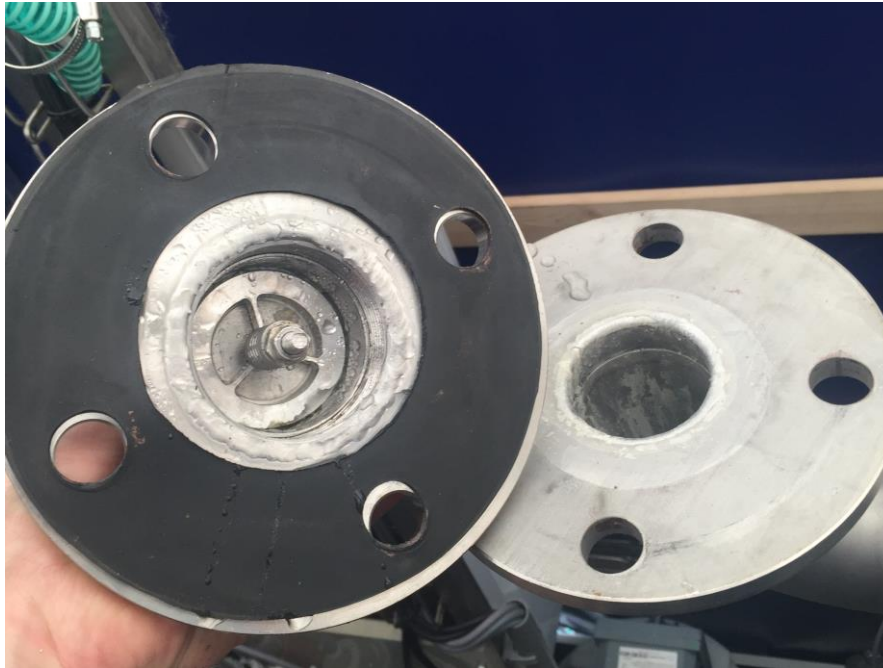
Obr. 76 Poloprovozní AnMBR - netěsnosti větve ohřevu (foto autor)

- Jelikož při provozu poloprovozní jednotky může docházet nejen k přetlakům, ale krátkodobě i podtlakům, bylo nutné vyměnit některé tlakové senzory a upravit rozsah v řídicím systému.



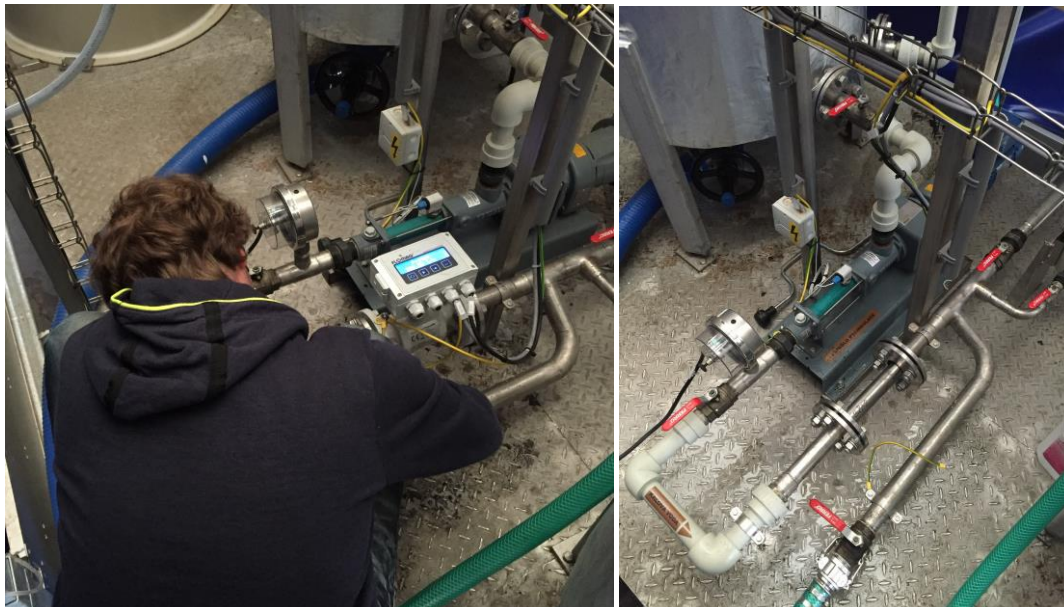
Obr. 77 Poloprovozní AnMBR - výměna tlakových senzorů (foto autor)

- Kontrola a kalibrace / výměna pojistných ventilů jednotky (anaerobní reaktor potažmo membránová komora, větev produkce bioplynu).



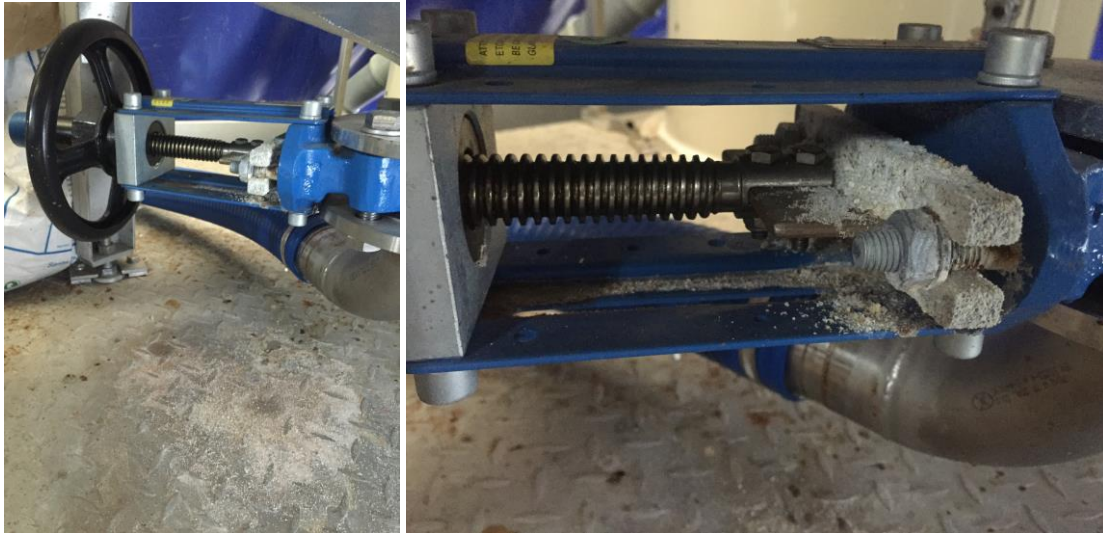
Obr. 78 Poloprovozní AnMBR - pojistný ventil anaerobního reaktoru (foto autor)

- Kalibrace indukčního průtokoměru odborným servisem – průtokoměr vykazoval velmi nevyrovnané hodnoty, přičemž recirkulační čerpadlo nelze ovládat, resp. pouze zapnuto / vypnuto. Byl doplněn opačný chod recirkulačního čerpadla spolu s příslušným ovládáním a signalizací – toto je vhodné především při regeneraci membránových modulů, přečerpávání obsahu membránové komory.



Obr. 79 Poloprovozní AnMBR - recirkulace - kalibrace indukčního průtokoměru a zpětný chod recirkulačního čerpadla (foto autor)

- Ošetření šoupat spodních výpustí anaerobního reaktoru a membránové komory. Ke zvažení je možnost elektrického ovládání – především u membránové komory (lepší automatizace regenerace membránových modulů uvnitř membránové komory).



Obr. 80 Poloprovodní AnMBR - spodní výpust' anaerobního reaktoru a membránové komory (foto autor)

- Dobudování odbočky na potrubí míchání anaerobního reaktoru – pro provoz v SBR režimu. Výška umístění manuálně ovládaného kulového uzávěru odpovídá výšce hladiny v anaerobním reaktoru 1,1 m, výška dna propojovacího potrubí mezi membránovou komorou a anaerobním reaktorem odpovídá výšce hladiny 1,5 m.



Obr. 81 Poloprovodní AnMBR - ddbočka potrubí míchání anaerobního reaktoru pro provoz v SBR režimu (foto autor)

- Vhodná by byla průhledítka i u anaerobního reaktoru - kontrola obsahu, hladiny, pěny...

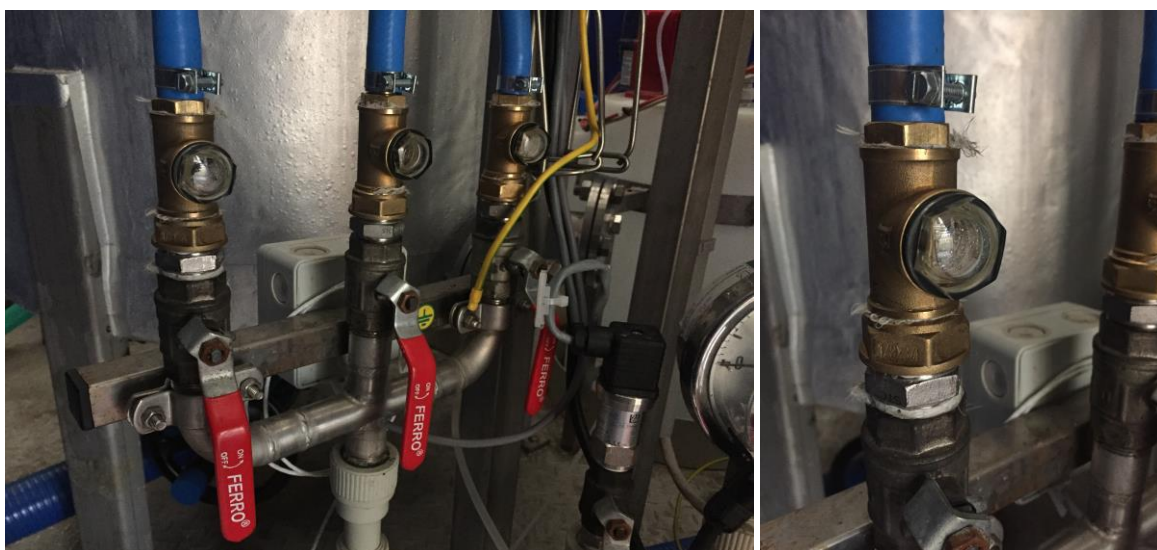
4.4.3.3 Membránová komora

- Na propojovacím potrubí mezi membránovou komorou a anaerobním reaktorem bylo nutné dobudovat uzávěr (možné zvážít elektrické ovládání šoupěte pro lepší automatizaci především regenerace membránových modulů) pro možnost odstavení - provoz SBR, regenerace, opravy... Dále byla doplněna tepelná izolace, jelikož docházelo k teplotnímu schodku mezi membránovou komorou a anaerobním reaktorem (pouze tento je vyhříván).



Obr. 82 Poloprovozní AnMBR - úpravy propojovacího potrubí mezi membránovou komorou a anaerobním reaktorem - uzávěr a tepelná izolace (foto autor)

- Pro pohodovou vizuální kontrolu permeátu byly na jednotlivých větvích membránových modulů osazeny průhledítka (umožňují také odvzdušnění / zavodnění). Další možností je výměna hadic permeátu za průhledné. Toto bylo provedeno po nečekaném znečištění větve permeátu, způsobeném pravděpodobně netěsností napojení potrubí permeátu (konkrétní místo nebylo identifikováno).



Obr. 83 Poloprovozní AnMBR - dodatečně osazená průhledítka na jednotlivých větvích permeátu (foto autor)

- Při jednom hloubkovém čištění a regeneraci membránových modulů byla provedena výměna hadic (permeát, bioplyn) a některých spojů, přetěsnění. Některá napojení byla/jsou řešena příliš složitě, či nevhodně – např. přechody materiálů.



Obr. 84 Poloprovozní AnMBR - výměna hadic a přetěsnění napojení (foto autor)

- Během provozu došlo k poklesu výkonu aeračního systému membránových modulů, což bylo způsobeno zavodněním větve kondenzátem/kalem. Po provedení hloubkového čištění a regenerace bylo dosaženo původního stavu.



Obr. 85 Poloprovozní AnMBR - kontrola aeračního systému membránových modulů (foto autor)

4.4.3.4 Odtok

- Během zkušebního provozu došlo k nečekanému znečištění větve permeátu, způsobenému pravděpodobně netěsností napojení potrubí permeátu. Konkrétní místo nebylo identifikováno, ale po hloubkovém čištění a přetěsnění bylo dosaženo původního stavu – což potvrdily rozborů odtoku.



Obr. 86 Poloprovozní AnMBR - znečištění nádrže permeátu (foto autor)

- Pro zamezení vniku nežádoucích látek a předmětů do nádrže permeátu byl doplněn poklop. Aby bylo možné nádrž lépe čistit a vyprazdňovat, byl dodatečně osazen kulový uzávěr.



Obr. 87 Poloprovozní AnMBR - nádrž permeátu - poklop a kulový uzávěr / spodní výpust (foto autor)

4.4.3.5 Chemické hospodářství

- Beze změn / problémů.
- Zvážit přívod teplé pitné vody pro přípravu chemikálií, mechanické míchání všech nádržek, místo pro skladování chemikálií.

4.4.3.6 Plynové hospodářství

- Vzhledem k četným komplikacím spojeným s kondenzátem ve větvi bioplynu byl na rozdělovacím objektu (pro jednotlivé membránové moduly) doplněn výpustný uzávěr.



Obr. 88 Poloprovozní AnMBR - rozdělovací objekt větve bioplynu s dodatečnou výpustí kondenzátu (foto autor)

- Bylo by vhodné osazení rotametrů na větvích bioplynu jednotlivých membránových modulů - řízené škrcení jednotlivých větví, vyrovnání tlakových ztrát větví aj.
- Během zkušebního provozu došlo k „utopení“ dmychadla bioplynu (kondenzát, obsah nádrže) a bylo nutné jej odvézt na čištění dodavateli, což způsobilo dlouhodobý výpadek jednotky.



Obr. 89 Poloprovozní AnMBR - kondenzát a čištění dmychadla bioplynu (foto autor)

- Filtr před dmychadlem bioplynu je nutné pravidelně čistit – volené materiály, způsob uzávěru (šroubení) a utěsnění nejsou příliš dobře řešeny a bylo nutno provést náležité zásahy. „Sítka“ filtru je vhodné zavčas obměňovat.



Obr. 90 Polopropozní AnMBR - čištění a přetěsnění filtru dmyhadla bioplynu (foto autor)

- Vzhledem ke komplikacím spojeným s vnikem filtrační směsi a kumulace kondenzátu ve větvi bioplynu byla před filtr dmyhadla (blízko výstupu z membránové komory) dobudována nádržka kondenzátu. Nádržka funguje jako vodní uzávěr, obsah je možné manuálně upouštět také pomocí kulového uzávěru ve spodní části, naopak dopouštět / odvzdušňovat horním uzávěrem.



Obr. 91 Polopropozní AnMBR - nádržka kondenzátu, vnik kalu do větve bioplynu (foto autor)

- Pro omezení tepelných ztrát a kondenzace byla větev bioplynu zaizolována. Poměrně velké tepelné ztráty vykazují okna membránové komory.



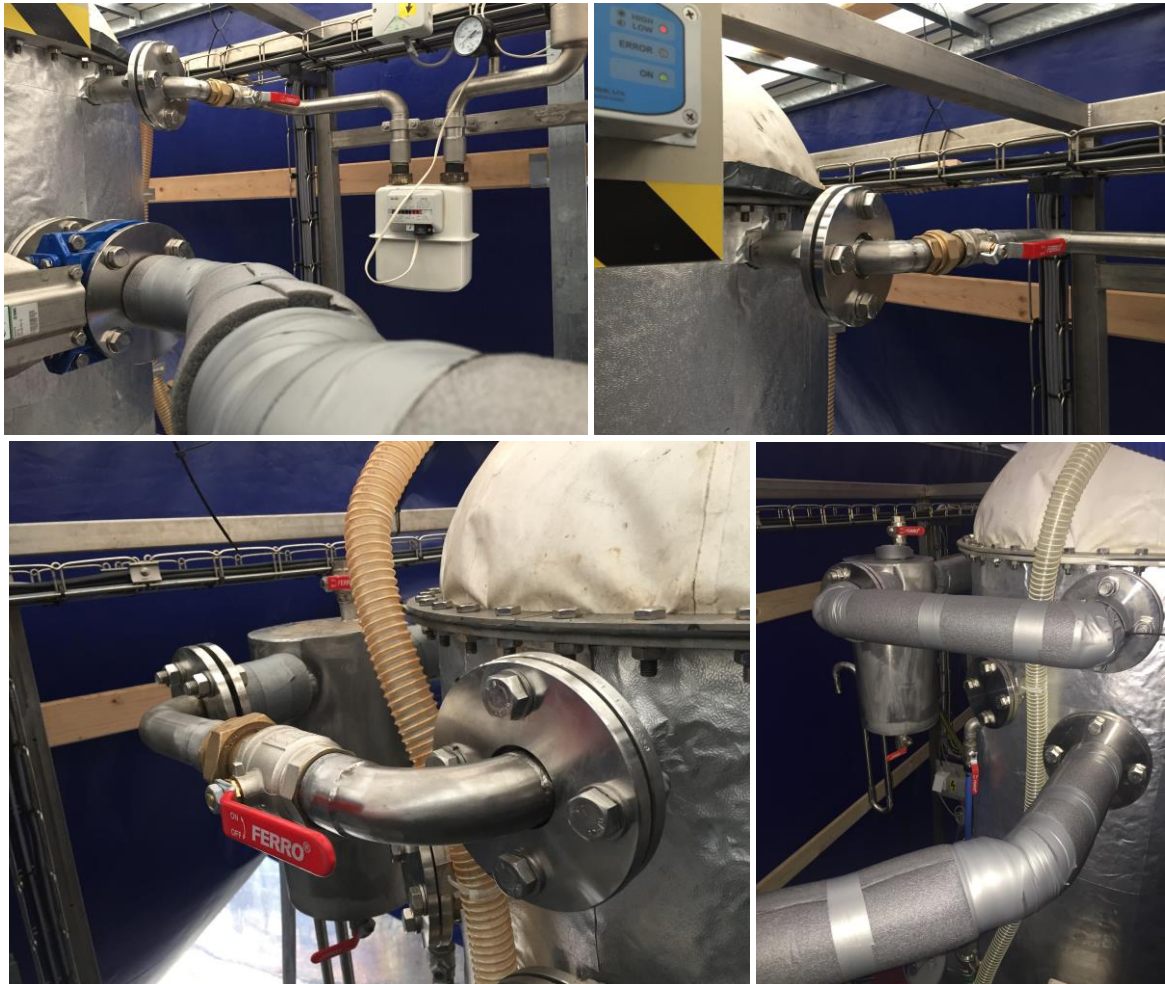
Obr. 92 Poloprovozní AnMBR - zateplení větve bioplynu (foto autor)

- Během zkušebního provozu bylo nutné oba plynoměry (větev bioplynu s dmýchadlem a větev produkce bioplynu) vyměnit, protože vlivem působení kondenzátu došlo k jejich zaseknutí.



Obr. 93 Poloprovozní AnMBR - výměna plynoměrů (foto autor)

- Vzhledem k občasnému vniku obsahu nádrží do větví bioplynu a pro usnadnění odstávky / čištění / regenerace byly na obou větvích bioplynu v těsné blízkosti stěn nádrží osazeny kulové uzávěry.



Obr. 94 Poloprovozní AnMBR - dodatečné osazení kulových uzávěrů na větvích bioplynu (foto autor)

- Během zkušebního provozu docházelo k poklesu tlaku uvnitř systému. Bylo nutné krok za krokem ověřit plynotěsnost jednotlivých částí. Finální tlaková zkouška potvrdila absenci úniků a dobré utěsnění jednotky.



Obr. 95 Poloprovozní AnMBR - identifikace úniků, zkouška plynotěsnosti (foto autor)

4.4.3.7 Měření a regulace

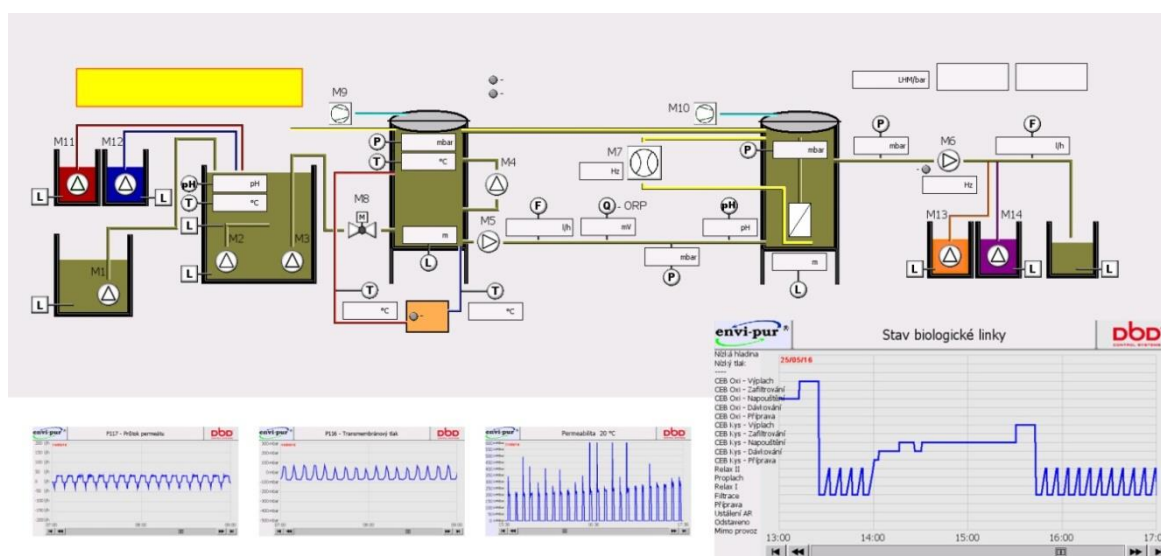
- Byla provedena řada úprav řídicího systému – především změny algoritmů, vyladění rozsahů a nastavení, doplnění funkcí, umožnění uživatelských zásahů apod.
- Byl zprovozněn zpětný chod recirkulačního čerpadla – lze spustit ale pouze manuálně, vzdálený přenos nebylo možné realizovat.



Obr. 96 Poloprovozní AnMBR - umožnění zpětného chodu recirkulačního čerpadla - ovládání a signalizace (foto autor)

- Bylo by dobré umožnit vzdálený přenos archivu – nyní možné pouze osobně připojením počítače, stažením obsahu paměťové karty.
- Pro lepší přehlednost by bylo vhodné uživatelské škálování grafů – nastavení rozsahu jednotlivých os (nyní jsou některé hodnoty téměř nečitelné / nevyhovující).

4.4.4 Zkušební provoz

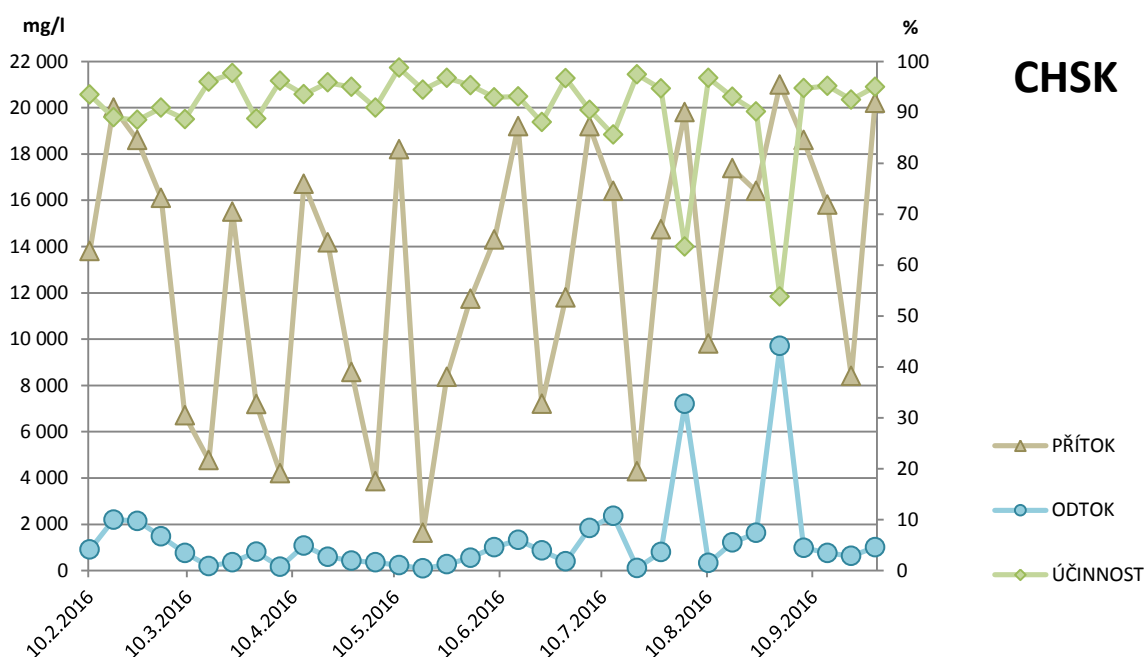


Obr. 97 Poloprovozní AnMBR - řídicí systém; grafy průtoku permeátu, transmembránového tlaku, permeability a stavu biologické linky (úprava autor)

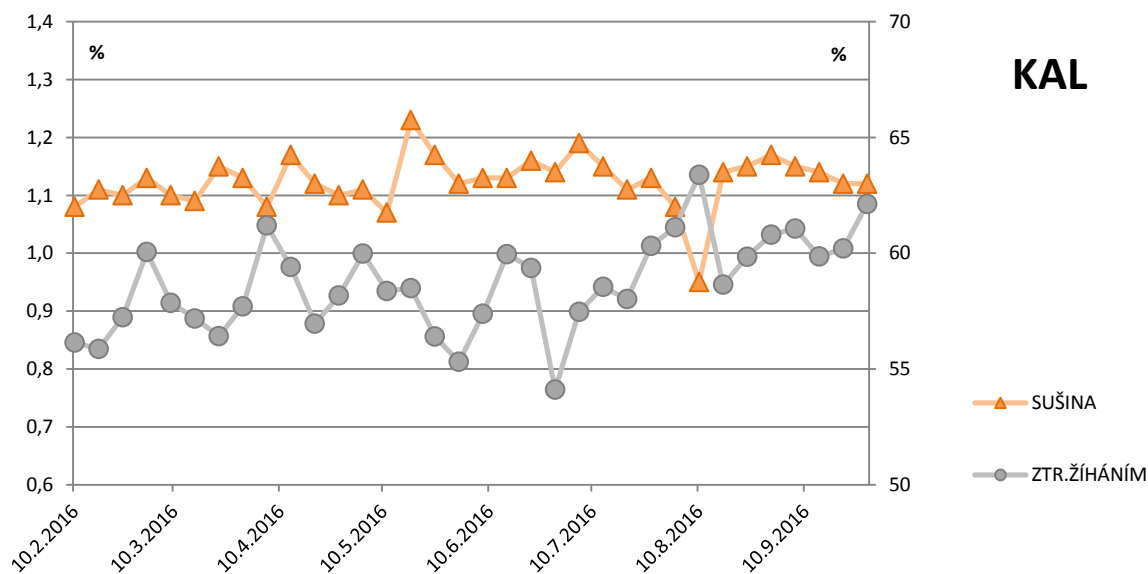
Během provozu byla měřena řada provozních hodnot - teploty (přípravná nádrž, anaerobní reaktor), pH (přípravná nádrž, recirkulační potrubí), ORP, hladiny (nádrže), průtoky (flux, recirkulace, bioplyn), tlaky (TMP, nádrže), spotřeba elektrické energie (celková, motohodiny), spotřeba chemikálií aj. Pro 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.

Výsledky provedených rozborů (přítok) korespondovaly s dostupnými údaji ČOV Pivovar Černá Hora.

Níže jsou uvedeny dva grafy – výsledky rozborů CHSK (přítok, odtok, účinnost odstranění) a kalu (sušina a ztráta žíháním) 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 elektřiny, netěsnosti systému, vadné měření tlaků (špatný senzor), a tím nesprávné automatické ovládání jednotky, zamrzání částí jednotky (odstavení), komplexní opravu dmyhadla (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“) dmyhadla. 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. 98 Poloprovozní AnMBR - vybrané rozborů - CHSK (autor)



Obr. 99 Poloproduční AnMBR - vybrané rozborů - kal (autor)

Zkušební provoz vykazoval účinnost odstranění CHSK > 90% (velmi nerovnoměrný přítok 2-21 000 mg.l⁻¹ 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⁻².h⁻¹), upraveny délky jednotlivých cyklů (filtrace / relax / zpětný proplach). Dodavatelem a výrobcem membránových modulů doporučené nastavení CEB se osvědčilo a nebylo zapotřebí upravovat.

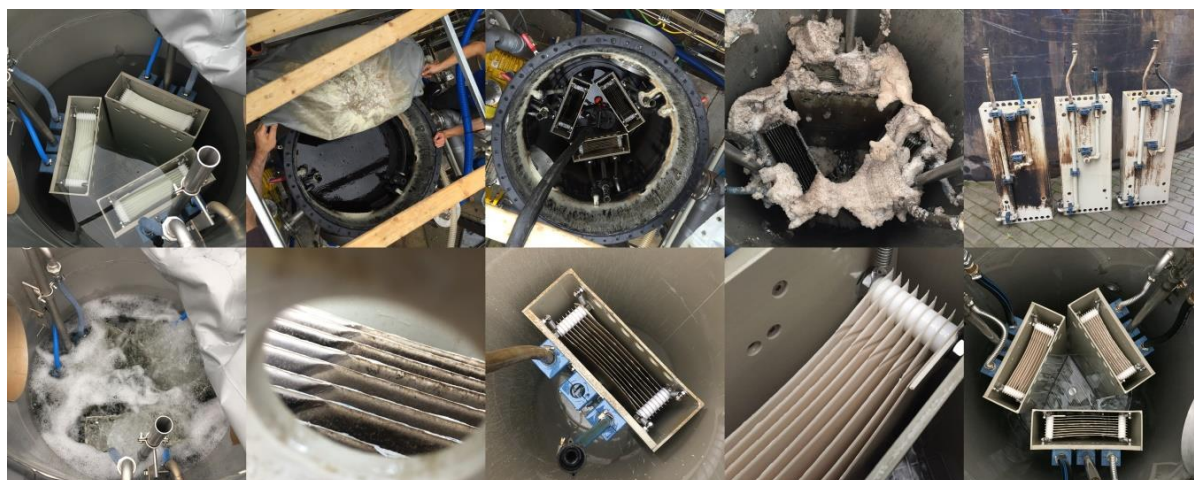
4.4.5 Čištění a regenerace

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 (a doporučení výrobce [127]) 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^{-1} (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. Nasypeme 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. 100 Poloprovodní 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.



Obr. 101 Poloprovozní AnMBR - přepravní kontejner/nádrž membránových modulů, mechanické čištění (foto autor)

4.4.6 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**, resp. při nižších okolních teplotách blížících se bodu mrazu – doporučujeme jednotku nenechávat ve vozíku, ale pokud možno umístit

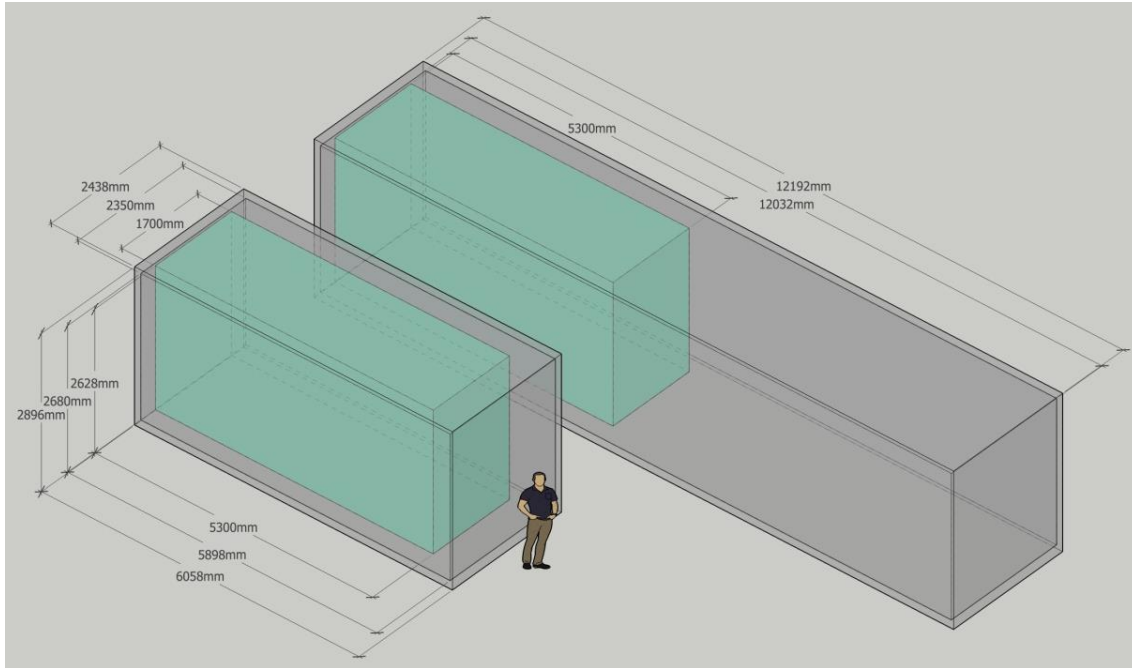
v temperovaných prostorách ČOV. Ideálním řešením by byla instalace jednotky do vhodně upraveného přepravního kontejneru odolnému vůči povětrnostním vlivům (viz níže). Problémem však nadále zůstane zabezpečení nezámrznosti přívodního potrubí surové OV. V letních měsících naopak může docházet k přehřívání – nutno větrat a ideálně jednotku umístit do stínu (případně instalovat vhodnou vzduchotechniku / klimatizaci).

Tab. 12 Rozměry poloprovozní jednotky a vybraných kontejnerů [128][129]

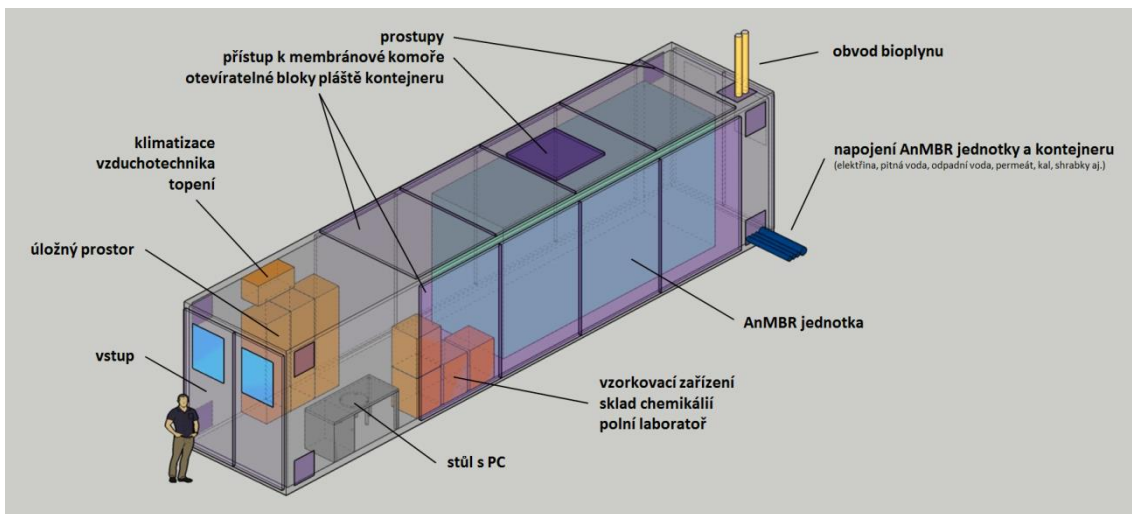
AnMBR jednotka (kovový rám)	Délka	Šířka	Výška	Objem	Hmotnost
	mm	mm	mm	m ³	kg
	5 300	1 700	2 628	23,68	1 280

Typ kontejneru	Vnější			Vnitřní			Hmotnost	Objem	
	délka	šířka	výška	délka	šířka	výška	minimální	vypočtený	
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	kg	m ³	
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

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 Příloha 5 [128]). 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, polní laboratoř (rozbory, kalibrace apod.), stůl s počítačem (archivace dat, provozní deník aj.) aj.



Obr. 102 Přepravní kontejner - hmotový model 20'HC a 40'HC (autor)



Obr. 103 Schématický návrh 40'HC kontejneru pro umístění poloprovodní jednotky AnMBR (autor)

- 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 rotometry - pro přesné nastavení a kontrolu množství vhnášeného bioplynu.
- **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 $0,71 \text{ m}^3$, 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 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 zkušební 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 4.4.6 „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
- [4] *Potravinářský průmysl v ČR* [online]. [cit. 2016-10-06]. Dostupné z:
<http://www.czech.cz/cz/Podnikani/Firmy-v-CR/Potravinarsky-prumysl-v-CR>
- [5] *Státní zemědělská a potravinářská inspekce* [online]. Dostupné z: <http://www.szpi.gov.cz>
- [6] *Státní veterinární správa* [online]. Dostupné z: <https://www.svscr.cz>
- [7] *Potravinářská komora České republiky: Výroční zpráva PK ČR 2016* [online]. [cit. 2017-06-29]. Dostupné z: <http://www.foodnet.cz/polozka/?jmeno=Vyrocn%C3%AD+zprava+PK+CR+2016&id=38224>
- [8] *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
- [9] *Český svaz pivovarů a sladoven* [online]. Dostupné z: <http://ceske-pivo.cz>
- [10] *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>
- [11] *Fakta a zajímavosti* [online]. Český svaz pivovarů a sladoven [cit. 2017-06-10]. Dostupné z: <http://ceske-pivo.cz/fakta-a-zajimavosti>
- [12] *Rekordní výstav piva v roce 2016 podpořen exportem i vyšší spotřebou na tuzemském trhu* [online]. Český svaz pivovarů a sladoven [cit. 2017-06-10]. Dostupné z: <http://ceske-pivo.cz/tz/rekordni-vystav-piva-v-roce-2016-podporen-exportem-i-vyssi-spotrebou-na-tuzemskem-trhu>
- [13] 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.
- [14] GRADY, C. P. Leslie. *Biological wastewater treatment*. Third Edition. Boca Raton, FL: IWA Publishing / CRC Press, 2011, 1022 s. ISBN 9780849396793.
- [15] MALÝ, Josef a Petr HLAVÍNEK. *Čištění průmyslových odpadních vod*. Brno: NOEL 2000, 1996. ISBN 80-86020-05-3.
- [16] HLAVÍNEK, Petr, Jan MIČÍN a Petr PRAX. *Stokování a čištění odpadních vod*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 80-214-2535-0.
- [17] JAN BINDZAR A KOLEKTIV. *Základy úpravy a čištění vod*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2009. ISBN 978-807-0807-293.

- [18] PĚČEK, J. *Úprava kalů z čistíren odpadních vod před jejich dalším využitím*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 86 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Jaroslav Jícha, CSc.
- [19] 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>
- [20] 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>
- [21] PALATÝ, Zdeněk. *Membránové procesy*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2012, 296 s. ISBN 978-80-7080-808-5.
- [22] MIKULÁŠEK, Petr. *Tlakové membránové procesy*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2013, 254 s. ISBN 978-80-7080-862-7.
- [23] 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.
- [24] QUINS spol. s r.o.: *Mikrofiltrační jednotky* [online]. [cit. 2015-12-03]. Dostupné z: <http://www.quins.cz/prumyslova-reseni/mikrofiltracni-jednotky>
- [25] *Membrane Operation* [online]. [cit. 2016-02-07]. Dostupné z: http://www.separationprocesses.com/Membrane/MT_Chp05i.htm
- [26] POLÁŠEK, Daniel. *Čištění odpadních vod se separací kalu membránovým modulem*. Brno, 2009. 81 s. Bakalářská práce. FAST VUT v Brně.
- [27] 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.
- [28] 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>
- [29] 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>
- [30] 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>

- [31] *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
- [32] ADI-ANMBR [online]. [cit. 2016-07-13]. Dostupné z: <https://www.adisystemsinc.com/en/technologies/anaerobic-treatment/adi-anmbr>
- [33] 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.
- [34] SIMATE, Geoffrey S., John CLUETT, Sunny E. IYUKE, Evans T. MUSAPATIKA, Sehliselo NDLOVU, Lubinda F. WALUBITA a Allex 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>
- [35] 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>
- [36] 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>
- [37] 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>
- [38] KHAN, M.A., H.H. NGO, W.S. GUO, et al. Comparing the value of bioproducts from different stages of anaerobic membrane bioreactors. *Bioresour. Technol.* 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] 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>
- [40] *Česká bioplynová asociace: Co je bioplyn?* [online]. [cit. 2016-11-10]. Dostupné z: <http://www.czba.cz/bioplyn/>
- [41] 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.
- [42] *Bioprofit: Anaerobní technologie* [online]. [cit. 2016-11-10]. Dostupné z: http://www.bioplyn.cz/at_popis.htm
- [43] *Schaumann: Biochemie výroby bioplynu* [online]. [cit. 2016-11-10]. Dostupné z: <http://bioplyn.schaumann.cz/vyroba/>

- [44] *Enviton: Technologie bioplynových stanic* [online]. [cit. 2016-11-10]. Dostupné z: <http://www.bioplynovestanice.cz/technologie-bps/>
- [45] 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>
- [46] 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>
- [47] *Agronomická fakulta MENDLU: Technická zařízení pro energetické transformace bioplynu* [online]. [cit. 2016-11-11]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/6524659-Technicka-zarizeni-pro-energeticke-transformace-bioplynu.html>
- [48] *Schaumann: Tvorba bioplynu* [online]. [cit. 2016-11-10]. Dostupné z: <http://bioplyn.schaumann.cz/vyroba/vznik-bioplynu/>
- [49] 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>
- [50] 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>
- [51] JUNGA, Petr, Tomáš VÍTĚZ a Petr TRÁVNÍČEK. *Technika pro zpracování odpadů*. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2015. ISBN 978-80-7509-208-3. Dostupné z: <http://docplayer.cz/3739025-Technika-pro-zpracovani-odpadu-ii.html>
- [52] CHEN, Cheng, Wenshan GUO, Huu 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>
- [53] 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.
- [54] 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>
- [55] 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>
- [56] 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>
- [57] 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>
- [58] 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>
- [59] 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>
- [60] 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>
- [61] 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>
- [62] 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>
- [63] 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>
- [64] 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>
- [65] 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>
- [66] 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>

- [67] 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>
- [68] 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>
- [69] 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>
- [70] 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>
- [71] 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.
- [72] *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/>
- [73] *PENTAIR Anaerobic MBR: X-FLOW COMPACT 33V* [online]. [cit. 2015-02-06]. Dostupné z: <http://advancedfiltration.pentair.com/en/products/anaerobic-mbr>
- [74] *The MBR site: ZeeWeed - SUEZ Water Technologies & Solutions (formerly GEWPT) - ZW500D* [online]. [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://www.thembrsite.com/products/ge-zeeweed>
- [75] 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.
- [76] *KUBOTA Corporation* [online]. Dostupné z: <http://www.kubota-global.net>
- [77] *KUBOTA Submerged Membrane Unit SP Series - Catalog* [online]. [cit. 2017-10-23]. Dostupné z: https://www.kubota-global.net/products/solutions/lineup/pdf/KUBOTA_Submerged_Membrane_Unit_SP_Series.pdf
- [78] *KUBOTA Submerged Membrane Unit - Brochure* [online]. [cit. 2017-10-23]. Dostupné z: <https://www.kubota-global.net/products/solutions/lineup/pdf/Brochure.pdf>
- [79] *KUBOTA Anaerobic MBR: Recovery of clean energy from organic waste - Brochure* [katalog]. 2013.
- [80] KANAI, M., V. FERRE, S. WAKAHARA, T. YAMAMOTO a M. MORO. A novel combination of methane fermentation and MBR - Kubota Submerged Anaerobic Membrane Bioreactor process. *Desalination*.

- 2010, 250(3), 964-967. DOI: 10.1016/j.desal.2009.09.082. ISSN 00119164. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S001191640901114X>
- [81] 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>
- [82] *Veolia Water Technologies* [online]. Dostupné z: <https://www.veoliawatertechnologies.com>
- [83] *Pentair* [online]. Dostupné z: <https://www.pentair.com>
- [84] *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
- [85] *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>
- [86] *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
- [87] *Gulf Industry Online: Veolia launches Memthane* [online]. 2012 [cit. 2017-09-07]. Dostupné z: https://www.gulfindustryonline.com/news/10587_Veolia-launches-Memthane.html
- [88] *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>
- [89] *ZeeWeed 500 Membrane: Treat high turbidity water with a membrane designed for greater solid tolerances* [online]. 2012 [cit. 2016-02-17]. Dostupné z: <https://www.suezwatertechnologies.com/products/zeeweeds-500-membrane>
- [90] *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>
- [91] *Immersed anaerobic MBRs: are they viable?* [online]. [cit. 2016-02-17]. Dostupné z: <http://www.thembrsite.com/features/immersed-anaerobic-mbrs-viable/>
- [92] 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.
- [93] *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
- [94] 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>

- [95] 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>
- [96] 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>
- [97] *The MBR Site: Membrane Products* [online]. Dostupné z: <http://www.thembrsite.com/products/>
- [98] *Koch Membrane Systems: PURON PULSION MBR* [brochure]. [cit. 2017-02-08]. Dostupné z: <http://www.kochmembrane.com/PDFs/Brochures/pulsion-brochure.aspx>
- [99] 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>
- [100] *The MBR Site: Largest MBR plants – Worldwide* [online]. [cit. 2017-10]. Dostupné z: <http://www.thembrsite.com/about-mbrs/largest-mbr-plants/>
- [101] *ScienceDirect* [online]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com>
- [102] *Scientific.net* [online]. Dostupné z: <https://www.scientific.net>
- [103] *Scientific Research* [online]. Dostupné z: <http://www.scirp.org>
- [104] *ResearchGate* [online]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net>
- [105] *Koch Membrane Systems: Next-Generation PURON MBR Modules* [online]. [cit. 2016-02-17]. Dostupné z WWW: <http://www.kochmembrane.com/Landing/PURON-MBR.aspx>
- [106] SVOJITKA, Jan, Lukáš DVOŘÁK, Martin STUDER, Jürg Oliver STRAUB, Heinz FRÖMELT a Thomas WINTGENS. Performance of an anaerobic membrane bioreactor for pharmaceutical wastewater treatment. *Bioresource Technology*. 2017, 229, 180-189. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.01.022. ISSN 09608524. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852417300421>
- [107] *Aplikace anaerobního membránového bioreaktoru pro čištění farmaceutických odpadních vod: aneb zkušenosti a výsledky z odborné zahraniční stáže (Lukáš Dvořák)* [online]. 2013 [cit. 2017-06-17]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/7284254-Aplikace-anaerobniho-membranoveho-bioreaktoru-pro-cistení-farmaceutických-odpadních-vod.html>
- [108] *ASIO, spol. s r.o.* [online]. Dostupné z: <http://www.asio.cz>
- [109] *Innovation Demonstration for a Competitive and Innovative European Water Reuse Sector: DEMOWARE* [online]. [cit. 2017-09-08]. Dostupné z: <http://demoware.eu/en>
- [110] *ANAEROBNÍ MEMBRÁNOVÝ BIOREAKTOR: Inovativní technologie pro znovuvyužití vody a jejich demonstrace v reálných aplikacích* [online]. [cit. 2017-09-08]. Dostupné z: <http://www.asio.cz/cz/demoware-anaerobni-membranovy-bioreaktor>
- [111] *STUDENÝ ANAEROBNÍ MEMBRÁNOVÝ BIOREAKTOR: Recyklace energie ze splaškových odpadních vod v anaerobních membránových reaktorech v prostředí střední Evropy* [online]. [cit. 2017-09-08]. Dostupné z: <http://www.asio.cz/cz/anmem-studený-anaerobni-membranovy-bioreaktor>

- [112] TAČR: *Program Epsilon* [online]. [cit. 2017-09-08]. Dostupné z: <https://www.tacr.cz/index.php/cz/programy/program-epsilon.html>
- [113] *Černá Hora* [online]. Dostupné z: <http://www.pivovarcernahora.cz>
- [114] *Jihomoravský kraj: Pivovar Černá Hora* [online]. [cit. 2017-01-26]. Dostupné z: <http://www.jizni-morava.cz/objekt/31069-pivovar-cerna-hora>
- [115] *Černá Hora: SOUČASNOST PIVOVARU* [online]. [cit. 2017-01-26]. Dostupné z: <http://www.pivovarcernahora.cz/soucasnost>
- [116] *Mapy Google* [online]. Dostupné z: <https://www.google.cz/maps>
- [117] *CREA Hydro & Energy: Nové energeticky efektivní metody čištění průmyslových odpadních vod* [online]. [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <http://www.creacz.com/cz/Projekt3/>
- [118] *Czech Renewable Energy Alliance* [online]. Dostupné z: <http://www.creacz.com>
- [119] *Kubota: Membrane Cartridge Specification Sheet (Type 203)*. Specification No.: KE-06-002.
- [120] *KUBOTA MBR Testing System with XJ3 O&M Manual*. 2004.
- [121] *BIO-CEL Lab: Submerged membrane module for wastewater treatment*. USER MANUAL Version M_BC_Lab_V1_00e.
- [122] *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>
- [123] 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/>
- [124] *Sestava modelu: Výkres 1:20 číslo SV14-005-224-0*. ENVI-PUR, 2015.
- [125] MARŠÍK, Miroslav. *Návod k obsluze poloprovozního modelu – Anaerobní reaktor s membránovou separací*. ENVI-PUR, 2015.
- [126] *Model AnMBR Separace: NÁVOD K OBSLUZE OPERÁTORSKÉHO PANELU*. DBD CONTROL SYSTEMS, 2015.
- [127] *BIO-CEL: Submerged membrane module for wastewater treatment*. USER MANUAL Version M_BC_V6_03e.
- [128] *Model AnMBR: Výkres 1:20 číslo SV14-005-101*. ENVI-PUR, 2014.
- [129] CONTAINEX: *Přepravní kontejner* [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://www.containex.cz/cs/produkty/prepravni-kontejner>
- [130] 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>
- [131] 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>

- [132] 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>

SEZNAM TABULEK

Tab. 1	Produkce potravin - základní kategorie a stádia výroby [4] (úprava autor)	6
Tab. 2	Výroba vybraných produktů v ČR [7]	6
Tab. 3	Porovnání konvenčního aerobního a anaerobního čištění, MBR a AnMBR [19] (úprava autor)	11
Tab. 4	Výhody a nevýhody AnMBR pro zmírnění potíží vyvolaných průmyslovými OV v extrémních podmínkách [20] (úprava autor).....	11
Tab. 5	Hlavní membránové procesy [21].....	13
Tab. 6	Výhody, nevýhody / omezení, potenciály a výzvy / úkoly AnMBR [33] (úprava autor).....	19
Tab. 7	Kvalita OV ČOV Pivovar Černá Hora na přítoku (data poskytl provozovatel)	36
Tab. 8	Srovnání laboratorně testovaných membránových modulů [119][121][123] (úprava autor).....	46
Tab. 9	Rozměry a pracovní objemy nádrží poloprovozního AnMBR [125]	58
Tab. 10	Intervaly kontrol obsluhy poloprovozního AnMBR dle dodavatele [125]	65
Tab. 11	Souhrnný přehled závad a úprav poloprovozního AnMBR (autor).....	70
Tab. 12	Rozměry poloprovozní jednotky a vybraných kontejnerů [128][129]	89

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Infografika – suroviny potřebné pro výrobu jednoho půllitru českého ležáku a základní hospodářské výsledky pivovarského oboru v roce 2016 [11][12]	8
Obr. 2	Způsoby čištění odpadních vod – základní rozdělení [13][14][15][16] (úprava autor).....	9
Obr. 3	Přehled membránové separace ve vztahu k velikosti pórů, respektive zachycených / propuštěných částic (Příloha 1) [24]	13
Obr. 4	Průtok membránou inside-out a outside-in [23][26] (úprava autor)	16
Obr. 5	Filtrace dead-end a cross-flow [23][26] (úprava autor).....	16
Obr. 6	Filtrační režim s konstantním tlakem / konstantním průtokem [27] (úprava autor).....	17
Obr. 7	Běžné složení bioplynu [40][41][42][47] (úprava autor)	20
Obr. 8	Schéma anaerobního rozkladu za tvorby bioplynu [48]	21
Obr. 9	Zásobníky bioplynu [51] (úprava autor).....	21
Obr. 10	Využití bioplynu [47] (úprava autor).....	22
Obr. 11	Obecné způsoby omezení ucpávání/zanášení membrán (mechanické a chemické) [60][71] (úprava autor).....	23
Obr. 12	Druhy ucpávání / zanášení membrán [62] (úprava autor)	23
Obr. 13	Faktory ovlivňující ucpávání / zanášení membrán v AnMBR [20][64] (úprava autor)	24
Obr. 14	Ucpávání a čištění membrán během dlouhodobého provozu reaktoru [60] (úprava autor)	25
Obr. 15	Příklady komerčních membránových modulů – deskové (Microdyn-Nadir BIO-CEL), tubulární (Pentair X-Flow), dutá vlákna (GE ZeeWeed) [72-74]	26
Obr. 16	Znázornění základních struktur membrán (průřez) [23] (úprava autor)	27
Obr. 17	Základní konfigurace membránových bioreaktorů [75] (úprava autor)	28
Obr. 18	Kubota SAMBR – schéma procesu a membránový modul [80][78].....	29
Obr. 19	Veolia-Pentair AnMBR – sériová a paralelní konfigurace tubulárních membránových modulů [84].....	29
Obr. 20	Veolia Memthane 2.0 – schéma procesu [86]	30
Obr. 21	Veolia Memthane – příklad a membránové moduly Pentair X-Flow [86][84].....	31
Obr. 22	Pilotní / demonstrační jednotka Veolia Memthane [87][86]	31
Obr. 23	GE AnMBR – jednotka a membránový modul ZeeWeed 500 [88][89]	32
Obr. 24	GE AnMBR – schéma procesu [90]	32
Obr. 25	Pilotní AnMBR s ponornými membránovými moduly tvořenými dutými vlákny (Puron, KMS) [91].....	33
Obr. 26	Poloprovozní side-stream AnMBR pro čištění farmaceutických OV [107].....	34

Obr. 27	Pilotní AnMBR tuzemské firmy ASIO, spol. s r.o. [110][111]	34
Obr. 28	Evoluce návrhu AnMBR a případné možnosti rozšíření (autor).....	35
Obr. 29	Pivovar Černá Hora [116].....	36
Obr. 30	Anaerobně-aerobní ČOV Pivovar Černá Hora (foto autor, 2013)	37
Obr. 31	ČOV Pivovar Černá Hora - řídicí systém - přehled (foto autor, 2013).....	37
Obr. 32	ČOV Pivovar Černá Hora - čerpací stanice (foto autor, 2013).....	38
Obr. 33	ČOV Pivovar Černá Hora - mechanické předčištění (foto autor, 2013)	38
Obr. 34	ČOV Pivovar Černá Hora - acidifikační nádrž, mixtank (foto autor, 2013).....	39
Obr. 35	ČOV Pivovar Černá Hora - chemické hospodářství (foto autor, 2013)	39
Obr. 36	ČOV Pivovar Černá Hora - IC reaktor (foto autor, 2013).....	40
Obr. 37	ČOV Pivovar Černá Hora - dezodorační kompostový filtr (foto autor, 2013)	41
Obr. 38	ČOV Pivovar Černá Hora - aktivační nádrž s vestavnými dosazovacími nádržemi, uskladňovací nádrž kalu, armaturní komora (foto autor, 2013)	42
Obr. 39	ČOV Pivovar Černá Hora - dmychárna (foto autor, 2013)	43
Obr. 40	ČOV Pivovar Černá Hora - kalová odstředivka a flokulační stanice (foto autor, 2013).....	43
Obr. 41	ČOV Pivovar Černá Hora - kogenerační jednotky, plynové hospodářství (foto autor, 2013)	44
Obr. 42	Laboratorní moduly Kubota a Microdyn-Nadir (foto autor).....	44
Obr. 43	Membránové panely Kubota Cartridge Type 203 a vyrobený housing (foto autor).....	45
Obr. 44	Membránový modul Microdyn Nadir BIO-CEL LAB BC25x25 (foto autor).....	46
Obr. 45	Laboratorní sestava pro testování ponorných membránových modulů - schéma a foto [123] (autor).....	47
Obr. 46	Laboratorní AnMBR sestava - ovládání a záznam [123] (úprava autor)	48
Obr. 47	Laboratorní testování membránových modulů: závislost TMP na čase při různých hodnotách fluxu, mezofilní režim, modul Microdyn-Nadir [123] (autor)	49
Obr. 48	Laboratorní testování membránových modulů: závislost TMP na čase při různých hodnotách fluxu, mezofilní režim, modul Kubota [123] (autor)	49
Obr. 49	Laboratorní testování membránových modulů: porovnání závislostí TMP na čase obou membránových modulů při středních hodnotách fluxu [123] (autor).....	50
Obr. 50	Laboratorní testování membránových modulů: porovnání jednotlivých testovaných provozních cyklů při hodnotě fluxu $12 \text{ l.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$, Microdyn-Nadir [123] (autor)	51
Obr. 51	Laboratorní testování membránových modulů: porovnání jednotlivých testovaných provozních cyklů při hodnotě fluxu $12 \text{ l.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$, Kubota [123] (autor)	51
Obr. 52	Laboratorní testování membránových modulů: porovnání cyklů filtrace+relaxace a filtrace+propírání plynem při hodnotě fluxu $12 \text{ l.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$, Microdyn-Nadir (plné čáry) a Kubota (čárkované) [123] (autor).....	52

Obr. 53	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 $12 \text{ l}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ [123] (autor)	52
Obr. 54	Membránové moduly před regenerací chemickou lázní v laboratorním AnMBR (foto autor).....	53
Obr. 55	Poloprovozní AnMBR - výkres s popisem (Příloha 4) [124]	54
Obr. 56	Poloprovozní AnMBR - přípravná nádrž, spádové síto (foto autor).....	55
Obr. 57	Poloprovozní AnMBR - anaerobní reaktor, ohřev (foto autor).....	56
Obr. 58	Poloprovozní AnMBR - vřetenové míchací čerpadlo, spodní výpusti (foto autor)	56
Obr. 59	Poloprovozní AnMBR - recirkulační potrubí, přepadové potrubí, potrubí permeátu (foto autor)	57
Obr. 60	Poloprovozní AnMBR - membránová komora, membránové moduly (foto autor).....	57
Obr. 61	Poloprovozní AnMBR - nádrž permeátu (foto autor)	58
Obr. 62	Vybrané membránové moduly osazené v poloprovozním AnMBR, SEM snímky (foto autor)	59
Obr. 63	Poloprovozní AnMBR - chemické hospodářství pro přípravnou nádrž a membránovou komoru (foto autor)	60
Obr. 64	Poloprovozní AnMBR - plynové hospodářství: dmychadlo, filtr, sběrná nádržka kondenzátu, aerační elementy pod membránovými moduly a rozdělovací objekt, plynoměry a plynové vaky anaerobního reaktoru / membránové komory, signalizace úniku plynu (foto autor)	61
Obr. 65	Poloprovozní AnMBR - MaR - vizualizace č. 1 [125]	62
Obr. 66	Poloprovozní AnMBR - MaR - vizualizace č. 2 [125]	62
Obr. 67	Poloprovozní AnMBR - MaR - parametry filtrování linky [125]	63
Obr. 68	Poloprovozní AnMBR - MaR - Chemický zpětný proplach (CEB) [125]	64
Obr. 69	Čerpací jímka, čerpání surové vody, ČOV Pivovar Černá Hora (foto autor)	66
Obr. 70	Poloprovozní AnMBR jednotka (foto autor)	68
Obr. 71	Zamrzání poloprovozního AnMBR (foto autor)	72
Obr. 72	Poloprovozní AnMBR - nevhodný tvar přelivné hrany a velký sklon spádového síta (foto autor)	72
Obr. 73	Poloprovozní AnMBR - zahlcení sběrného koše mechanického předčištění a dobudování přepadu na shrabky (foto autor)	73
Obr. 74	Poloprovozní AnMBR - znečišťování egalizační nádrže a pění obsahu (foto autor)	73
Obr. 75	Poloprovozní AnMBR - doplnění zpětné klapky mezi podávací čerpadlo a elektroventil na vstupu do anaerobního reaktoru, netěsnosti potrubí (foto autor)	74
Obr. 76	Poloprovozní AnMBR - netěsnosti větve ohřevu (foto autor)	74
Obr. 77	Poloprovozní AnMBR - výměna tlakových senzorů (foto autor).....	74
Obr. 78	Poloprovozní AnMBR - pojistný ventil anaerobního reaktoru (foto autor)	75

Obr. 79	Poloprovozní AnMBR - recirkulace - kalibrace indukčního průtokoměru a zpětný chod recirkulačního čerpadla (foto autor).....	75
Obr. 80	Poloprovozní AnMBR - spodní výpusť anaerobního reaktoru a membránové komory (foto autor).....	76
Obr. 81	Poloprovozní AnMBR - ddbočka potrubí míchání anaerobního reaktoru pro provoz v SBR režimu (foto autor)	76
Obr. 82	Poloprovozní AnMBR - úpravy propojovacího potrubí mezi membránovou komorou a anaerobním reaktorem - uzávěr a tepelná izolace (foto autor)	77
Obr. 83	Poloprovozní AnMBR - dodatečně osazená průhledítka na jednotlivých větvích permeátu (foto autor).....	77
Obr. 84	Poloprovozní AnMBR - výměna hadic a přetěsnění napojení (foto autor).....	78
Obr. 85	Poloprovozní AnMBR - kontrola aeračního systému membránových modulů (foto autor).....	78
Obr. 86	Poloprovozní AnMBR - znečištění nádrže permeátu (foto autor)	79
Obr. 87	Poloprovozní AnMBR - nádrž permeátu - poklop a kulový uzávěr / spodní výpusť (foto autor).....	79
Obr. 88	Poloprovozní AnMBR - rozdělovací objekt větve bioplynu s dodatečnou výpusť kondenzátu (foto autor)	80
Obr. 89	Poloprovozní AnMBR - kondenzát a čištění dmychadla bioplynu (foto autor).....	80
Obr. 90	Poloprovozní AnMBR - čištění a přetěsnění filtru dmychadla bioplynu (foto autor).....	81
Obr. 91	Poloprovozní AnMBR - nádržka kondenzátu, vnik kalu do větve bioplynu (foto autor).....	81
Obr. 92	Poloprovozní AnMBR - zateplení větve bioplynu (foto autor).....	82
Obr. 93	Poloprovozní AnMBR - výměna plynoměřů (foto autor)	82
Obr. 94	Poloprovozní AnMBR - dodatečné osazení kulových uzávěrů na větvích bioplynu (foto autor)	83
Obr. 95	Poloprovozní AnMBR - identifikace úniků, zkouška plynotěsnosti (foto autor)	83
Obr. 96	Poloprovozní AnMBR - umožnění zpětného chodu recirkulačního čerpadla - ovládání a signalizace (foto autor)	84
Obr. 97	Poloprovozní AnMBR - řídicí systém; grafy průtoku permeátu, transmembránového tlaku, permeability a stavu biologické linky (úprava autor)	84
Obr. 98	Poloprovozní AnMBR - vybrané rozbory - CHSK (autor)	85
Obr. 99	Poloprovozní AnMBR - vybrané rozbory - kal (autor).....	86
Obr. 100	Poloprovozní AnMBR - regenerace membránových modulů, mechanické i chemické čištění (foto autor)	87
Obr. 101	Poloprovozní AnMBR - přepravní kontejner/nádrž membránových modulů, mechanické čištění (foto autor)	88
Obr. 102	Přepravní kontejner - hmotový model 20'HC a 40'HC (autor).....	90
Obr. 103	Schématický návrh 40'HC kontejneru pro umístění poloprovozní jednotky AnMBR (autor)	90

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A.....	separační plocha membrány
ADUF.....	anaerobní digesce s použitím ultrafiltrace (Anaerobic Digestion UltraFiltration)
AF.....	anaerobní filtr (Anaerobic Filter)
AFBR.....	typ anaerobního reaktoru s fluidním ložem (Anaerobic Fluidized Bed Reactor)
AnMBR.....	anaerobní membránový bioreaktor (Anaerobic Membrane BioReactor)
BP.....	bioplyn
BSK.....	biologická spotřeba kyslíku
CASP.....	konvenční technologie aktivovaného kalu (Conventional Activated Sludge Process)
CEB.....	chemicky obohacený zpětný proplach (Chemical Enhanced Backwash)
c_F	koncentrace separované složky ve vstupním proudu
CO_2	oxid uhličitý
c_p	koncentrace látky v permeátu
CPE.....	syntetický polymer (Chlorinated PolyEthylene)
CSTR.....	průtočný míchaný reaktor (Continuous flow Stirred-Tank Reactor)
ČOV.....	čistírna odpadních vod
ČS.....	čerpací stanice
ČSPS.....	Český svaz pivovarů a sladoven
EGSB.....	typ anaerobního reaktoru s granulovanou biomasou v expandovaném loži (Expanded Granular Sludge Bed)
EPS.....	extracelulární polymerní substance (Extracellular Polymeric Substances)
EU.....	Evropská unie
FS.....	membránový modul tvořený plochými / deskovými membránami (Flat Sheet)
HF.....	membránový modul tvořený dutými vlákny (Hollow Fibre)
HRT.....	hydraulická doba zdržení (Hydraulic Retention Time)
CH_4	metan
CHSK.....	biochemická spotřeba kyslíku
IC.....	anaerobní reaktor s vnitřní cirkulací na bázi kolony (Internal Circulation)
J_{crit}	kritický (prů)tok membránou / flux
J_v	intenzita objemového (prů)toky (flux)
KSMU.....	ponorný membránový modul Kubota (Kubota Submerged Membrane Unit)
LCFA.....	vyšší mastné kyseliny (Long Chain Fatty Acids)

MaR.....	měření a regulace
MARS	anaerobní membránový (bio)reaktor (Membrane Anaerobic Reactor System)
MBR	membránový bioreaktor (Membrane BioReactor)
MF.....	mikrofiltrace (MicroFiltration)
MPO	Ministerstvo průmyslu a obchodu
NaClO.....	chlornan sodný
NaOH	hydroxid sodný
NASA	Národní úřad pro letectví a kosmonautiku (National Aeronautics and Space Administration)
NF.....	nanofiltrace (NanoFiltration)
NL.....	nerozpuštěné látky
ORP	oxidačně-redukční potenciál
OV	odpadní voda
PE	syntetický polymer (PolyEthylene)
PES	syntetický polymer (PolyEtherSulfone)
PP.....	syntetický polymer (PolyPropylene)
PS	syntetický polymer (PolySulfone)
PVDF	syntetický polymer (PolyVinylidene DiFluoride)
R.....	retence
R_{ir}	nevratný odpor daný (částečným) ucpáním membrány
R_m	vlastní odpor membrány
RO	reverzní osmóza (Reverse Osmosis)
R_p	vratný odpor daný koncentrační polarizací
SAMBR	anaerobní membránový bioreaktor s ponorným membránovým modulem (Submerged Anaerobic Membrane BioReactor)
SBR.....	sekvenční fázový reaktor (Sequencing Batch Reactor)
SEM.....	rastrovací elektronový mikroskop (Scanning Electron Microscope)
SMA	specifická metanogenní aktivita (Specific Methanogenic Activity)
SMP.....	rozpuštěné mikrobiální produkty (Soluble Microbial Products)
SRT	látková doba zdržení (Solid Retention Time)
SVS	Státní veterinární správa
SZPI	Státní zemědělská a potravinářská inspekce
TM.....	membránový modul tubulární (Tubular Module)

- TMP..... transmembránový tlak (TransMembrane Pressure)
- UASB typ anaerobního reaktoru na bázi kalového lože granulované biomasy (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)
- UF..... ultrafiltrace (UltraFiltration)
- V_p objem permeátu
- ΔP tlakový gradient
- $\Delta\pi$ osmotický tlak
- μ dynamická viskozita
- τ čas

SUMMARY

Anaerobic technologies are applied for still wider range of industrial wastewater treating. Although the AnMBR technology may be used to treat a wide range of wastewater (as shown by variety of research reports), considering the energy balance, is preferably used mainly for high-strength wastewater with COD value over $2\,000\text{ mg.l}^{-1}$ (industry, agriculture) - ideally, for example, wastewater from the food sector, which is characterised, among other properties, by basically well-degradable organic substances.

Anaerobic membrane bioreactors (AnMBRs) can generally 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, they can promote energy self-sufficiency through biogas production usable in WWTPs / factories. 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 (wastewater from the brewery and associated facilities). The pilot AnMBR plant 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.

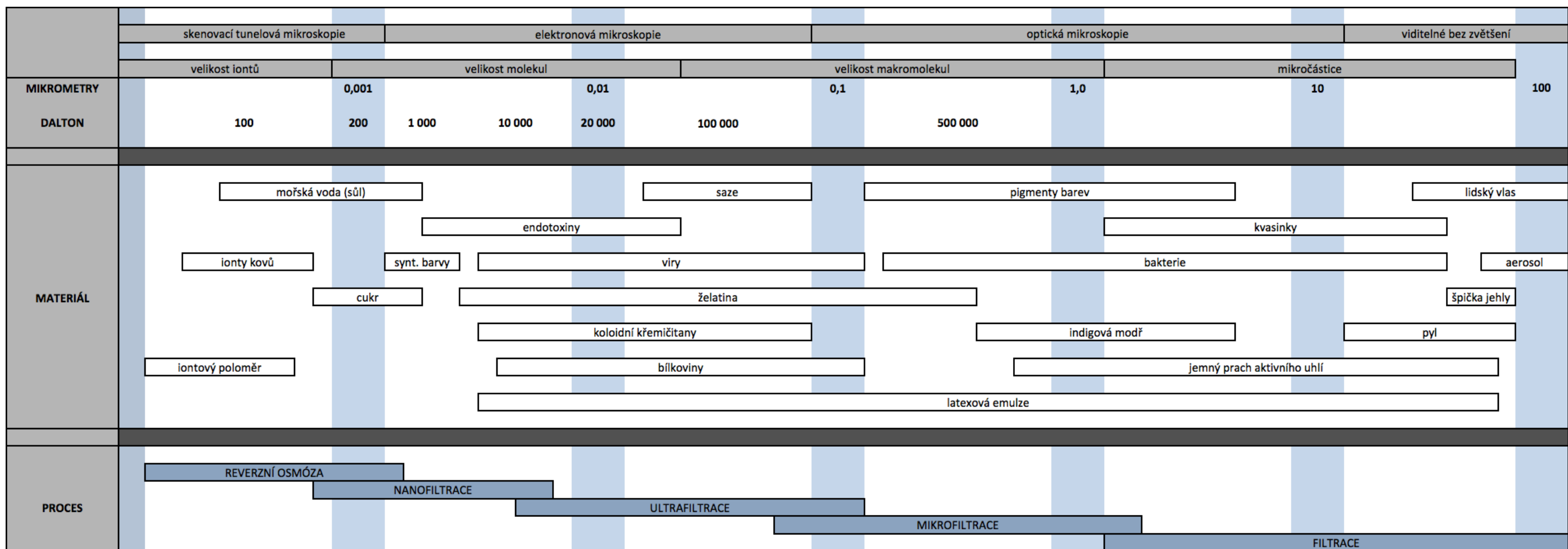
The pilot-plant has proven to be fully operational, suitable (primarily) for industrial wastewater treatment under mesophilic regime and has a high usability potential for either other general research projects and experiments or more specific purposes.

AnMBRs are attractive technologies, which need further research efforts and industrialisation. The evaluation of other factors, such as cleaning efficiency and energy production / consumption etc., may demonstrate whether / under what conditions it is possible to successfully apply AnMBR technology on a wider industrial scale.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Přehled membránové separace ve vztahu k velikosti pórů, respektive zachycených / propuštěných částic.....	I
Příloha 2	Poster / informační leták.....	II
Příloha 3	Technický list membránového modulu pro pilotní AnMBR	III
Příloha 4	Výkres AnMBR – popis.....	IV
Příloha 5	Výkres AnMBR – rozměry a hmotnost	V
Příloha 6	Schématický návrh kontejneru (40'HC) pro umístění pilotního AnMBR.....	VI
Příloha 7	Provozní deník pilotní jednotky AnMBR - příklad.....	VII

Příloha 1 Přehled membránové separace ve vztahu k velikosti pórů, respektive zachycených / propuštěných částic



Příloha 3 Technický list membránového modulu pro pilotní AnMBR



Čištění a úprava vody
Strojírenská výroba a vzduchotechnika
Návrhy, projekce, výroba, dodávky, montáže a servis

EPUF 3,5

Membránový modul pro čištění odpadních vod

Technický list

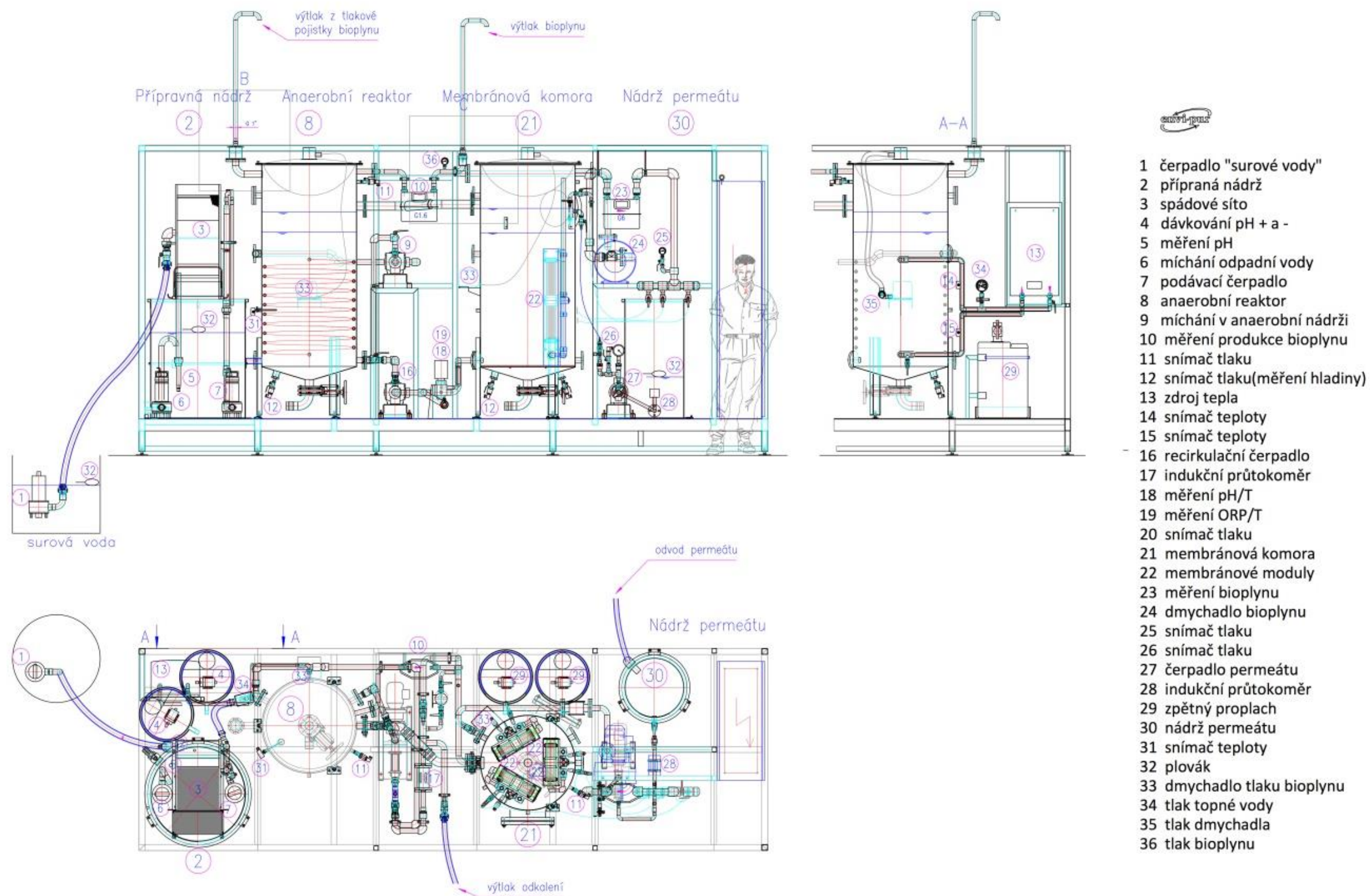
Materiál

Kryt	polyvinyl chlorid, polyethylen
Potrubí	polyvinyl chlorid (PVC)
Připojení	Nátrubek 3/4" (vnitřní závit)
Membrána	polyether sulfon (PES)
Drenáž	polyester
Těsnění	EPDM
Difuzor	PP/EPDM

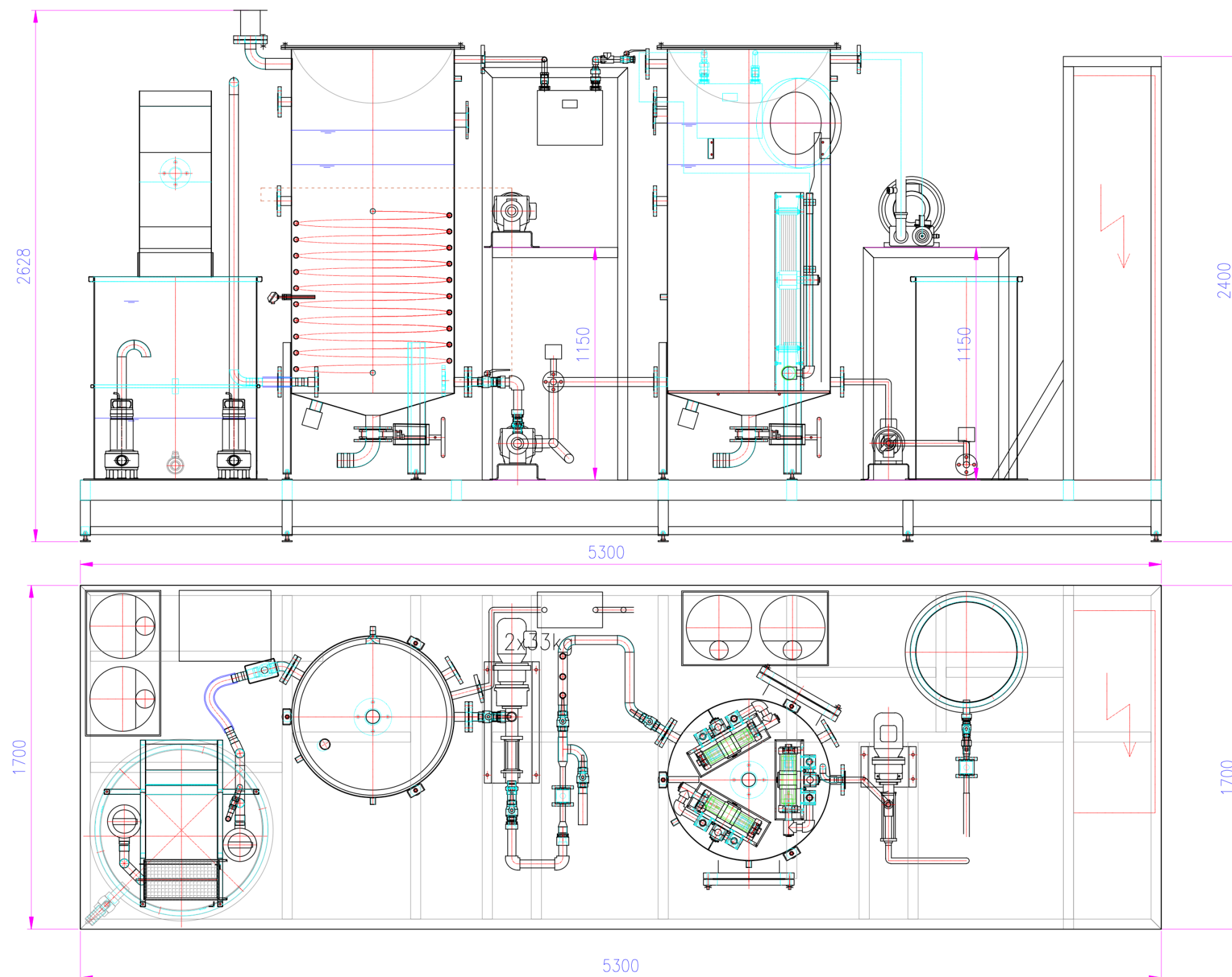
Membrána a provozní data

Plocha membrány	3,5	m ²
Nominální MWCO	150	kDa
Velikost pórů	0,04	μm
Doporučené předčištění	2	mm
Max. průtok vzduchu	2,1	m ³ /h
Max. koncentrace nerozpuštěných látek (NL)	12	g/l
Max. transmembránový tlak během filtrace	400	mbar
Max. transmembránový tlak během praní	150	mbar
Max. provozní/ skladovací teplota	40	°C
Min. provozní/ skladovací teplota	5	°C
pH	2-11	
Odolnost vůči chlóru	500 000	ppmh
Délka (základní rám)	141	mm
Délka (celková)	226	mm
Šířka	478	mm
Výška	980	mm
Připojení aerace	Nátrubek 3/4" (vnitřní závit)	
Připojení permeátu	Nátrubek 3/4" (vnitřní závit)	
Hmotnost suchého modulu	25	kg
Hmotnost mokrého modulu	40	kg
Hmotnost maximální	75	kg

Příloha 4 Výkres AnMBR – popis

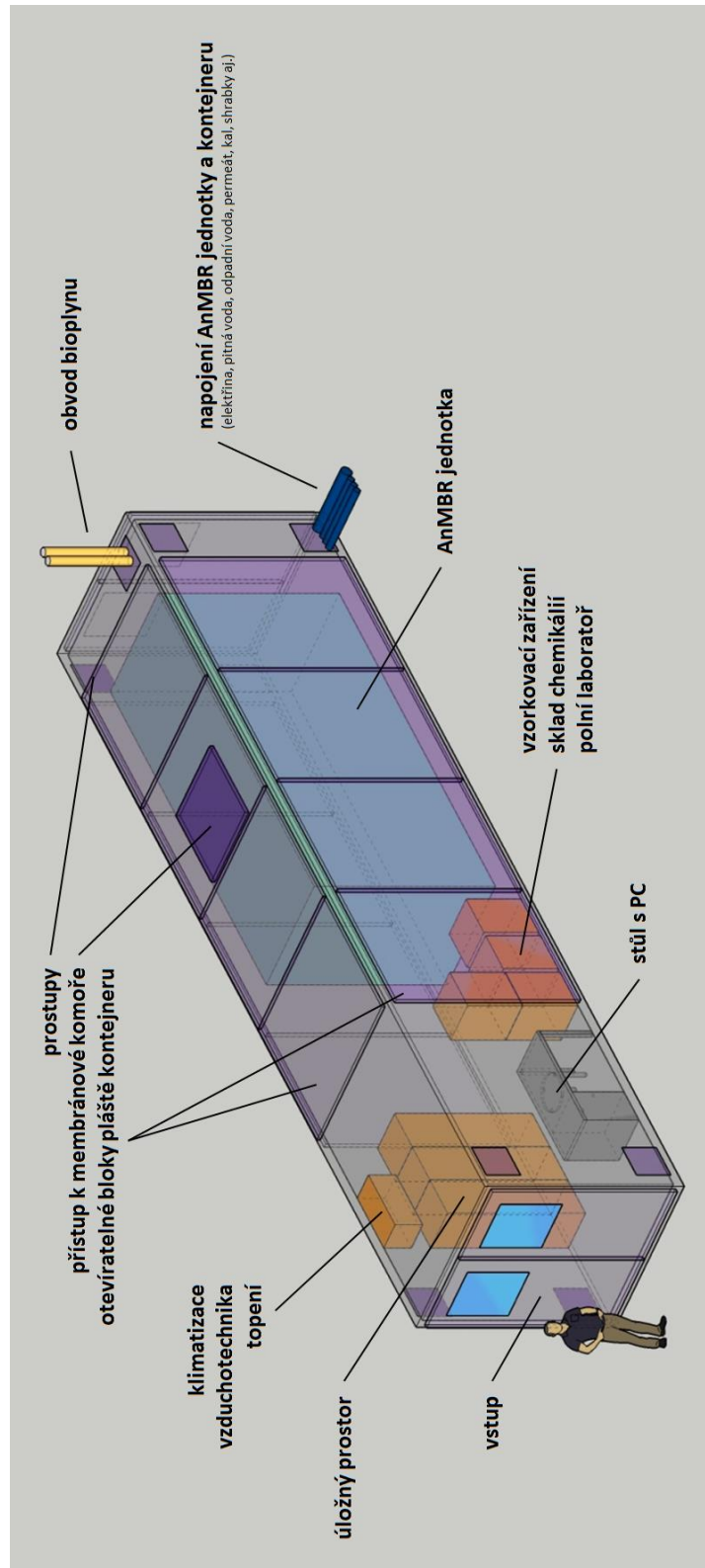


Příloha 5 Výkres AnMBR – rozměry a hmotnost



zařízení+potrubí	900kg
rám	380kg
celkem	<u>1280kg</u>

Příloha 6 Schématický návrh kontejneru (40'HC) pro umístění pilotního AnMBR



Příloha 7 Provozní deník pilotní jednotky AnMBR - příklad

Anaerobní membránový bioreaktor (AnMBR)

PROVOZNÍ DENÍK

Datum a čas 17.3.2016 11:00
Jméno a podpis Daniel Polášek 

OBECNÉ / ROZVADĚČ

1. Rozvaděč pod napětím ano ne →
2. Viditelné úkapy / nečistoty ne ano →
3. Poruchy / chybová hlášení ne ano → 16.3.2016, 11:19 : M1. Rozvaděč. Stavové světlo - porucha napětí
.....
.....
4. Únik bioplynu signalizace I. stupně / low signalizace II. stupně / high
5. Režim automatický manuální / vypnuto →
6. Stav biologické linky filtrace / zpětný proplach / relax CEB →
odstaveno / mimo provoz →
7. Permeabilita 20°C 16.0 LMH/bar (při filtraci)
8. Kontrola hlavních grafů permeabilita obvyklý průběh
odchylka → mírně výš
transmembránový tlak (TMP) obvyklý průběh
odchylka →
průtok permeátu (flux) obvyklý průběh
odchylka →
9. Zásahy do nastavení MaR ne ano →
10. Spotřeba el. energie / elektroměr Σ kWh (6539 kWh)
11. Ostatní / poznámky
.....
.....
.....
.....

MECHANICKÉ PŘEDČIŠTĚNÍ A PŘÍPRAVNÁ NÁDRŽ

12. Čerpadlo surové vody (M1) bez potíží kontrola / čištění → proveden vizuální kontrola a oprava surové vody
porucha →
13. Spádové síto čisté čištění → setření snotkem
14. Koš na shrabky prázdný likvidace shrabků a čištění → odstranění shrabků a oprava surové vody
15. Přepadové potrubí shrabků volné likvidace shrabků a čištění → propláchnutí potrubí surovou vodou
16. Přípravná (egalizační) nádrž stav plnění 2/3... čistota plováků →
míchání (M2) pěnění / zamrzání →
jiné →
teplota 15,4 °C pH 6,8
17. Chemické hospodářství / úprava pH pH + / hydroxid sodný (M12) stav zásobní nádrže 1/4
pH - / kys. citrónová (M11) stav zásobní nádrže 1/2
18. Poznámky

ANAEROBNÍ REAKTOR (AR)

19. Provoz v SBR režimu ne ano →
20. Tepelný zdroj / kotel chod tlak topné vody kPa
21. Teplota nastavená 35 °C uvnitř reaktoru 35,0 °C
22. Výška hladiny a tlak uvnitř AR 1,32 m mbar
23. Podávací čerpadlo (M3) bez potíží porucha →
24. Zpětná klapka / elektroventil (M8) bez potíží porucha →
25. Míchání obsahu AR (M4) bez potíží porucha →
rozdávěč: chod AUT / 0 / RUČ teplota 20,5 °C
26. Recirkulační čerpadlo (M5) bez potíží porucha →
rozdávěč: chod AUT / 0 / RUČ teplota 20,3 °C
27. Indukční průtokoměr 22,6 l/h (okamžitý průtok recirkulace)
28. Měření pH / T / ORP pH 7,71 T 35,0 °C ORP -178,1 mV
29. Přepadové potrubí AR-MK bez potíží porucha →
30. Měření produkce BP / stav plynoměru m³
31. Dmychadlo horního vaku AR (M9) rozváděč: chod AUT / 0 / RUČ porucha ↓
32. Poznámky

MEMBRÁNOVÁ KOMORA (MK) A MEMBRÁNOVÉ MODULY

33. Výška hladiny a tlak uvnitř MK *1,47 m* *2* mbar
34. Vizuální kontrola obsah nádrž propírání bioplynem
membránové moduly potrubí permeátu
vše OK
35. Dmychadlo BP (M7) rozvaděč: chod AUT / 0 / RUČ
nastavení frekvence *35* Hz odpuštění kondenzátu →
36. Tlak dmychadla BP *..... bar* změna škrcení →
37. Nádržka kondenzátu na větvi BP bez potíží zásah → *kontrola odpadní vody*
38. Filtr dmychadla BP bez potíží zásah →
39. Stav plynoměru na větvi BP *..... m³*
40. Čerpadlo permeátu (M6) počet aktivních membránových modulů ks *(všechny)*
změna škrcení →
- rozvaděč: chod AUT / 0 / RUČ teplota *19,4* °C
kontrola chodu → relax I filtrace
zp. proplach relax II
41. CEB CEB kyselý zahájení →
CEB oxidační zahájení →
42. Chemické hospodářství MK kyselina citronová (M13) stav zásobní nádrže *1/2*.....
chlornan sodný (M14) stav zásobní nádrže *1/2*.....
43. Indukční průtokoměr *30* l/h (okamžitý průtok při filtraci)
44. Dmychadlo horního vaku MK (M10) rozvaděč: chod AUT / 0 / RUČ porucha ↓
45. Poznámky

NÁDRŽ PERMEÁTU

46. Výška hladiny permeátu *plus*
47. Vizuální kontrola permeát nádrž / přepad plovák
48. Poznámky *vše OK, čistá*

ODBĚR VZORKŮ

49. Kal AR – odběrné místo 1 2 3 množství / stanovení ↓
MK – odběrné místo 1 2 3 množství / stanovení ↓
IC reaktor – odběrné místo množství / stanovení ↓

50. Přítok egalizační nádrž jímka surové vody množství / stanovení ↓
 51. Odtok nádrž permeátu SBR režim / AR množství / stanovení ↓
 52. Bioplyn množství / stanovení ↓
 53. Poznámky
 49) kal AR 0,12 + MK 0,15C → satura 105% + ztrata 5/60min 150°C
 50) přítok EV 100 → CHSK
 51) odtok VP 1,02 → CHSK

OSTATNÍ POZNÁMKY A ÚKONY

54. Archivace dat (PC) ne ano ↓
 55. Fotodokumentace ne ano ↓
 56. Čištění a regenerace membránových modulů ne ano ↓
 57. Kalibrace ne ano ↓
 58. Opravy ne ano ↓

fotodokumentace: • Odpadko surové vody / jímka surové vody
 • Mechanické předčištění
 • Rozhledy / Mal + celkové pohledy

V případě poruchy / pochybností kontaktujte:

DODAVATEL TECHNOLOGIE

ENVI-PUR, s.r.o.
 Na Vlčovce 13/4
 160 00 Praha 6, ČR
 +420 381 203 211 / info@envi-pur.cz
 Ing. Miroslav Maršík - technolog
~~+420 381 203 211 / +420 381 203 211~~
 marsik@envi-pur.cz

ZODPOVĚDNÝ PROVOZOVATEL

AdMaS - EGAR
 VUT v Brně - Fakulta stavební - ÚVHO
 Purkyňova 139, 612 00 Brno, ČR
 +420 541 148 011
 admas@fce.vutbr.cz
 Ing. Daniel Polášek - doktorand
~~+420 541 148 011~~
 polasek.d@fce.vutbr.cz

OBSLUHA ČOV

Pivovar Černá Hora
 Nám. U Pivovaru 3
 679 21 Černá Hora, ČR
 Jiří Müller - hlavní energetik
~~+420 541 148 011 / +420 541 148 011~~
~~mueller@pivovar.cz~~

POČÁTEČNÍ / DLOUHODOBÉ NASTAVENÍ Č.

DATUM 17. 3. 2016

Parametry regulace pH

Dávkovací čerpadlo kyseliny *citronové!* M11 – ovládací hodnoty pH

Q104 > pH zapnutí 8,3

Q104 < pH vypnutí 8,0

Dávkovací čerpadlo hydroxidu sodného M12 – ovládací hodnoty pH

Q104 > pH zapnutí 6,0

Q104 < pH vypnutí 6,5

Parametry recirkulace

Časové parametry při nízké hladině

doba zapnutí 540 s

doba vypnutí 60 s

Časové parametry při filtrační hladině

doba zapnutí 540 s

doba vypnutí 60 s

Parametry filtrování linky

Časové parametry linky

doba filtrace 240 s

doba proplachu 60 s

doba relax I 60 s

doba relax II 30 s

Časový parametr ustálení anaerobního reaktoru

doba zdržení 10 min

Časový parametr přípravy

doba přípravy 10 s

Provozní hladina anaerobního reaktoru

hladina VYP 1,15 m

hladina ZAP 1,25 m

Parametry regulace průtoku F117

požadovaný průtok 0,0 m³/h

průtok filtrace 31,5 l/h

průtok proplachu 31,5 l/h

NASTAVENÍ AnMBR 1/3

Kalibrace (TMP)

korekce tlaku P116 0,000 mbar

výška tlaku P116 nad P123 1,000 m

koeficient A	filtrace	0,000000	proplach	0,000020
koeficient B	filtrace	0,000000	proplach	-0,000100
koeficient C	filtrace	0,000000	proplach	0,320000
koeficient D	filtrace	0,000000	proplach	-0,015000

aktuální korekce od hladiny -38,5 mbar

aktuální korekce od průtoku 0,0 mbar

Parametry CEB kyselý

Časové parametry linky

doba přípravy 10 min

doba mezifiltrace 0 s

počet cyklů dávky 2

doba výplachu 766 s

doba dávkování 766 s

po 1 cyklu 255 s

doba napouštění 60 min

po 1 cyklu 60 min

Parametry regulace průtoku F117

průtok dávkování 0,074 m³/h

průtok výplachu 0,074 m³/h

průtok zafiltrování 0,000 m³/h

Parametry CEB oxidační

Časové parametry linky

doba přípravy 10 min

doba mezifiltrace 0 s

počet cyklů dávky 2

doba výplachu 766 s

doba dávkování 766 s

po 1 cyklu 255 s

doba napouštění 60 min

po 1 cyklu 60 min

Parametry regulace průtoku F117

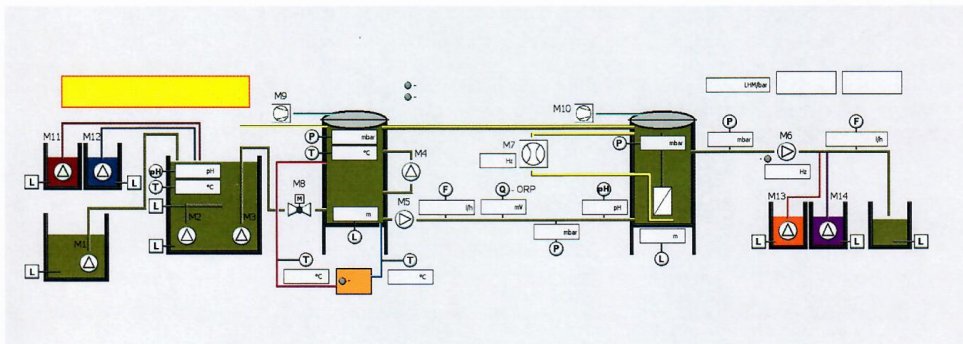
průtok dávkování 0,074 m³/h

průtok výplachu 0,074 m³/h

průtok zafiltrování 0,000 m³/h

Mezní hodnoty měřených veličin

Q104 – pH v přípravné nádrži	MIN 3,0	MAX 10,0
Q104 – teplota v přípravné nádrži	MIN 0,0 °C	MAX 30,0 °C
P106 – tlak bioplynu v anaerobním reaktoru	MIN 0,0 mbar	MAX 500,0 mbar
P107 – hladina v anaerobním reaktoru	MIN 0,30 m	MAX 1,50 m
T108 – teplota vody v anaerobním reaktoru	MIN 30,0 °C	MAX 40,0 °C
F109 – průtok recirkulačním potrubím	MIN 0,0 m ³ /h	MAX 40,0 m ³ /h
Q111 – pH na recirkulačním potrubí	MIN 4,5	MAX 9,0
Q110 – ORP na recirkulačním potrubí	MIN -500,0 mV	MAX 300,0 mV
Permeabilita při 20°C	MIN 40,0 LMH/bar	MAX / LMH/bar
P112 – tlak na recirkulačním potrubí	MIN 0,0 mbar	MAX 500,0 mbar
P114 – tlak bioplynu v membránové komoře	MIN 0,0 mbar	MAX 500,0 mbar
P116 tlak vody v potrubí permeátu TMP	MIN -500,0 mbar	MAX 200,0 mbar
T120 – teplota vody před kotlem	MIN 45,0 °C	MAX 60,0 °C
T121 – teplota vody za kotlem	MIN 45,0 °C	MAX 60,0 °C
F117 – průtok permeátu	MIN -1,0 m ³ /h	MAX 5,0 m ³ /h
P123 – hladina v membránové komoře	MIN 1,10 m	MAX 1,60 m



NASTAVENÍ AnMBR 3/3