

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2024

**VOJTĚCH
POHANKA**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ v PRAZE



Fakulta strojní

Ústav Procesní a Zpracovatelské Techniky

**Technicko-ekonomická analýza zvýšené oxygenace při
čištění odpadních vod**

Diplomová práce

Autor: Vojtěch Pohanka
Vedoucí práce: doc. Ing. Radek Šulc, Ph.D.
Studijní program: Energetika a Procesní Inženýrství
Specializace: Procesní inženýrství

Praha 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pohanka** Jméno: **Vojtech** Osobní číslo: **466415**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**
Studijní program: **Energetika a procesní inženýrství**
Specializace: **Procesní inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Technicko-ekonomická analýza zvýšené oxygenace při čištění odpadních vod

Název diplomové práce anglicky:

Technical-economic analysis of raised oxygenation during wastewater treatment

Pokyny pro vypracování:

Vypracujte literární rešerši se zaměřením na technologie intenzifikace čištění odpadních vod pomocí obohaceného vzduchu nebo čistého kyslíku. Při rešerši se dále zaměřte na různé zdroje kyslíku pro intenzifikaci ČOV.

Na základě poznatků z rešerše:

- Zvolte možné zdroje kyslíku pro oxygenaci.
- Proveďte základní bilanční výpočty linky pro čištění odpadní vody a odhadněte potřebnou spotřebu kyslíku pro definované provozní stavy.
- Pokuste se odhadnout provozní náklady pro navržené technologie.

Seznam doporučené literatury:

Dle pokynů vedoucího práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Radek Šulc, Ph.D. ústav procesní a zpracovatelské techniky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **19.10.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **12.01.2024**

Platnost zadání diplomové práce: **22.09.2024**

doc. Ing. Radek Šulc, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím literárních zdrojů a informací, které cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů dle §60 zákona č. 121/2000 Sb. souvisejícím s autorskými právy a zákona č. 111/1998 o vysokých školách.

Datum:

.....

Podpis

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu doc. Ing. Radku Šulcovi Ph.D. za věcné připomínky a vstupy a neskonalou trpělivost při vypracovávání této práce. Můj velký dík patří mé přítelkyni a mé rodině, za podporu a pomoc při studiích. Dále bych rád poděkoval farmaceutickému průmyslu za vývoj léčiv a potravinářskému průmyslu za dostatek kávy v obchodních řetězcích.

Nakonec bych rád poděkoval odborníkům Ing. Břetislavovi Krňávkovi, Ph.D., Ing. Davidovi Bekovi, Ph.D., Ing. Tomášovi Bolovi, a paní Kateřině Tebichové za poskytnutí cenných zkušeností a rad z praxe.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou získávání kyslíku z různých zdrojů pro provzdušňování odpadních vod a jejich ekonomickou náročností. Práce obsahuje bilance vybraných variant technologií pro intenzifikaci čištění odpadních vod s použitím čistého kyslíku z různých zdrojů. V práci jsou diskutovány limity, výhody a nevýhody spojené s aerací čistým kyslíkem. Dále jsou analyzovány různé dostupné zdroje a jednotlivé procesy spojené s výrobou čistého kyslíku. Pro bilance jsou v rešeršní části vysvětleny a experimentálně podložena fakta podporující implementaci aeraci čistým kyslíkem v návaznosti na stávající stavy čističek odpadních vod, které v důsledku zvyšujících se parametrů CHSK a BSK₅ nedostatečně zpracovávají odpadní vody.

Klíčová slova

Kyslík, Adsorpce, Elektrolýza, Separace vzduchu, Aerace, Oxygenace, ČOV.

Abstract

This master thesis focuses on characteristics of pure oxygen wastewater aeration. Also this work highlights potential sources of oxygen for aeration. Practical part of the work is dedicated to calculation of the OPEX with respect to 4 technological scenarios where oxygen is being applied. This work highlights limits, advantages and disadvantages which characterize each technological approach. Key role in applied oxygen technologies is the source of the gas.

Key Words

Oxygen, Adsorption, Electrolysis, Air Separation, Aeration, Oxygenation, Waste Water Plant, OPEX.

Anotační list

| | |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Jméno autora: | Vojtěch |
| Příjmení autora: | Pohanka |
| Název práce česky: | Technicko-ekonomická analýza zvýšené oxygenace při čištění odpadních vod |
| Název práce anglicky: | Technical-economic analysis of raised oxygenation during wastewater treatment |
| Rozsah práce: | počet stran: 77 počet obrázků: 40 počet tabulek: 33 počet příloh: 9 |
| Akademický rok: | 2023/2024 |
| Jazyk práce: | český jazyk |
| Ústav: | Ústav procesní a zpracovatelské techniky |
| Studijní program: | Energetika a procesní inženýrství |
| Vedoucí práce: | doc. Ing. Radek Šulc, Ph.D. |
| Konzultant práce: | |
| Zadavatel: | Ústav procesní a zpracovatelské techniky FS |

Anotace česky: Tato diplomová práce se zabývá problematikou získávání kyslíku z různých zdrojů pro provzdušňování odpadních vod a jejich ekonomickou náročností. Práce obsahuje bilance vybraných variant technologií pro intenzifikaci čištění odpadních vod s použitím čistého kyslíku z různých zdrojů. V práci jsou diskutovány limity, výhody a nevýhody spojené s aerací čistým kyslíkem. Dále jsou analyzovány různé dostupné zdroje a jednotlivé procesy spojené s výrobou čistého kyslíku. Pro bilance jsou v rešeršní části vysvětleny a experimentálně podložena fakta podporující implementaci aeraci čistým kyslíkem v návaznosti na stávající stavy čističek odpadních vod, které v důsledku zvyšujících se parametrů CHSK a BSK₅ nedostatečně zpracovávají odpadní vody.

Anotace anglicky: This master thesis focuses on characteristics of pure oxygen wastewater aeration. Also this work highlights potential sources of oxygen for aeration. Practical part of the work is dedicated to calculation of the OPEX with respect to 4 technological scenarios where oxygen is being applied. This work highlights limits, advantages and disadvantages which characterize each technological approach. Key role in applied oxygen technologies is the source of the gas.

Obsah

| | | |
|-------|---------------------------------------------------------|----|
| 1. | Úvod..... | 1 |
| 2. | Aktivace se vzduchem..... | 3 |
| 3 | Aerační systémy se vzduchem | 6 |
| 3.1 | Pneumatická aerace | 6 |
| 3.1.1 | Aerační elementy..... | 6 |
| 3.1.2 | Volba kompresorů a dmychadel..... | 9 |
| 3.2 | Mechanická aerace | 9 |
| 3.3 | Hydropneumatická aerace | 10 |
| 4 | Aktivace kyslíkem..... | 11 |
| 4.1 | Historický vývoj HPO (High Purity Oxygen) systémů | 11 |
| 4.2 | Vývoj HPO systému v otevřených tancích..... | 13 |
| 4.3 | Ejektory | 14 |
| 5 | Aerační systémy s kyslíkem..... | 15 |
| 5.1 | Solvox systém..... | 15 |
| 5.2 | Solvox Cone systém | 16 |
| 5.3 | Solvox Dropin systém | 17 |
| 6 | Aerace kyslíkem vs. vzduchem..... | 17 |
| 7 | Definice základních pojmů..... | 18 |
| 7.1 | Standardní rychlost přestupu kyslíku (SOTR)..... | 18 |
| 7.2 | Specifická oxygenační kapacita (OC) | 18 |
| 7.3 | Standardní aerační účinnost (SAE)..... | 20 |
| 7.4 | SAE kyslík vs. vzduch..... | 20 |
| 7.5 | Standardní účinnost přestupu kyslíku (SOTE) | 21 |
| 7.5.1 | OTE vzduch vs. kyslík | 22 |
| 8 | Přenos hmoty na mezifázovém rozhraní | 23 |
| 8.1 | Henryho zákon..... | 23 |
| 8.2 | Přenos hmoty z bubliny plynu do buňky | 24 |
| 8.2.1 | Popis přenosu na rozhraní kapalina - plyn | 25 |
| 8.3 | Bublina vzduchu vs. bublina kyslíku..... | 27 |
| 8.4 | Součinitel přestupu hmoty | 28 |
| 8.5 | Vliv odpadní vody | 32 |
| 8.6 | Vliv hloubky instalovaných difuzorů | 33 |
| 8.7 | Vliv nadmořské výšky | 33 |
| 8.8 | Kinetika růstu organismů..... | 34 |

| | | |
|--------|-------------------------------------------------------|----|
| 9 | Zdroje kyslíku pro aeraci..... | 35 |
| 9.1 | Kryogenická separace vzduchu | 35 |
| 9.1.1 | Energetická spotřeba vztažená na kapalný kyslík | 36 |
| 9.1.2 | Dodávka kapalného kyslíku | 37 |
| 9.1.3 | Odpařovače..... | 38 |
| 9.1 | Adsorpční separace vzduchu | 39 |
| 9.1 | Elektrolýza vody..... | 41 |
| 9.2 | Membránové procesy | 43 |
| 10 | Koncepce a návrh řešení | 43 |
| 11 | Spotřeba kyslíku v klasické aktivaci | 44 |
| 11.1 | Návrh dosazovací nádrže..... | 49 |
| 11.2 | Souhrn vypočtených parametrů | 51 |
| 11.3 | Spotřeba vzduchu vs. kyslíku | 51 |
| 11.4 | Volba aeračních elementů | 53 |
| 11.4.1 | Elementy pro vzduch..... | 53 |
| 11.4.2 | Elementy pro kyslík | 54 |
| 12 | Varianta –aerace pomocí vzduchu | 56 |
| 12.1 | Návrh a filtrace vzduchu..... | 56 |
| 12.2 | Návrh dmychadel..... | 57 |
| 12.3 | Návrh míchadel..... | 58 |
| 12.4 | Návrh čerpadel vratného kalu..... | 59 |
| 12.5 | Aerace vzduchem - shrnutí | 61 |
| 13 | Varianta – aerace kyslíkem z PSA jednotky | 61 |
| 13.1 | Návrh kompresorů | 62 |
| 13.2 | Návrh kondenzační sušičky | 64 |
| 13.3 | Návrh filtrace vzduchu pro PSA jednotku..... | 68 |
| 13.4 | Aerace kyslíkem z PSA jednotky - shrnutí..... | 68 |
| 14 | Varianta – aerace zaváženým kapalným kyslíkem | 69 |
| 14.1 | Aerace se zaváženým kyslíkem - shrnutí | 70 |
| 15 | Varianta - aerace kyslíkem z elektrolyzéru | 71 |
| 15.1 | Aerace kyslíkem z elektrolýzy – shrnutí | 72 |
| 16 | Souhrn výsledků a posouzení variant..... | 73 |
| 17 | Provozní náklady..... | 76 |
| 18 | Závěr..... | 78 |
| 19 | Literatura | 80 |

Seznam zkratek

| | |
|----------------------|--------------------------------------------------------|
| AFC ... | Alkaline Fuel Cell |
| ASU ... | Air Separation Unit |
| BSK (angl. BOD) ... | Biologická spotřeba kyslíku (Biological Oxygen Demand) |
| CHSK (angl. COD) ... | Chemické spotřeba kyslíku (Chemical Oxygen Demand) |
| CSTR ... | Continuous Stirred Tank Reactor |
| ČOV ... | Čistírna Odpadních Vod |
| DMFC ... | Direct Methanol Fuel Cell |
| EIGA... | European Industrial Gases Association |
| FAD ... | Free Air Delivery |
| HPO ... | High Purity Oxygen |
| HDPE ... | High Density Poly Ethylen |
| ISO ... | In Situ Oxygenator |
| MCFC ... | Molten Carbonate Fuel Cell |
| NPSH... | Net Suction Positive Head |
| NIST... | National Institute of Standards and Technology |
| RTD (angl. HRT) ... | pro čistírny odpadních vod (Hydraulic Retention Time) |
| PAFC ... | Phosphoric Acid Fuel Cell |
| PEMFC ... | Proton Exchange Membrane Fuel Cell |
| PEM ... | Proton Exchange Membrane |
| PFR ... | Plug Flow Reactor |
| PSA ... | Pressure Swing Adsorption |
| VPSA ... | Vacuum Pressure Swing Adsorption |
| SAN... | Styren Akrylo - Nitril |
| SOTE ... | Standart Oxygen Transfer Efficiency |
| SOFC ... | Solid Oxide Fuel Cell |
| TSA ... | Temperature Swing Adsorption |
| CAPEX... | Capital Expenditures |
| OPEX ... | Operational Expenditures |

| | |
|---------|----------------------------|
| OTR ... | Oxygen Transfer Rate |
| OTE... | Oxygen Transfer Efficiency |

Seznam indexů

| | |
|---------------|---------------------------------|
| an... | aktivační nádrž |
| b... | bublina |
| č... | čerpadlo |
| c... | celkové |
| dn... | dosazovací nádrž |
| dm... | dmychadla |
| e... | aerační elementy |
| f... | filtr |
| g... | gas (plyn) |
| h... | hodinový |
| i ... | složka i |
| ie... | izoentropická |
| in... | indikátor směru toku do systému |
| k... | kompresor |
| l ... | liquid (kapalina) |
| m... | míchadlo |
| kor... | zkorigovaná hodnota |
| vzd ... | vzduch |
| ov ... | odpadní voda |
| p... | provozní, nebo pracovní |
| ps... | primární stupeň |
| prům... | průměrná |
| tsr... | teplota rosného bodu |
| sat... | saturační |
| stp (ev.S)... | standartní |
| sub... | substrát |

| | |
|--------|---------------------------------|
| out... | indikátor směru toku ze systému |
| N... | normálové podmínky |
| min... | minimální |
| max... | maximální |

Seznam veličin

| | | |
|-----------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------|
| a | [m ² .m ⁻³] | specifický povrch |
| c _i ^v | [% obj.] | objemová koncentrace |
| c _i ⁿ | [%] | molová koncentrace i-té složky |
| c _{p,i} | [kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹] | měrná tepelná kapacita složky i |
| d _i | [m] | průměr i-tého objektu |
| \mathcal{D}_{ab} | [m ² .s ⁻¹] | součinitel difúze |
| e | [=2,718...] | Eulerovo číslo |
| e(Y) | [kPa] | energie dodávána čerpadlem |
| e _z | [J.kg ⁻¹] | ztráty v potrubí |
| f | [1/měsíc] | frekvence dovozu LOX za měsíc |
| f _i | [-] | korekční faktor pro zařízení i |
| h | [m] | rozměr hloubky obecně |
| h _i | [J.kg ⁻¹] | měrná entalpie i-té složky |
| H _c ... | [m] | dopravní výška čerpadla |
| H _i | [mol.m ⁻³ .Pa ⁻¹] | Henryho konstanta i_té složky |
| k _L | [m.hod ⁻¹] | součinitel prostupu hmoty |
| l _i | [m] | délka |
| l _{v,i} | [kJ.kg ⁻¹] | latentní teplo složky i |
| k* | [mm] | střední absolutní drsnost potrubí |
| k _x | [kmol.s ⁻¹ m ⁻²] | součinitel prostupu hmoty |
| K _S | [g.m ⁻³] | Monodova konstanta |
| M _i | [kg.kmol ⁻¹] | molární hmotnost i- té složky |
| m | [kg] | hmotnost |
| \dot{m}_i | [kg.s ⁻¹] | hmotnostní tok i-té složky |

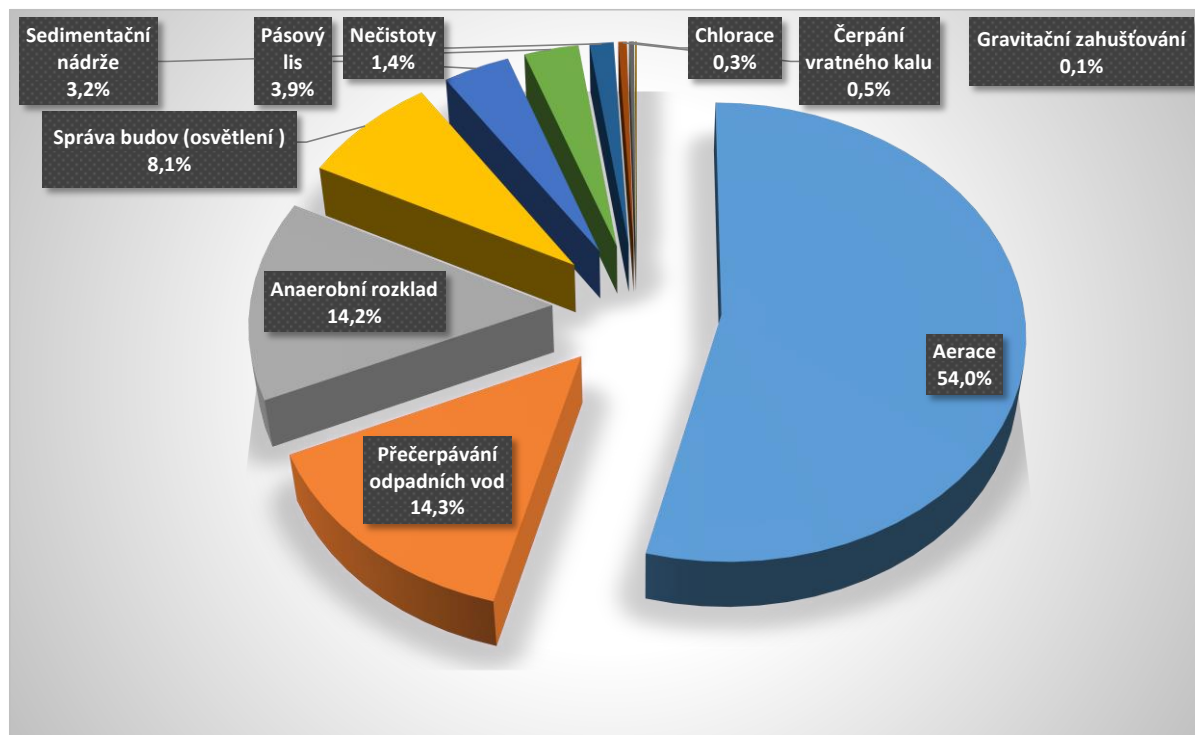
| | | |
|-------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| n_i | [mol.s ⁻¹] | molární tok i-té složky |
| N_A | [mol.s ⁻¹ .m ⁻²] | hustota molového toku |
| N_c | [Kč] | celkové náklady |
| N_{el} | [Kč.kWh ⁻¹] | cena silové elektřiny (= 3,58 Kč.kWh ⁻¹ data platná pro Říjen 2023) |
| s | [mm] | tloušťka stěny potrubí |
| S | [m ²] | povrch |
| OC | [kg.m ⁻³ .hod ⁻¹] | oxygenační kapacita |
| OTE | [%] | Oxygen transfer efficiency |
| OTR | [kgO ₂ .hod ⁻¹] | Oxygen transfer rate |
| Δp | [Pa] | Tlaková ztráta |
| p_i | [kPa, MPa, Pa] | tlak i-té složky |
| p_i^* | [kPa] | tenze par i-té složky |
| Q_i | [kW] | výkon i-tého zařízení |
| P_i | [kW] | příkon i-tého zařízení |
| R | [=8,314 kJ.kmol ⁻¹ .K ⁻¹] | univerzální plynová konstanta |
| R_p | [%] | recirkulační poměr |
| $SOTE$ | [%] | standard oxygen transfer efficiency |
| $SOTR$ | [kgO ₂ .hod ⁻¹] | standard oxygen transfer rate |
| SAE | [kgO ₂ .kWh ⁻¹] | standard aeration efficiency |
| T | [°C, K] | teplota |
| u_i | [m.s ⁻¹] | rychlost i-té složky |
| y_i | [%] | koncentrace i-té složky v plynné fázi |
| V | [m ³] | objem |
| \dot{V}_i | [m ³ .s ⁻¹] | objemový průtok i-té složky |
| X | [kg.m ⁻³] | koncentrace sušiny v kalu |
| x_i | [%] | koncentrace i-té složky v kapalně fázi |
| x_{H_2O} | [kg _{H2O} .kg _{SVZD} ⁻¹] | specifická vlhkost |
| Z_i | [kg.m ⁻³] | množství nerozpuštěných látek i-té složky |

Řecká písmena

| | | |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| α | [-] | korekce na chování kyslíku v odpadních vodách a čisté vodě pro objemový součinitel přestupu hmoty |
| β | [-] | korekce na vliv chování kyslíku v závislosti na koncentraci v odpadní vodě a čisté vodě |
| δ | [-] | korekce na hloubku ponoru difuzéru |
| φ | [%] | relativní vlhkost vzduchu |
| Φ | [den ⁻¹] | stáří kalu |
| Θ | [-] | funkce vlivu teploty na spotřebu kyslíku |
| λ | [-] | ztrátový součinitel pro určení tlakových ztrát v potrubí |
| μ | [Pa.s] | dynamická viskozita |
| μ_{\max} | [hod ⁻¹] | maximální rychlost růstu pozorovaných mikroorganismů |
| η | [%] | účinnost |
| ν | [m ² .s ⁻¹] | kinematická viskozita |
| Ω | [-] | korekce na vliv nadmořské výšky dané ČOV |
| π | [=3,14...] | Ludolfovo číslo |
| ρ_i | [kg.m ⁻³] | hustota i-té složky |
| χ | [%] | procentuální využití kyslíku ze vzduchu |
| κ | [-] | Poissonova konstanta (pro dvouatomový plyn 1,4) |
| τ | [hod] | doba zdržení |
| ζ | [kWh. Nm ⁻³ , kWh. Nm ⁻³ O ₂ , kWh. Nm ⁻³ vzd, kWh. kg ⁻¹ O ₂] | měrná spotřeba energie vztáhná na průtok OV, kyslíku, vzduchu, a kg kyslíku |
| ψ | [kWh] | specifická spotřeba energie |

1. Úvod

Data spotřeby energií ukazují, že v rámci Evropské Unie je více jak 1% veškeré vyrobené elektřiny potřeba na čištění odpadních vod [1].¹ Dnes již skoro nenajdete instituci, která by nebyla zdrojem odpadní vody. Dále je třeba poukázat na fakt, kdy 97 % procent povrchové vody je voda slaná z oceánů, kdežto pro člověka pitná a užitková voda, kterou denně využíváme, jsou pouhá 3% veškeré vody na Zemi.



Graf 1 Grafické rozdělení energetické náročnosti dle procesů průměrné ČOV (převzato z [5])

Důležité je, že voda jako prakticky vše na planetě v důsledku lidské činnosti i přírodních jevů znečišťována. Proto je nutné zdroje či už pitné vody nebo užitkové vody patřičně zpracovávat a upravovat, tak aby vyhovovala standardům, normám a nekontaminovala další vodní rezervoáry. V praxi se staly čistírky odpadních vod nástrojem pro důkladné čištění odpadních vod. Čištění vod se skládá z více kroků, které jsou popsány v dalších kapitolách. Hlavní část, kde dochází k odbourání většiny znečištění v odpadních vodách, je aktivační proces, při kterém:

- jsou organické látky rozkládány mikroorganismy jako součást jejich potravy,
- je odstraňován dusík a fosfor,
- vzniká usaditelný kal, který se snáze odděluje od vody.

Mikroorganismy v aktivačním tanku rozkladem organických látek snižují chemické a biologické zatížení (CHSK a BSK) na dovolené hodnoty znečištění, ale potřebují ke svému životu udržovat jistou hladinu rozpuštěného kyslíku. Z **Graf 1**, můžeme vidět, že průměrná ČOV spotřebuje více jak 50 % energie samotnou aerací, další položkou je potom energie potřebná na přečerpávání odpadních vod mezi jednotlivými úseky (15 %), poté následuje anaerobní rozklad (15 %), zbylá procenta (≈ 15 %) připadají na správu budov (např.: osvětlení),

¹ Pro Spojené státy americké jsou tyto nároky dokonce 4x větší.

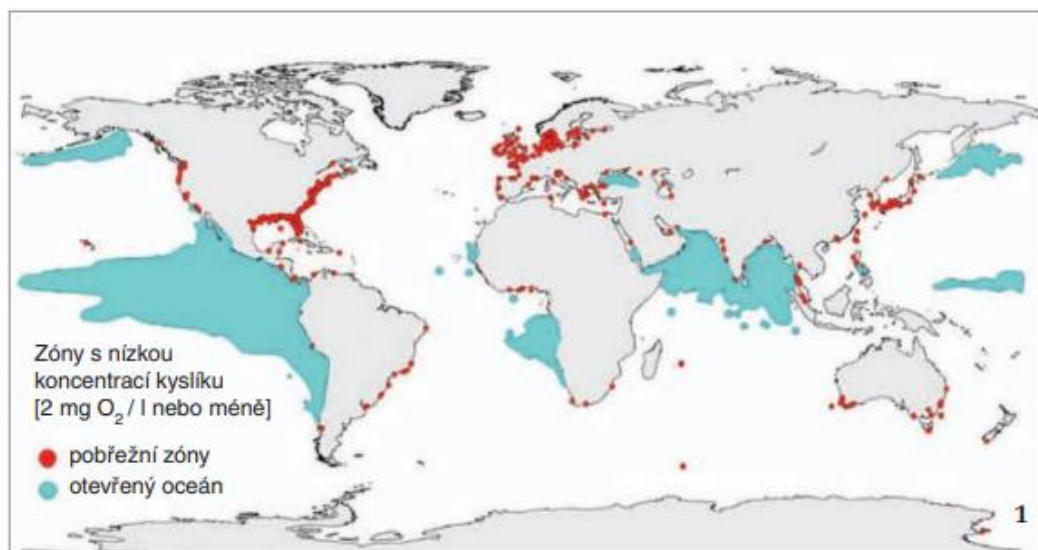
chloraci, čerpání vratného kalu, pásový lis apod [5]. Během roku 2022 bylo na celém světě vyprodukováno téměř 30 000 TWh elektřiny. [23] Více jak 300 TWh bylo použito na aeraci v ČOV. V rámci USA je například celá 4 % veškeré elektrické energie spotřebováno na likvidaci odpadních vod. [1] Z hlediska energetické náročnosti zařízení při procesu aktivace v běžných čističkách odpadních vod se spotřebovává od 0,18 – 2,1 kWh.m⁻³ odpadní vody. [1]

Optimalizací této části lze tak snížit významně náklady na čištění odpadních vod. Důležitým aspektem a motivací pro účinnou intenzifikaci aktivace ČOV procesu jsou také další významné dopady na životní prostředí:

- Úhyn fauny a flory v oblasti vypouštěné nečištěné nebo nedostatečně čištěné odpadní vody.
- Růst dusíkatých složek (NO₂, NO₃, NH₃) v povrchových vodách a jejich eutrofizace.
- Podpora růstu aquakultur (např.: oceánské pobřežní oblasti).

Po letech, kdy docházelo k renovaci čistíren odpadních vod, nejčastěji rozšiřováním spojované s vysokými kapitálovými investicemi, se očekává, že další kroky povedou spíše k intenzifikaci, tj. optimalizaci stávajících kapacit s důrazem na efektivnější technologie, a to v důsledku potřeby zvýšit kapacitu čistíren odpadních vod a splnit přísnější normy pro vypouštění odpadních vod. Při této změně bude prioritou výběr technologií, které minimalizují spotřebu energie. Budou se také hledat způsoby, jak co nejvíce využít energii získanou z odpadních vod.

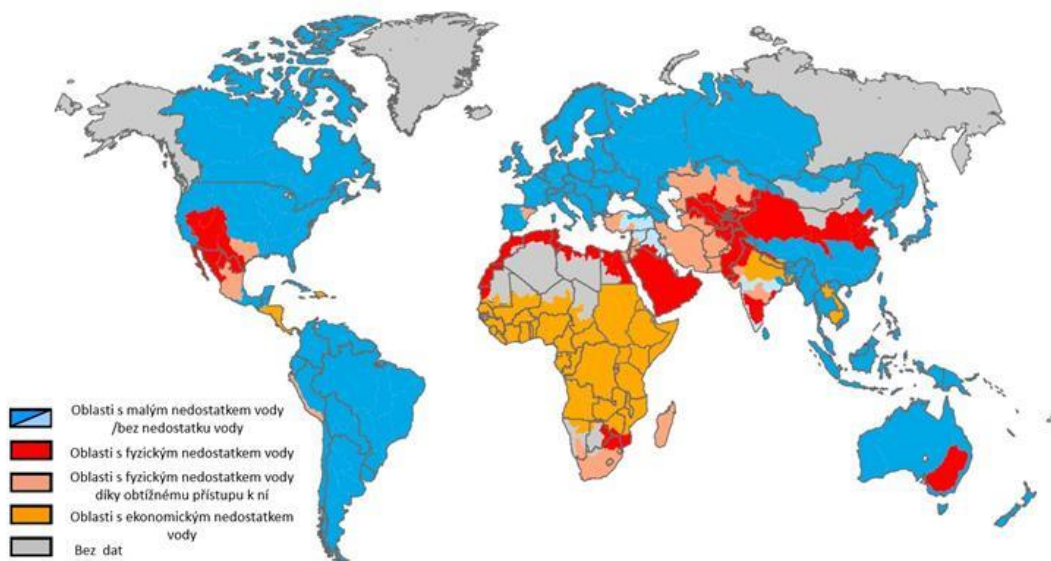
Voda je nezbytnou součástí života nejen lidí, ale také ryb a jiných vodních organismů, které vodu potřebují ke svému životu. I proto je důležité zlepšovat kvalitu vodních toků a stojatých vod na Zemi. Především v letních obdobích jsou vodní rezervoáry a toky vystaveny vyšším teplotám, kde v důsledku zvýšené činnosti organismů se spotřebovává rozpuštěný kyslík ve vodě. Proto je v těchto obdobích nutné monitorovat hladinu rozpuštěného kyslíku, který je potřeba pro život ryb a živých organismů v nich obsažených. Z **Obrázku 1** je patrné, že oblasti se sníženou koncentrací kyslíku tvoří rozsáhlou část, především oceánských kultur.



Obrázek 1 Mapa oblastí s koncentrací kyslíku nižší než 2 mg/l (převzato z [3])



Obrázek 2 Úhyn ryb v důsledku snížené koncentrace kyslíku ve vodě (převzato z [3])

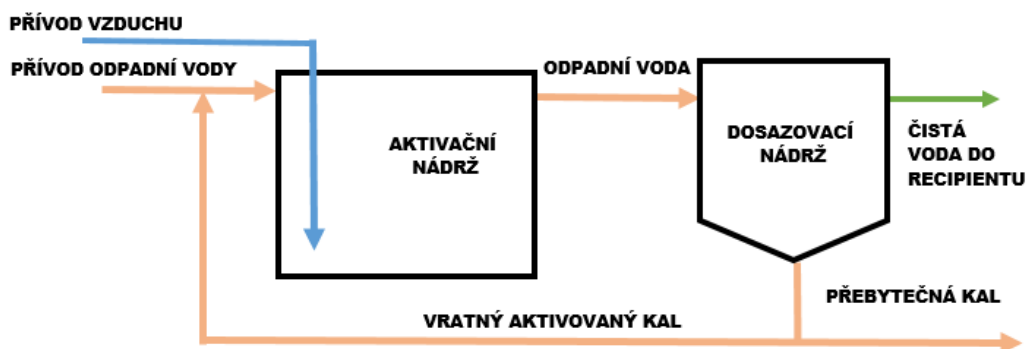


Obrázek 3 Mapa indikující oblasti s dostatkem či naopak nedostatek vody (převzato z [3])

2. Aktivace se vzduchem

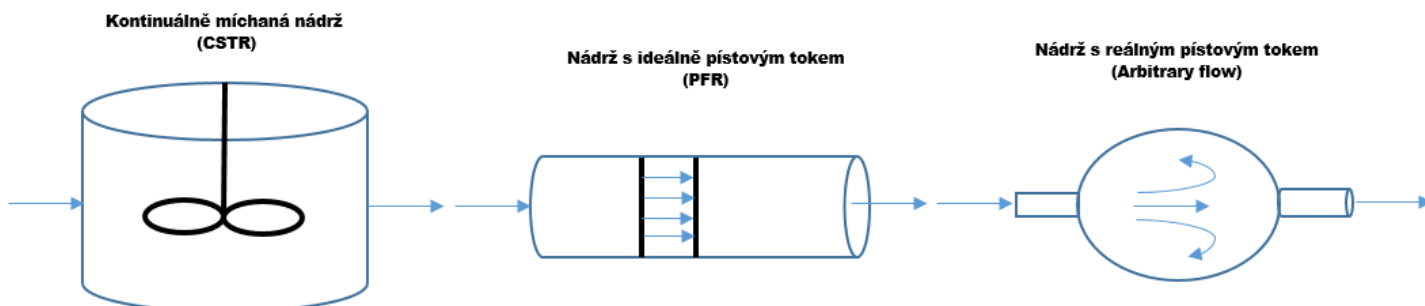
Prvním impulsem pro vznik procesu aktivace odpadní vody byla špatná situace odpadních vod v Anglii na přelomu 19. a 20. století. V letech 1913–1914 bylo čištění odpadní vody obohaceno o biologický aerobní stupeň. Britští chemici Edward Arden a William Lockett poprvé experimentálně dokázali kultivovat polykulturu dlouhodobým provzdušňováním a pozorovali kratší dobu potřebnou na celkové čištění. [5]. Principem je tvorba aktivovaného kalu, který vytváří vhodně sedimentující vločky. Pojmem aktivovaný kal se označuje směs polykultur různých mikroorganismů (bakterie, houby, plísně, kvasinky, viry atd.).

Princip aktivace můžeme zjednodušit na základní schéma viz. **Obrázek 4**. Srdcem procesu je aktivační nádrž, do které vstupují odpadní voda, vzduch, a již aktivovaný aktivační kal. Aktivovaná směs po uplynutí doby zdržení vstupuje do dosazovací nádrže, kde se sedimentující vločky aktivačního kalu oddělují od vyčištěné odpadní vody. Část kalu je odváděna na další zpracování jako přebytečný kal do kalového hospodářství a část je odváděna zpět do aktivační nádrže. Při cestě zpět do aktivační nádrže se vratný kal aktivuje – regeneruje v samostatné nádrži. Regenerace přebytečného kalu v širším pojetí působí jako “vyhladovění“ polykultury. Následně je potom „vyhladovělý“ kal přidán do odpadní vody a proces je tak efektivnější, resp. růst buněčného materiálu je rychlejší.



Obrázek 4 Zjednodušené blokové schéma aktivace

Aktivace se jako proces v průběhu posledních více než 100 let vyvíjel. Proto existuje více způsobů, jak aktivaci v rámci ČOV instalovat. **Tabulka 1** shrnuje principy a druhy aktivace, se kterými je možné se v praxi setkat. V návaznosti na druhy aktivace je důležité si uvědomit, že centrem je vždy aktivační nádrž. Druhů aktivačních nádrží máme několik: kontinuálně míchané otevřené nádrže (CSTR), nádrž s ideálně pístovým tokem (PFR), a nádrž s reálným pístovým tokem (Arbitrary Flow) viz. **Obrázek 5**. V praxi jsou aktivační nádrže s reálným pístovým tokem, kde se předpokládá že je koncentrace rozpuštěných látek podél nádrže ale i jednotlivých řezech tanku proměnlivá. Návrh takových to zařízení se pro zjednodušení volí na kontinuálně míchaných reaktorech, kde je koncentrace nerozpuštěných látek v daném okamžiku v celém objemu tanku stejná. Reálná koncentrace bude proměnlivá v závislosti na intenzitě míchání, geometrie tanku, umístění zdroje kyslíku, hloubce, a teplotě směsi.



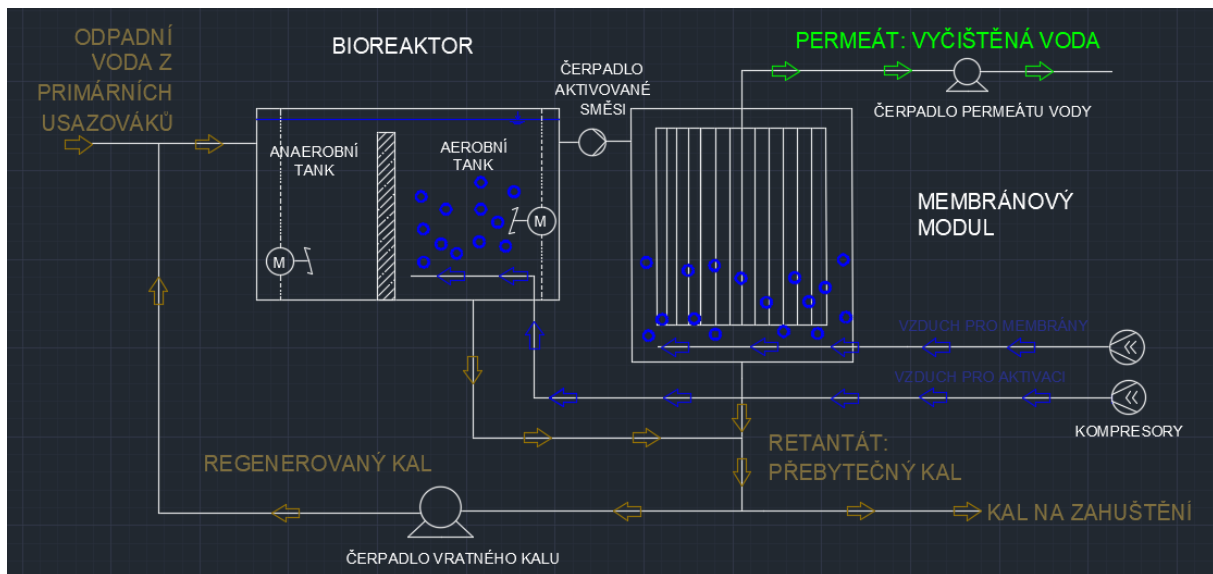
Obrázek 5 Modely toku nádrží

Tabulka 1 Druhy aktivace a jejich princip

| Druh aktivace | Princip |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Klasická aktivace | Rovnoměrný přívod vzduchu do celého objemu aktivační nádrže s částečnou recirkulací (míšení odpadní vody s již aktivovaným kalem) |
| Aktivace s regenerací vratného kalu | Podobná klasické aktivace s rozdílem, kdy recyklovaný kal je v regenerační nádrži provzdušňován (podpora nitrifikačních mikroorganismů) |
| Postupně zatěžovaná aktivace | Vzduch je dodáván do aerační nádrže nerovnoměrně (zpravidla se začíná s dávkováním většího množství vzduchu na počátku, a menším na konci) |
| Oxidační příkop | Zde je důležité si uvědomit, že mnohem větší část kalu recirkuluje, než přitéká, což vyžaduje velké zástavbové plochy. Dlouhé doby zdržení v aktivační nádrži (>24 hodin) |
| Karuselová oxidace | Podobné oxidačním příkopům. Má však menší zástavbové nároky díky konfiguraci aerátorů (mechanické aerátory) |
| Šachtová oxidace ² | 50-150 m hluboké aerační nádrže, do kterých je vzduch přiváděn dolů s odpadní vodou. Díky většímu tlaku ve velkých hloubkách nádrží se kyslík rozpouští intenzivněji (přetlaková flotace) |

V souvislosti s aktivací je třeba zmínit použití tzv. MBR reaktorů, náhrady za funkci dosazovacích nádrží. MBR neboli membránové reaktory slouží k čištění odpadních vod pomocí aplikace mikro – nebo ultrafiltrace (MF a UF). Průmyslové řešení jsou moduly opatřené porézními hadicemi, které jsou propustné pro molekuly vyčištěné vody. Schématické zapojení technologie viz. **Obrázek 6**. Pevné zachycené částice, které tvoří kal, se odvádí do kalového hospodářství. Je možné se setkat s aktivací, kde jsou nádrže rozděleny na anoxické bez přístupu vzduchu, aerobní, tj. provzdušňované a s membránovou filtrací rovněž provzdušňované. Výhodou MBR technologie je malá prostorová náročnost a vysoká selektivita zachycení nerozpuštěných látek v odpadní vodě. [16] Nevýhodou je však údržba technologie, která je náchylná na zanášení. Proto je také MBR část navíc provzdušňována, aby bubliny vzduchu narušovaly aktivní povrch membrán a odnášely sebou částice bránící filtraci. Z tohoto důvodu je navíc potřeba kompresor nebo dmyhadlo a tím se stává proces energeticky náročnějším úměrně s kvalitou vody na výstupu z membrán. Pro představu u čistírny pro 1850 EO byla původně konvenční aktivace rozšířena o stupeň membránové filtrace a zdroj [16] uvádí, že spotřeba energie oproti původnímu stavu stoupla o 140 kWh denně. V nepřetržitém provozu při dnešních cenách elektřiny (říjen 2023 1 kWh = 3,58 Kč) se jedná o navýšení ročních nákladů o více jak 180 000 Kč. Na druhou stranu se snížily nároky na zastavěnou plochu až o 50 % a ČOV je schopna zpracovávat až 4násobek množství aktivovaného kalu. [16] Aplikace MBR reaktorů se osvědčila pro likvidaci odpadních vod velkých výletních lodí, kde je limitně málo místa.

² Atraktivní především pro již vytěžené důlní, ventilační šachty těžební jámy.



Obrázek 6 Schéma aktivací s ponořeným membránovým modulem (upraveno podle [16])

3 Aerační systémy se vzduchem

Aerační systém plní několik funkcí. V první řadě dodává polykultuře organismů kyslík z dodávaného vzduchu. Zároveň tento systém zajišťuje homogenizaci vsádky v aktivací nádrži tak, aby kal v aktivované směsi nesedimentoval na dně, ale byl ve vznosu a byl co nejdéle v kontaktu se vzduchem a odpadní vodou [5]. Vsádku nádrže lze provzdušňovat následujícími způsoby:

- Pneumatická aerace
- Mechanická aerace
- Hydropneumatická aerace
- Kombinace výše zmíněných

3.1 Pneumatická aerace

Pneumatická aerace bývá dnes v praxi nejvíce používána. V tomto procesu je potřebné množství vzduchu nasáváno dmychadly, nebo kompresory. Vzduch dále pokračuje přívodním potrubím do aeračních elementů nebo vestaveb, které dodávají do aktivované směsi vzduch. Je důležité vhodně umístit aerační systémy, aby byla zaručena uniformní distribuce vzduchu v celém objemu nádrží [5]. Na základě parametrů aeračního elementu velikosti porů a především tvorby průměru bublin potom rozlišujeme 3 druhy pneumatické aerace:

- Jemnobublinnou ($d_b = 1 - 4 \text{ mm}$) – SOTE = 15 – 30 %
- Středobublinnou ($d_b = 4 - 10 \text{ mm}$) - SOTE = 5 – 10 %
- Hrubobublinnou ($d_b > 10 \text{ mm}$) - SOTE = 4 – 6 %

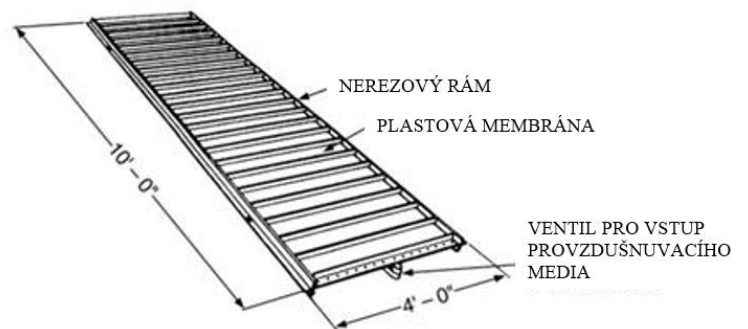
3.1.1 Aerační elementy

Aerační element je zařízení, které přes své póry dopravuje odpadní vodě bubliny vzduchu. Know how výrobců těchto elementů spočívá v použitém porením materiálu a konstrukci samotných elementů. Již od 90. let minulého století je velkým trendem volit především

jemnobublinné aerační elementy díky řádově až 2 x vyšší účinnosti přestupu kyslíku. Dalším parametrem je hloubka umístění elementů a obecně tedy hloubka aktivační nádrže. Využití kyslíku (nejčastěji vyjádřené parametrem SOTE) stoupá s klesající hloubkou instalovaných elementů více v Kapitole 6 Přenos hmoty na mezifázovém rozhraní. Dnes jsou běžně nádrže navrhovány na hloubky 4 – 6 m vychází to tak z analýzy CAPEX nákladů na výstavbu a OPEX nákladů na provoz. [5]

Používané materiály aeračních elementů:

- Keramika – je nejtradičnější materiál používaný na výrobu aeračních elementů. Typicky jsou keramické aerační elementy dražší. Výhodou je extrémní chemická odolnost. Někteří výrobci proklamují také menší riziko foulingu v porovnání s jinými materiály. [7]
- Tvrdé plasty – Dnes se již od plastů na poli aeračních elementů upouští. Nicméně v minulém století se běžně používaly především dva typy plastů HDPE a SAN³. Cenově výhodné byly elementy z HDPE. Naopak SAN byl velmi tvrdý a odolný. [7]
- Kovové – z kovových materiálů se dnes takřka výhradně používá nerez. Hlavně díky silným korozivním účinkům. Z důvodů vysokých výrobních nákladů děr pro průchod plynu jsou většinou nerezové aerační elementy hrubobublinné.
- Perforované membrány – Dnes již nejvíce rozšířeným a prověřeným technickým řešením jsou pružné membrány s malými otvory průměru 1 mm. Perforace membrány umožňuje funkčnost v polopropustném stavu, kdy pouští plyn, ale nepustí odpadní vodu do přírodního potrubí. Dle Muellera (2002) byly membrány na trhu již v letech 1960 známé jako “ponožkové difuzery“. V letech 1980 v kontextu rozvoje materiálového inženýrství byl použit EPDM⁴ elastomer. Tento dnes velmi často používaný materiál má skvělé mechanické vlastnosti jako pružnost a odolnost především vůči kyselinám. Svými vlastnostmi je velmi podobný gumě. Skvěle se EPDM osvědčil pro aeraci odpadních z papíren, textilního průmyslu, mlékaren, a petrochemie. [7]



Obrázek 7 Panelový difuzér převzato z [7]

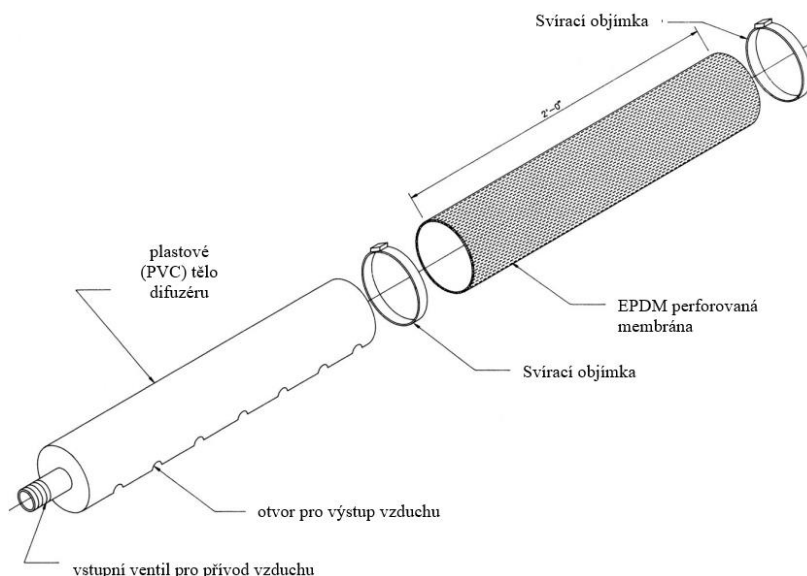
Typy aeračních elementů:

- Deskový – deskové difuzery jsou často buď perforované membrány a nebo keramické porézní desky. Geometricky nejčastěji čtverce 30 x 30 cm. [7]
- Panelový – v tomto případě jsou nerezové rámy o něco menší než rozměr aktivační nádrže pokryté velkou perforovanou polyurethanovou membránou přes které prochází vzduch. Nevýhodou těchto aeračních elementů je, že se často ucpávají. [7]

³ HDPE –High Density Poly Ethylene , SAN –Styren Akrylonitril

⁴ EPDM – Ethylen Propylen Dimerurethan

- Trubkový – trubkové aerační elementy bývají konstrukčně uspořádané jako plastové či keramické potrubí perforované s otvory, kudy proudí vzduch. Na plastové potrubí je potom převlečena jemnobublinná membrána z eleastomeru, kterou drží svírací objímka, aby při velkých tlacích nepovolila. V praxi bývají tyto difuzery velmi účinné a nebývají náchylné na fouling.

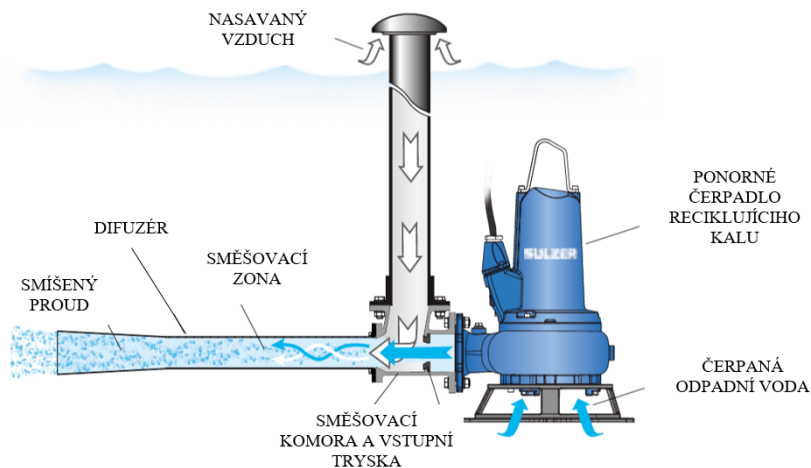


Obrázek 8 Trubkový aerační element převzato a upraveno [7]

- Hadicové – Jsou typickým představitelem pro intenzifikace čistým kyslíkem. Konstrukčně se perforovaná hadice z EPDM elastomeru připevní na svařený nerezový rám, který se připevní na spod aeračního tanku. Více v kapitole 8.3.2 Elementy pro kyslík.
- Diskový – konstrukčně bývá tělo a držák pro uchycení pružné membrány z tvrdého a odolného plastu např.: ABS. Membrána dle velikosti perforací bývá z elastomeru jemno, středně nebo hrubobublinná. [7]

Tryskové difuzéry

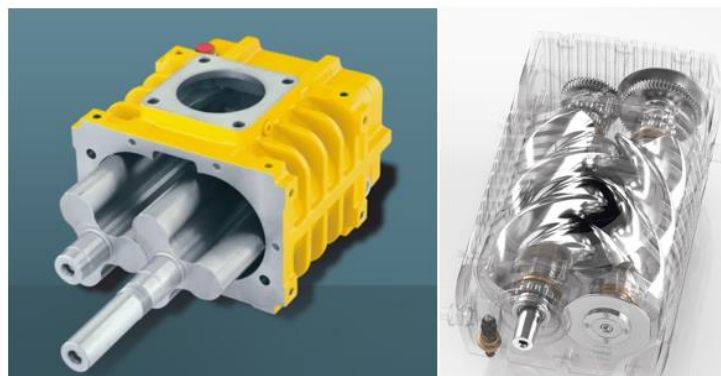
V tryskových difuzérech dochází ke směšování přečerpavané odpadní vody a přiváděného provzdušňovacího media. Smíšený proud vystupuje z trysky do okolní vody (viz. **Obrázek 9**). Tryskové difuzéry bývají umístěné těsně nad dnem nádrže. Dle suspořádání difuzeru rolišujeme ejektor a nebo Venturiho trubici. V obou případech bývá také součástí aeračního systému čerpadlo, které žene odpadní vodu do difuzéru jedním potrubím a vzduch dopravován dmychadlem v druhém potrubí. Výhodou těchto zařízení jsou míchací účinky a podtlak ve směšovací zóně, který napomáhá sání provzdušňovacího media. Nevýhodou naopak bývají malé hodnoty výtěžku kyslíku (SOTE) a vysoká energetická náročnost. [7] Maximální dodávané množství vzduchu bývá do $400 \text{ Nm}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$ a až $20 \text{ kg O}_2 \cdot \text{hod}^{-1}$ v 5 metrech hloubky instalovaného difuzéru.[39]



Obrázek 9 Typické uspořádání tryskového difuzoru převzato a upraveno Sulzer [39]

3.1.2 Volba kompresorů a dmychadel

Jelikož bývá kompresor resp. dmyhadlo největší spotřebič energie a musí pracovat takřka nepřetržitě, je důležité zvolit správný typ. Z procesního hlediska musí toto zařízení překonat tlakové ztráty v potrubí, místní ztráty, a tlakovou ztrátu danou aeračním zařízením spolu s hydrostatickým tlakem. Také se vyžaduje schopnost regulovat dodávané množství vzduchu podle potřeby. Kompresory jsou obecně vhodné spíše pro hlubší nádrže a pro dosahování vyšší dopravní výšky. Z kompresorů se nejvíce uplatňují šroubové kompresory s vysokou izoentropickou účinností. Z dmychadel se nejčastěji používají Rootsova (loubová) dmyhadla nebo vícestupňová odstředivá dmyhadla pro vyšší potřebné průtoky vzduchu (viz. **Obrázek 10.**) V případě velkých průtoků vzduchu a vyšších tlaků lze také použít turbokompresory.

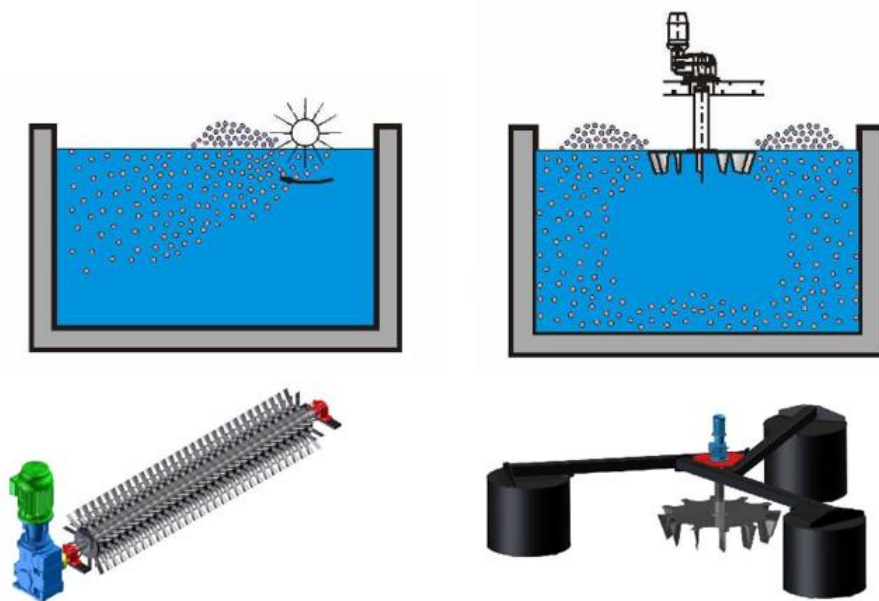


Obrázek 10 Vlevo blok 3 loubového dmyhadla Kaeser řady OMEGA, Vpravo blok šroubového dmyhadla Kaeser řady Sigma převzato a upraveno [32]

3.2 Mechanická aerace

Při mechanické aeraci se používají aerátory s horizontální (aerační Kessenerovy “kartáče“) nebo vertikální osou (aerační turbíny), plovoucí nebo s připevněné k vestavbě. Parametry ovlivňující hodnotu vsrabaného kyslíku jsou otáčky aerátoru, průměr aerátoru, a hloubka umístění aerátoru. Výkon roste s pátou mocninou průměru aerátoru. [6] Mechanická aerace byla v porovnání s pneumatickou aerací populární díky nižším nákladům na provoz. Další výhodou jsou homogenizační účinky lopatek aerátorů, zejména vertikálních. Homogenizace vsádky je

výhodu, ale při vyšších otáčkách lopatky aerátorů dezintegrují polykulturu, která odstraňuje organické znečištění. Tato zařízení jsou náchylná na poruchy, zejména mechanicky choulostivé části převodovky. Zároveň zde byly větší zástavbové nároky na aerační nádrže. A pro regulaci přestupu kyslíku je složité stanovovat konkrétní otáčky motoru. Z hlediska hydromechanických procesů by bylo vhodnější míchat vsádku v kruhové nádrži pro eliminaci mrtvých zón a opatřit případně zarážkami pro intenzifikaci přenosu hmoty. Mechanické aerátory chladí aktivační směs a zpomalují tak proces aktivace. [5] Horizontální aerátory můžeme nalézt především v aktivaci v oxidačních příkopech a v karuselových aktivacích.



Obrázek 11 Kessenerův horizontální aerátor vlevo a vertikální aerační turbína vpravo převzato [4]

3.3 Hydropneumatická aerace

Tento způsob aerace využívá ejektorů nebo injektorů. Konstrukčně se jedná o jednoduchá zařízení. Na sání ejektoru je čerpadlem přečerpávaná odpadní voda v aktivační nádrži a provzdušňovací směs je vháněna kompresorem nebo dmyhadlem přes trysku do směšovací zóny ejektoru (viz **Obrázek 12**). Výhodou ejektoru je že přečerpáváním směsi se ve směšovací zóně tvoří podtlak, který vhání provzdušňovací medium do ejektoru. Po smísení vychází “provzdušněná“ směs výstupním hrdlem z difuzoru do aktivační nádrže. Výhodou jsou jednoduchá údržba (případná výměna) bez vypouštění nádrže a dlouhá životnost. Diskutabilní bývá zástavbová náročnost. Samotný ejektor, nebo sestava ejektorů, zabere malou plochu. Ale záleží na geometrii nádrže a vlastnostech kalu, volbě provzdušňovacího media. [4] Výhodou jsou vysoké výtěžky SOTE až $3,25 \text{ kgO}_2.\text{kWh}^{-1}$. Nevýhodou hydropneumatické aerace je uspořádání a vhodná instalace ejektorů. Z **Obrázku 12** můžeme vlevo vidět typické paprskovité provedení ejektoru, které se často umísťuje u dna aktivační nádrže. Naproti tomu vlevo můžeme vidět provedení jedné trysky instalované přes stěnu tanku. [40]



Obrázek 12 Typické provedení instalovaných ejektorů převzato a upraveno [40]

4 Aktivace kyslíkem

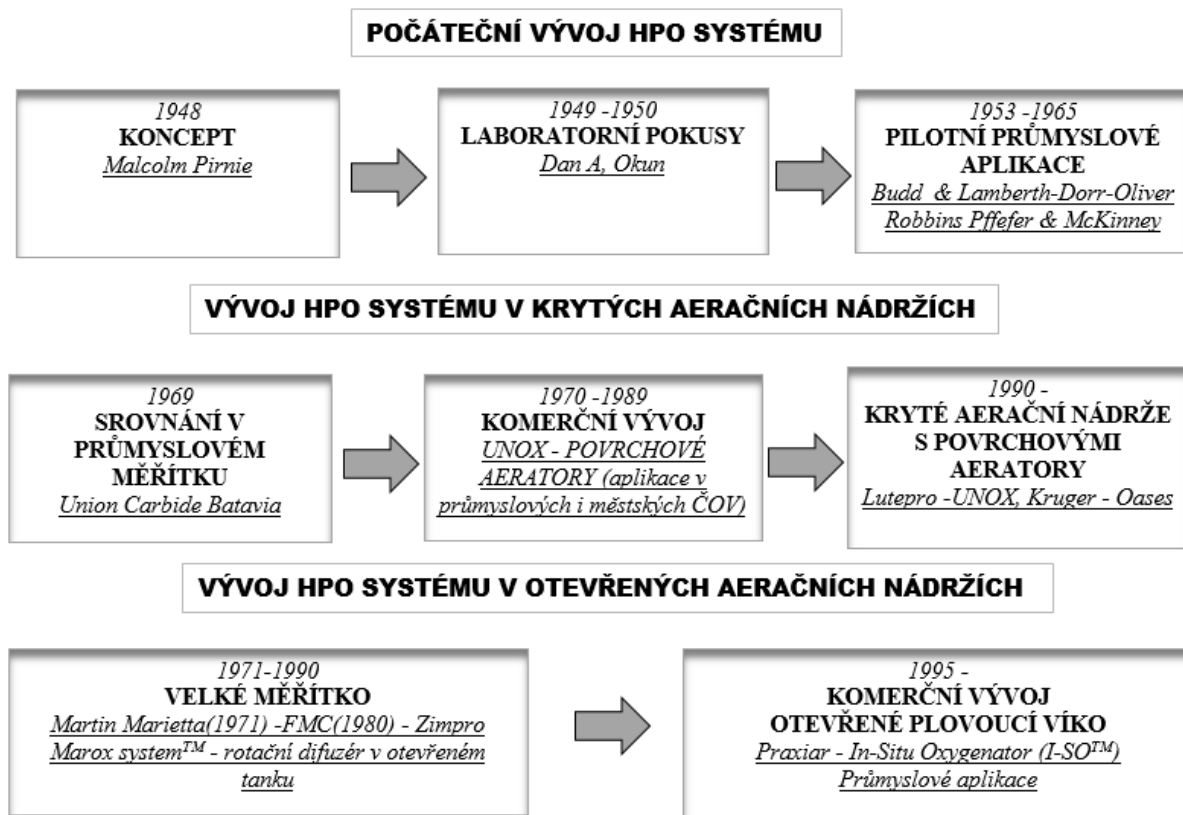
4.1 Historický vývoj HPO (High Purity Oxygen) systémů

Cílem tzv. HPO systémů je zajišťovat vyšší koncentrace kyslíku v plynné fázi než mají systémy se vzduchem, což umožňuje rychlejší úpravné procesy s vyššími hodnotami suspendovaných pevných látek v odchozím kalu. Pro klasifikaci HPO systémů je v průmyslovém měřítku zažité, že se v aerační nádrži rozpustí alespoň 90 % čistého kyslíku v odpadní vodě. [7]

Profesor Dan A. Okun použil pro laboratorní pokus reaktor s fluidním ložem a předvstupním okysličením odpadních vod a odstranil 90 % znečištění při vstupních koncentracích sušiny $X = 5000\text{--}8000 \text{ mg.l}^{-1}$. V roce 1953 provedli Budd a Lambeth pod záštitou společnosti Dorr-Oliver studie na pilotní stanici bio-precipitace o kapacitě $55\text{--}160 \text{ m}^3.\text{den}^{-1}$ v úpravně odpadních vod Black River v Baltimore. [7] Pro představu dynamiky vývoje HPO systémů můžete z **Obrázek 14**, že vývoj těchto systému byl započat již v 50. letech minulého století. Pro úplnost dodám, například aktivace se do pražské čistírny dostala až v roce 1960, kdy byli poprvé provedeny pilotní průmyslové aplikace HPO systémů v USA. [7]

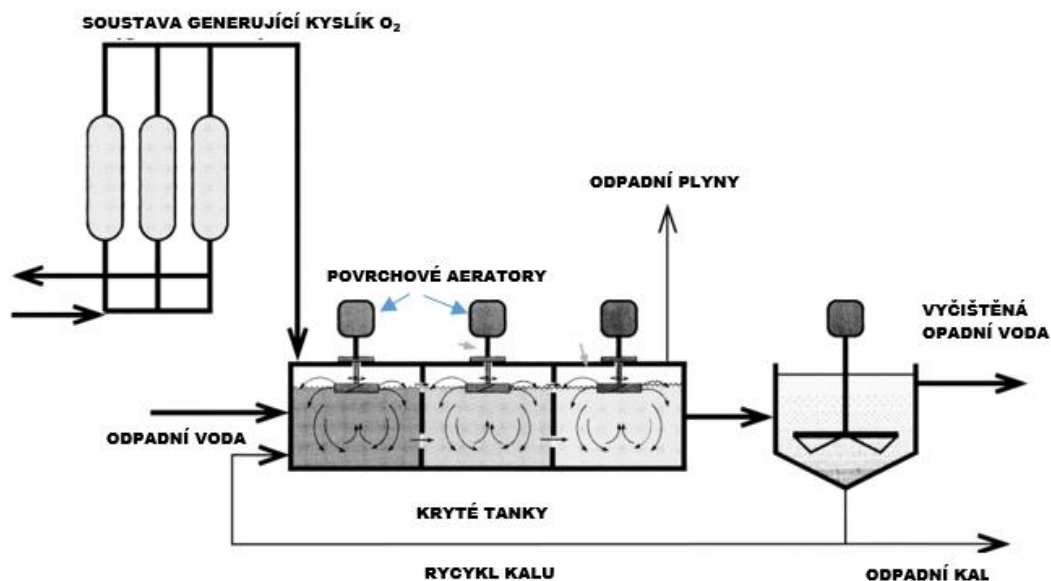
Jako pokračování studie byla v Baltimoru vytvořena sofistikovanější pilotní stanice o kapacitě $270\text{--}380 \text{ m}^3.\text{den}^{-1}$, která zahrnovala proměnlivý přítok. Účinnost odstraňování BSK_5 90 % byla dosažena při měrném nátoku $36,7 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{den}$. [7] Další vývoj HPO systému je dále možno vidět na **Obrázek 14**. V roce 1969 byly v Batávii (NY, USA) zprovozněny velkokapacitní HPO systémy UNOX v paralelním zapojení se vzduchem. Čistý kyslík byl aplikován do sestavy krytých aeračních nádrží, kde poslední byla opatřena odvodem zbytkových plynů. Tento plyn byl následně recyklován. Výfuk a dávkování kyslíku bylo dimenzováno tak, aby se vstřebalo právě 90% kyslíku. Po implementaci konfigurace HPO systému UNOX se aktivace zkrátila na třetinovou hodnotu aerace vzduchem. [7]. Pro čistící stanice s průtoky od $20\ 000\text{--}400\ 000 \text{ m}^3/\text{den}$ byly pozorovány 20 - 30 % nižší CAPEX náklady v porovnání s běžnou aktivací vzduchem. [7] Výsledky tohoto pokusu vedly ke komerčnímu rozšíření kyslíkově intenzifikovaných technologiích pro ČOV. Na evropské půdě byla do provozu tato technologie

poprvé uvedena v roce 1976 a to v Německu, Belgii, Anglii, a Švýcarsku. Společnost Lutepro Corporation⁵ v roce 1981 získala obchodní známku na vývoj a prodej UNOX technologie.



Obrázek 13 Flowchart historie vývoje HPO systémů (převzato a upraveno z [7])

⁵ Lutepro Corporation spadala pod společnost Linde AG. Dnes významný distributor a výrobce technických plynů a systému pro jejich výrobu apod.



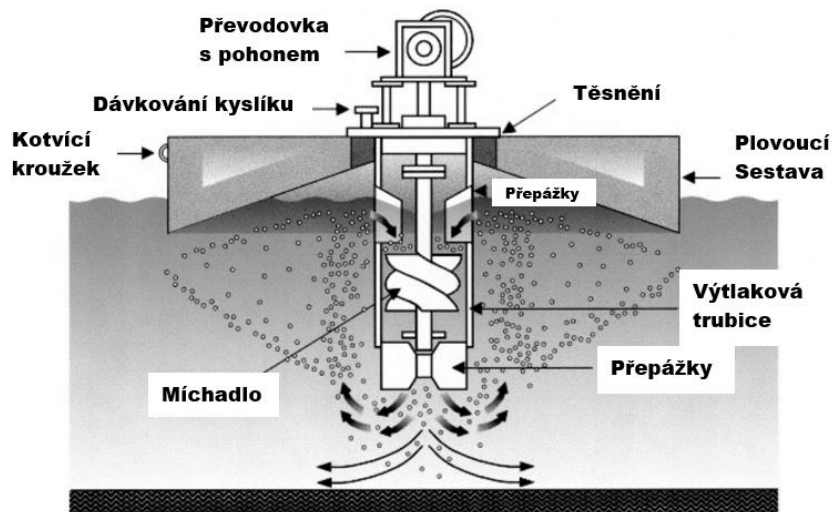
Obrázek 14 HPO systém s povrchovými aeratory Lotepro Corporatin, Vallhala (převzato a upraveno[7])

4.2 Vývoj HPO systému v otevřených tancích

Roku 1971 započala vývoj systémů HPO s otevřenými tanky společnost Martin Marietta Company v USA. Aerační tanky byly opatřeny jemnobublinnými difuzéry, které tvořily bubliny o průměru 50 – 200 μm . Takovýto systém potom poskytoval násobně větší specifický povrch pro přestup kyslíku a zároveň zajišťoval delší doby zdržení bublin kyslíku. V těchto případech bylo zaznamenáno o 39 % menší nároky na vstupní energie v porovnání s otevřenými tanky se vzduchem [2]. Dalším hodnotným příspěvkem byl vývoj plovoucího systému In-Situ OxygenatorTM (I-SOTM) (viz. **Obrázek 15**) patentovaný společností Praxair, Inc.⁶ Tento design byl kompromisem mezi uzavřeným tankem a otevřeným tankem s difuzéry, přičemž právě plovoucí kryt sloužila pro zachyt dosud nerozpuštěných bublin kyslíku. Pro cirkulaci směsi bublin a aktivovaného kalu zpět ke dnu nádrže je použito míchadlo ve tvaru šroubovice a usměrňovacích narážek ve spodní části trubice. První realizovaná instalace v roce 1992 v Brazílii I-SOTM měla skvělé výsledky, kdy se hodnoty množství rozpuštěného kyslíku

⁶ Společnost Praxair Inc. dříve součástí Linde AG (1917). Později v roce 1992 Union Carbide Corporation přejmenováno na Praxair Inc..

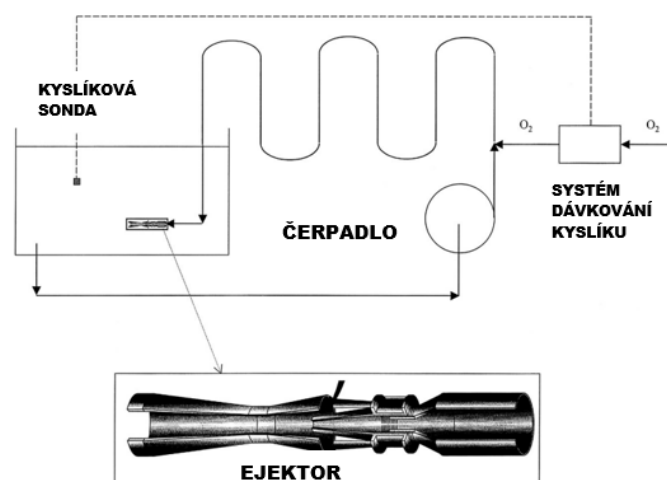
vyšplhaly až na 95 %. [2] Poté co se I-SO™ technologie uvedla na trh, našla své uplatnění pro vyhnívání kalu, pěstování akvakultur a ryb. [7]



Obrázek 15 Praxair I-SO™ patentovaný systém pro rozpouštění kyslíku (převzato a upraveno [7])

4.3 Ejektory

V návaznosti na HPO systémy je také vhodné zmínit, že je někdy výhodné použít uspořádání s použitím ejektoru. Konfiguraci s použitím ejektoru vyvinula společnost SIAD ve spolupráci se společností Praxair Inc. pod názvem Mixflo™ (viz. **Obrázek 16**). Kouzlo této technologie spočívá v jeho jednoduchosti. Konstrukčně je ejektor velmi elegantním řešením, které dle výsledků poskytuje > 90 % rozpuštěného kyslíku a přidanou hodnotou přispívá také míchání vsádky aeračního tanku, díky velké rychlosti směsi vystupující z ejektoru. [7] Nicméně je potřeba čerpadlo, které poskytne dostatečně velký tlak pro čerpání odpadní vody a její smíšení v kontaktoru s kyslíkem. Autor uvádí, že provozní tlaky se pohybují pro tento případ kolem $p_{prac}=300$ [kPa]. [7] Právě kvůli energetickým nárokům na čerpadlo se takovéto systémy nevyplácí.



Obrázek 16 Schéma technologie Mixflo™ (převzato a upraveno [7])

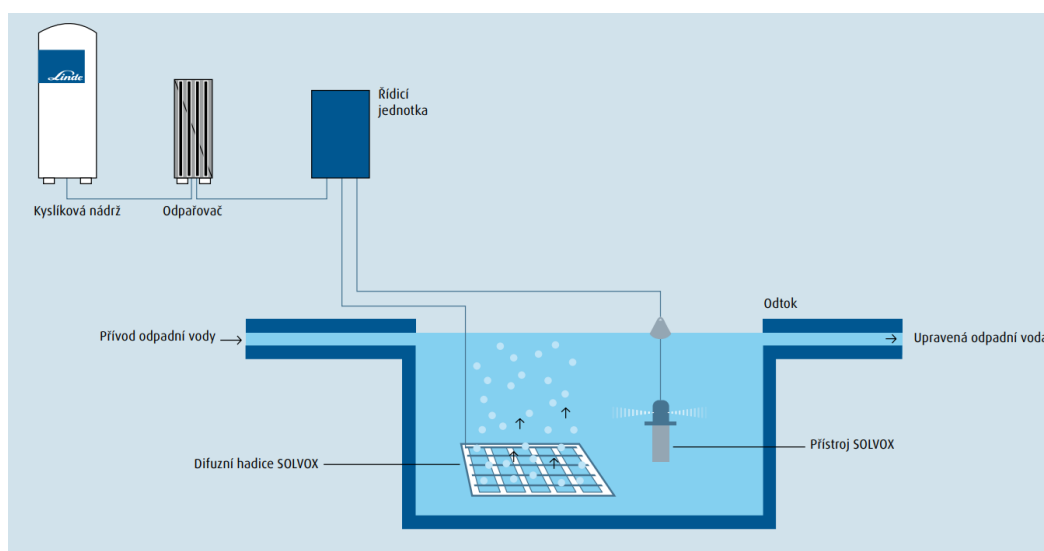
5 Aerační systémy s kyslíkem

Kyslíková aerace využívá čistý kyslík nebo kyslíkem obohacenou směs místo vzduchu. Původně byly aktivační nádrže pro aktivaci kyslíkem děleny do 3 sekcí, v níž byla aktivační směs míchána jak mechanicky, tak účinky stoupajících bublin kyslíku. Tento proces typicky využívá 95 – 99 % dávkovaného kyslíku. [7] V praxi jsou dnes velkými dodavateli kyslíkových aerátorů a jejich systémových řešení společnosti distribuující technické plyny.

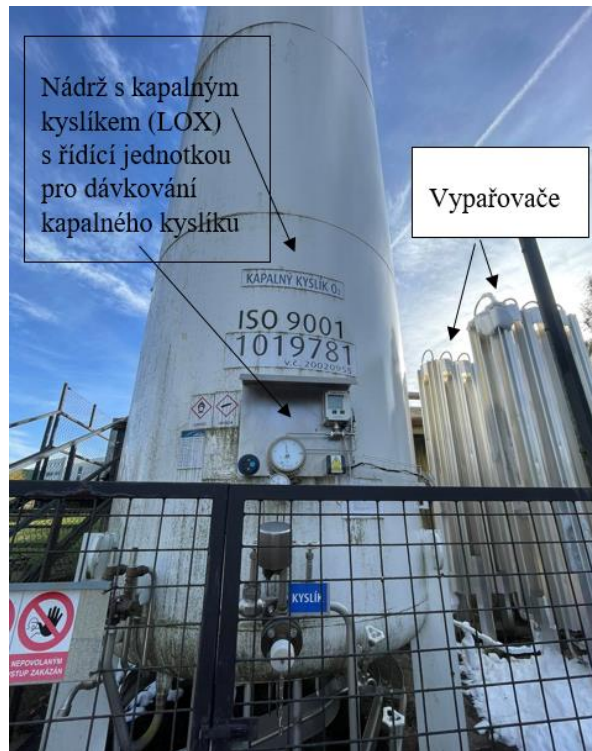
5.1 Solvox systém

Pro čistírny odpadních vod bývá dávkování kyslíku nebo vzduchu problematické, protože tato hodnota se mění v závislosti na přítoku odpadních vod, jejich znečištění, teploty apod. Z tohoto důvodu vznikl systém s dávkováním čistého kyslíku, který intenzifikuje stávající stav čištění a pomáhá navýšit kapacity bez rozsáhlých stavebních úprav. Samotný systém je relativně jednoduchý, skládá se z nádrže na kapalný kyslík, výparníku, řídicí jednotky, a kyslíkové sondy. Kyslík se ve výparníku přemění z kapalné fáze na plynnou. Odpařovací tlak lze nastavit, takže vzniklý plyn má dostatečnou hnací sílu a proto v těchto systémech nebývá potřeba kompresor. Dávkování kapalného kyslíku resp. plynného kyslíku do nádrže je řízeno řídicí jednotkou, která na základě naměřených hodnot rozpuštěného kyslíku v nádrži vyhodnocuje, kolik kyslíku je zapotřebí. Pro co nejefektivnější přestup kyslíku jsou systémy opatřeny různými jemnobublinnými aeračními hadicemi, které jsou připevněny na rošt připevněný ke dnu nádrže. Sestava může být opatřena injektorem, ejektorem, nebo řešena s pomocí Venturiho trubice.

Variantu s aeračními rošty, kterou nabízí řada společností v rámci distribuce technických plynů: Linde, Messer, Air Products apod. Solvox systém společnosti Linde, můžeme vidět na **Obrázku 17**. Systém je schopen dosáhnout kapacity rozpuštěného kyslíku až 25 kgO₂/hod. V praxi jsem měl příležitost vidět instalovanou jednotku v ČOV Choustník, kde se z důvodu navýšení průtoku odpadních vod z výroby brambůrků musel intenzifikovat stávající stav ČOV s pomocí SOLVOX systému viz. **Obrázek 18**.



Obrázek 17 Linde Solvox systém aerace [3]



Obrázek 18 Fotografie instalovaného SOLVOX systému Linde v ČOV Choustník

5.2 Solvox Cone systém

Dalším produktem z portfolia Linde je Solvox Cone systém, který se využívá ke zvýšení koncentrace kyslíku aqualkultur. Toto zařízení je schopno dosahovat účinnosti až SOTE = 100 %. Další výhodou je i překvapivě nízká energetická spotřeba, kdy výrobce udává až $1 \text{ kg O}_2 \cdot \text{kWh}^{-1}$. Vzhledem k tomu že je zařízení ve styku s vysoce koncentrovanou kyslíkovou směsí je zařízení vyrobené ze speciálního plastu vyztuženého skleněnými vlákny (GRP – Glass- Fiber Reinforced Plastic). Pro Solvox Cone 110 je při teplotě $12 \text{ }^\circ\text{C}$ možné ve vodě rozpustit až $26 \text{ kg O}_2 \cdot \text{hod}^{-1}$. [30] Systém Solvox Cone (viz. **Obrázek 19**) je ideální pro chov ryb v akvakulturách nebo pro oblasti stojaté vody s nedostatkem kyslíku.



Obrázek 19 Solvox Cone systém převzato a upraveno [30]

5.3 Solvox Dropin systém

Pro zajištění dostatečného množství rozpuštěného kyslíku v oceánech a otevřených velkých vodních plochách je potřeba zajistit, aby byla jednotka plovoucí. Zařízení viz. **Obrázek 20** se ponoří do hloubky 4 až 20 metrů spolu s přívodní hadicí na kyslík a kabelem pro napájení čerpadla. Zařízení vytváří v dané hloubce mikrobubliny, které mají velmi malou rychlost vznosu, dlouhou dobu zdržení, a proto se také dle výrobce lze dosáhnout úroveň SOTE až 100 % i při relativně nízkých tlacích. Navíc má Solvox Dropin výkon pouhé 2 kW. [31]

Obrázek 20 Solvox Dropin převzato [31] 1- oko na vytažení, 2- kabel s hadicí na přívod kyslíku, 4 – difuzéry pro výstup mikrobublin, 5 – mokrý senzor, 6- vstupní otvory pro vodu



6 Aerace kyslíkem vs. vzduchem

Kyslík zastává klíčovou funkci při čištění odpadních vod v rámci aplikace aktivačního procesu. Aktivace využívá provzdušňování pro udržení hladiny rozpuštěného kyslíku, který potřebují organismy k rozkladu organických látek v odpadní vodě, což zajišťuje jejich udržení a růst. Jak již termín provzdušňování prozrazuje, že nejčastěji používaným zdrojem kyslíku pro aktivaci je právě vzduch. Složení suchého vzduchu je uvedeno v **Tabulka 2**. Suchý vzduch je zejména tvořen dusíkem N₂(78,09 % obj.) a kyslíkem O₂ (20,95 % obj.)⁷.

Tabulka 2 Vybraná data pro složení suchého vzduchu ([4], [5])

Složení suchého vzduchu (STP - 298,15 K; 101,325 kPa)

| Složka i | M _i [kg/kmol] | C _i ^v [obj. %] | m _i [kg/kmol _{vzd.}] | C _i ^m [hm. %] | p _i [kPa] | T _{vi} [°C] | H _i ·10 ⁻⁵ [mol·m ⁻³ ·Pa ⁻¹] |
|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|----------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Dusík N₂ | 28,013 | 78,09 | 2187,53517 | 75,53 | 79,125 | -195,8 | 64 |
| Kyslík O₂ | 31,999 | 20,95 | 670,37905 | 23,15 | 21,228 | -183 | 1,2 |
| Argon Ar | 39,948 | 0,93 | 37,15164 | 1,28 | 0,942 | -185,8 | 1,4 |
| Oxid uhličitý CO₂ | 44,01 | 0,03 | 1,3203 | 0,05 | 0,030 | -78,5 | 0,33 |
| Vzduch | 28,97 | 100 | 2896,38616 | 100,00 | 101,325 | -194,15 | - |

Daniel A. Okun prvně poukázal na fakt, že aplikace čistého kyslíku může výrazně zvýšit přenos kyslíku do odpadní vody. V návaznosti na aplikaci čistého kyslíku tvrdil, že se zvýší účinnost čištění vod bez nutnosti instalace nových aktivačních nádrží, takže se zároveň sníží jak CAPEX náklady tak OPEX náklady. [6] Mueller uvádí, že výhody aplikací čistého kyslíku spočívají především v nižších požadavcích na objem provzdušňovací nádrže pro ekvivalentní vyčištění a v nižších požadavcích na objem provzdušňovací nádrže pro ekvivalentní sníženou produkci aktivního kalu, v důsledku efektivnějšího využití vysoce čistého kyslíku než u dosavadního ošetření vzduchem při nominálním čase zdržení 6 hodin a průtokem vzduchu 0,42 Nm³_{vzd.}·l⁻¹. Odhaduje se, že náklady na provzdušňování budou o 20-30 % za 1m³ odpadních vod denně vyšší než s použitím kyslíkového systému schopného ekvivalentního odstranění BSK₅ znečištění při nominálním čase zdržení 2 hodiny. (viz. **Tabulka 3**) [7]

⁷ Vlhký neupravovaný vzduch je samozřejmě tvořen dalšími složkami He, Xe, H₂O, CH₄ apod.

Tabulka 3 Srovnání nákladů na provzdušňování vzduchem vs. kyslíkem

| Průtok odpadní vody \dot{V} (m^3/den) | Cena za likvidaci odpadních vod vzduchem [Kč/m ³ ov] ^{*1} | Cena za likvidaci odpadních vod kyslíkem [Kč/m ³ ov] ^{*1} |
|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 1600 | 0,93 | 0,74 |
| 8000 | 0,79 | 0,58 |
| 26 500 | 0,67 | 0,48 |

Poznámka: ^{*1} Hodnoty byly převzaty z anglické literatury Mueller 2002 [7] a přepočítány kurzem měny 1 USD – 22,3 Kč (27.12.2023)

Energie potřebná pro provoz zařízení pro aeraci, včetně generování kyslíku, byla stejná jako u běžné čistíčky odpadní vody, zatímco požadavky na plochu nádrží se snížily až o 50 % a objem nádrží o 30 %. [2]

Použití čistého kyslíku místo vzduchu významně zvyšuje hmotový přenos kyslíku pro provzdušňování. Cílem systémů s vysoce čistým kyslíkem je poskytovat vyšší koncentrace kyslíku v plynové fázi než systémy se vzduchem, což umožňuje rychlejší ošetrovací rychlosti s vyšším obsahem pevných látek ve směsích a menšími provzdušňovacími nádržemi. [2]

7 Definice základních pojmů

7.1 Standardní rychlost přestupu kyslíku (SOTR)

Tento parametr vyjadřuje množství kyslíku, které jsme schopni dodat do objemu vody za daný čas při tzv. standardních podmínkách. Standardními podmínkami rozumíme tlak $p = 101,325$ kPa, teplota $T = 20^\circ\text{C}$, nulová salinita, relativní vlhkost $\phi = 0$, a nulová počáteční koncentrace rozpuštěného kyslíku $C_0 = 0$ mg.l⁻¹ ve vodě. Při nulové počáteční koncentraci kyslíku ve vodě je rychlost syčení vody kyslíkem maximální.

$$SOTR = V \left(\frac{dC}{dt} \right)_{STP} = K_L a_{20} C_{SAT_20} V \left[\frac{kg}{hod} \right] \quad (1)$$

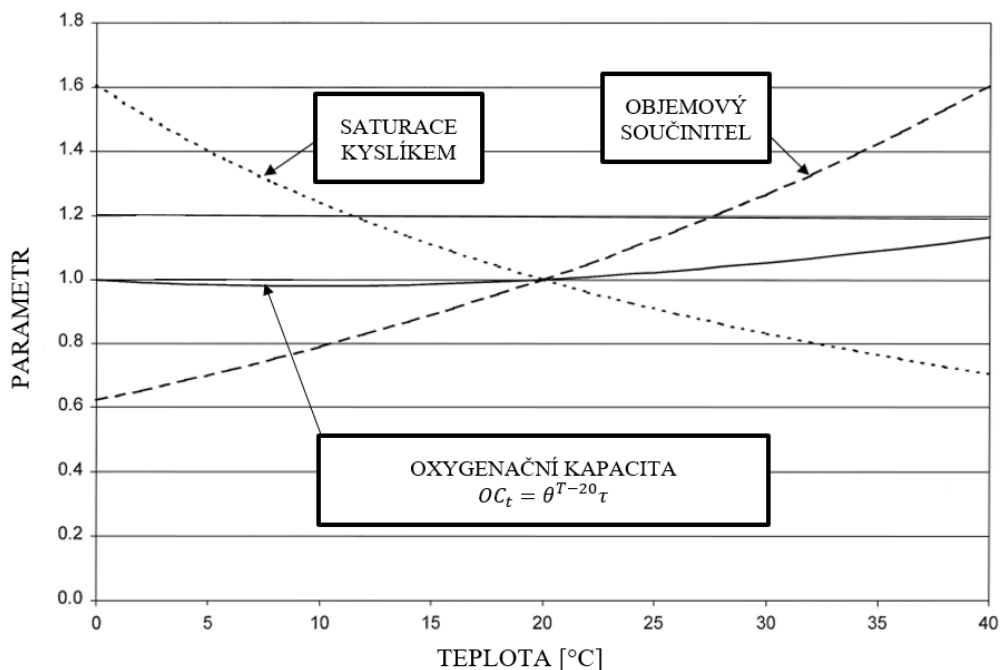
7.2 Specifická oxygenační kapacita (OC)

Tento parametr se používá především v evropských státech. Je definován jako množství kyslíku, které je zařízení schopno dodat do jednotkového objemu aktivované směsi za jednotku času při nulové počáteční koncentraci rozpuštěného kyslíku. [8] Spočítáme jej jako součin celkového objemového součinitele přestupu hmoty a saturační koncentrace kyslíku pro danou teplotu.

$$OC = \left(\frac{dC}{dt} \right) = K_L a_T C_{SAT_T} = \frac{SOTR}{V} \left[\frac{kg}{m^3 \cdot hod} \right] \quad (2)$$

V praxi je vždy malá část kyslíku rozpuštěna v aeračních nádržích. Při použití např.: hrubobublinného provzdušňování se reálně dostáváme na hodnoty využití kyslíku ze vzduchu $\chi = 10 - 20 \%$. [5] Při provzdušňování nádrží vzduchem potom takřka 80 % energie potřebné na kompresi se maří dopravováním ostatních přítomných plynů, které jsou ve vzduchu přítomny (především dusík N_2). I když je představa použití čistého kyslíku na první pohled z těchto faktů velmi pozitivní a mohla by potenciálně snížit náklady potřebné na aeraci až o 80 %, vyvstává při jeho použití řada limitujících překážek. [8] Problém je hodnota saturace kyslíkem, která se zvyšuje se stoupající teplotou a se zvyšující se hydrostatickou hloubkou, ale naopak klesá hodnota objemového součinitele přestupu hmoty. Dalším nedostatkem v kontextu nízké hodnoty rozpustnosti kyslíku a hodnoty součinitele přestupu hmoty jsou také dlouhé doby zdržení, které se kompenzují vysokými kapitálovými investicemi. Pro zajištění delších dob zdržení je potřeba zastavit větší plochu. [1] Další překážkou je teplota. Parametry saturace kyslíkem a objemový součinitel přestupu hmoty jsou funkcí teploty. Jak bylo uvedeno výše, se zvyšující se teplotou se snižuje koncentrace saturace vody kyslíkem, ale zároveň se zvyšuje objemový součinitel přestupu hmoty. Funkce θ viz. rovnice (3) pomáhá definovat oxygenační kapacitu pro teplotu odlišnou od standardní teploty. V **Graf 2** jsou znázorněny průběhy parametrů objemového součinitele přestupu hmoty a saturace kyslíkem v závislosti na teplotě a je vidět, jak se protichůdně mění se stoupající teplotou. Zároveň jak spolu se teplotou se mění funkce θ .

$$\frac{OC_T}{OC} = \frac{K_L a_T C_{SAT,T}}{K_L a_{20} C_{SAT,20}} = \theta^{t-20} \quad (3)$$



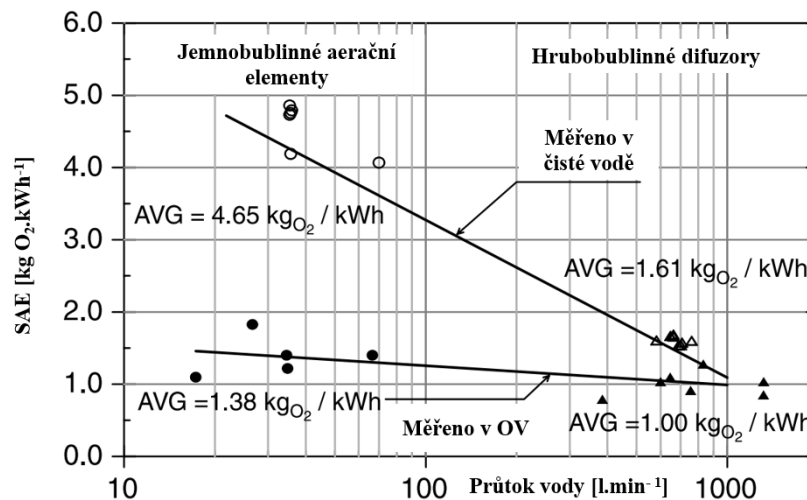
Graf 2 Srovnání průběhů parametrů objemového součinitele $K_L a$, koncentrace nasycení kyslíkem C_{SAT} , a oxygenační kapacity OC_t převzato a upraveno z [7]

7.3 Standardní aerační účinnost (SAE)

Parametr SAE určuje, jaké množství kyslíku je možno dodat na jednotkový dodávaný příkon kompresoru nebo dmyhadla. Z hlediska návrhu lze naměřit hodnoty SOTR a vydělit je potřebným příkonem kompresorů či dmyhadel pro dodání provzdušňovacího média.

$$SAE = \frac{SOTR}{P} [kg O_2 \cdot kWh^{-1}] \quad (4)$$

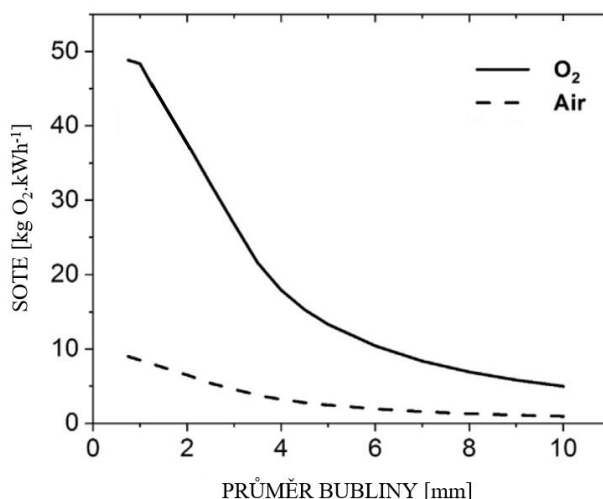
Z **Graf 3** je zřejmé, že hodnota SAE v odpadních vodách pro průměrný nátok odpadních vod je výrazně nižší ve srovnání s čistou vodou, jak vyplývá z naměřených hodnot Yunta [24]. Právě díky přítomnosti organických a anorganických sloučenin je přestup kyslíku brzděn. Pro odpovídající průtoky 20 až 1000 l.min⁻¹ byly dle Yunta (1996) hodnoty SAE 1,38 – 1 kg O₂.kWh⁻¹. Pro čistou vodu se hodnoty SAE se snižujícím se průtokem násobně zvětšují. [24] V čisté vodě je možno rozpustit více kyslíku než v odpadní vodě.



Graf 3 Srovnání SOTR parametrů v demineralizované vodě a odpadní vodě převzato [24]

7.4 SAE kyslík vs. vzduch

Čističky odpadních vod obvykle dosahují SAE hodnot 4,7 – 1,6 [kg O₂/kWh]. [1] Pro parametry aktivace při uvažované hloubce 5 m a pro uvažovanou hodnotu rozpuštěného kyslíku ve vodě 1 mg/L, je výtěžnost aerace v rozmezí 6,6 až 1,9 [kg O₂/kWh] platná pro oblast jemnobublinné aerace, kde průměr bublin $d_b < 3$ [mm]. Klíčovou informací, která byla i motivací této práce je fakt, kdy použitím čistého kyslíku místo samotného vzduchu je možno na základě výsledku z modelové situace přesunout 5 až 6 krát více kyslíku a navýšit tak účinnost přeměny energie, kterou je potřeba na kompresi plynu do aeračních nádrží o 7,9 až 32 [kg O₂/kWh] pro jemnobublinnou aeraci. Co však bude nutné zohlednit v bilanci, je navíc energie potřebná na promíchávání vsádky aerační nádrže. Z dat v **Graf 4** je zřejmý značný rozdíl ve výtěžnosti s použitím čistého kyslíku a pouhého vzduchu. Pro velikosti bublin 2 mm je SOTE kyslíku až 5 x krát vyšší než u vzduchu. Se zvyšujícím se průměrem bublin se na 10 mm se dramaticky snižují hodnoty SOTE obou. [1]



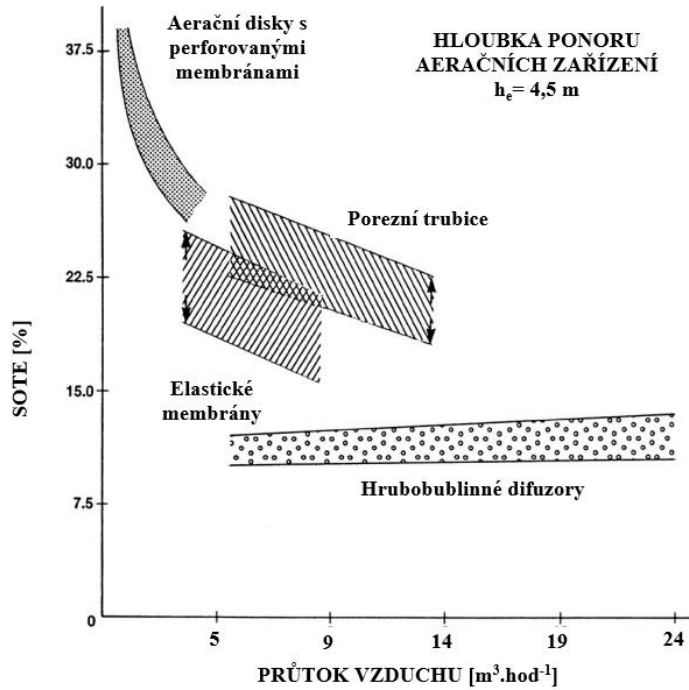
Graf 4 Srovnání výtěžnosti aerace při použití kyslíku a vzduchu v závislosti na průměru bublin [1]

7.5 Standardní účinnost přestupu kyslíku (SOTE)

Parametr SOTE resp. OTE⁸ poskytuje informaci o skutečném množství kyslíku, který se rozpustí v odpadní vodě v aktivačním tanku. Tento parametr popisuje funkci zvoleného aeračního systému. Je různý pro různé druhy zvolených aeračních elementů. Proto se navíc tato hodnota i v katalozích uvádí na 1 m hloubky ponoru instalovaného aeračního zařízení. Mueller et. al. uvádí SOTE parametry naměřené pro různá aerační zařízení v závislosti na množství vzduchu, které jím projde viz. **Graf 5**. Jak možné vidět, jsou to relativně nízké účinnosti s maximální účinností přestupu do 40 %. [7] Proto je dnes snaha vyvíjet nová zařízení, která by byla schopna dodávat a rozpustit co největší množství, a nebyla tak mařena energie potřebná na kompresi vzduchu vhnávaného do nádrže. Tady se právě nabízí možnosti nepoužívat vzduch, ale právě čistý kyslík. Tato hypotéza bude ověřována v praktické části práce bilancí jednotlivých variant zdrojů kyslíku pro aktivaci.

$$SOTE = \frac{SOTR}{\dot{m}_{vzd} c_{O_2}^m} [\%] \quad (5)$$

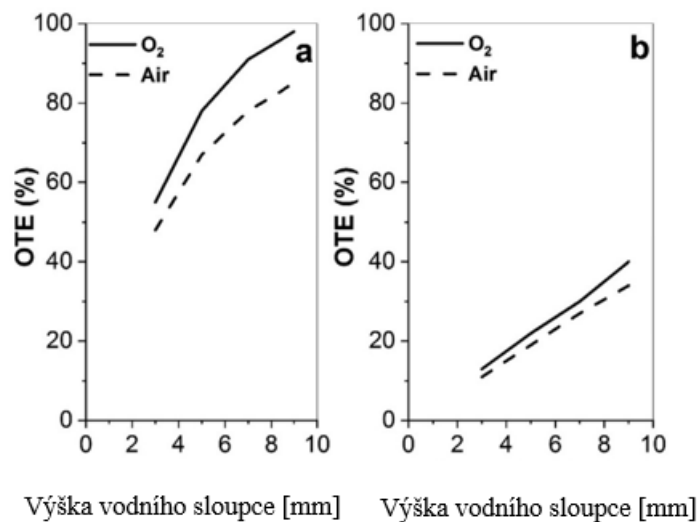
⁸ Zahraniční literatura často používá termíny SOTE, OTE, OTR, SOTR apod. Písmeno S na začátku parametru určuje, že se vztahuje na tzv. standartní podmínky. V Evropě jsou většinou standartní podmínky definovány jako p = 101,325kPa, T=20°C, relativní vlhkost vzduchu φ=0.



Graf 5 Porovnání SOTE pro různé aerační zařízení v jednotné hloubce převzata a upraveno [7]

7.5.1 OTE vzduch vs. kyslík

V **Graf 6** je možné pozorovat, že se zvyšující hloubkou aerační nádrže se zvyšuje OTE parametr. Pro nádrž hlubokou 8 m je možné dosáhnout 80 % OTE, v případě použití čistého kyslíku je možné dosáhnout až 90 % OTE. Pro větší průměry bublin je možné vidět, že vzduch i kyslík se chovají lineárně a OTE dosahuje velmi nízkých hodnot OTE (20 – 30 %). Oblast vyšších hodnot OTE je možné připsat efektu malých bublin, které se pro případ kyslíku smršťují a mají tak delší dobu zdržení v nádrži, kdežto vzduchové bubliny noapak zvětšují svůj objem. [1]



Graf 6 Srovnání OTE parametrů bublin kyslíku a vzduchu (a VLEVO $d_b=2\text{mm}$, b VPRAVO $d_b=6\text{mm}$) převzata [1]

8 Přenos hmoty na mezifázovém rozhraní

Přenos hmoty pro náš případ uskutečněný na mezifázovém rozhraní (plyn - kapalina) je podmíněn rovnováhou mezi těmito fázemi. Fázovou rovnováhu popisuje Henryho zákon.

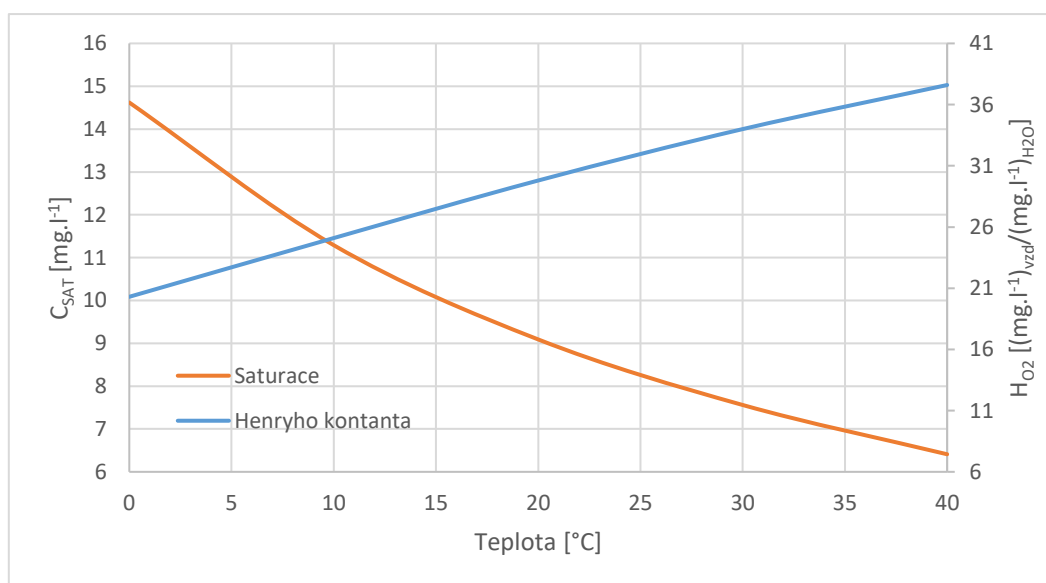
8.1 Henryho zákon

Z hlediska fázové rovnováhy můžeme na proces aktivace v aeračních nádržích nahlížet jako na rozpouštějící se plyn, který přechází z fáze plynné (g) do fáze kapalné (l). Tento fenomén popsal W. Henry, který vypořádal, že při konstantní teplotě je rozpustnost plynu přímo úměrná parciálnímu tlaku tohoto plynu nad kapalinou. Henryho zákon jako takový popisuje rozpustnost plynu v kapalině dle rovnice (6). [13]

$$p_i = H_i \cdot x_i \quad (6)$$

$$\frac{y_{O_2}}{x_{O_2}} = \frac{H_{O_2}}{p} \quad (7)$$

Kde p_i [Pa] je parciální tlak složky i v plynné fázi (g), která je v rovnováze s kapalnou fází (l), p [Pa] je celkový tlak soustavy x_i [-] je molová koncentrace složky i v kapalně fázi, a H_i [$\text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{Pa}^{-1}$] je Henryho konstanta⁹.



Graf 7 Závislost saturační koncentrace kyslíku ve vodě a Henryho konstanty na teplotě (hodnoty převzaty z [28])

Z hodnot Henryho konstanty v **grafu 7** můžeme vidět, že s rostoucí teplotou roste také hodnota Henryho konstanty, což znamená, že klesá rozpustnost kyslíku ve vodě. Při zvýšení hodnoty parciálního tlaku na straně kyslíku se tak zvýší také rozpustnost. Tento efekt je právě v případě

⁹ Jednotky Henryho konstanty mohou být v literatuře zavádějící lze je totiž uvádět inverzními hodnotami jako údaje o rozpustnosti.

použití čistého kyslíku důležitý, protože parciální tlak čistého kyslíku je 4,8 krát větší než kyslíku ve vzduchu viz. Rovnice (9).[7]

$$p_i = \frac{c_i}{\sum_i c_i} \cdot p = \frac{20,95\%}{100\%} \cdot 101,325 = 21,228 [kPa] \quad (8)$$

$$\frac{p_{O_2}}{p_{O_2 \text{ vzduch}}} = \frac{101,325}{21,228} = 4,773 [-] \quad (9)$$

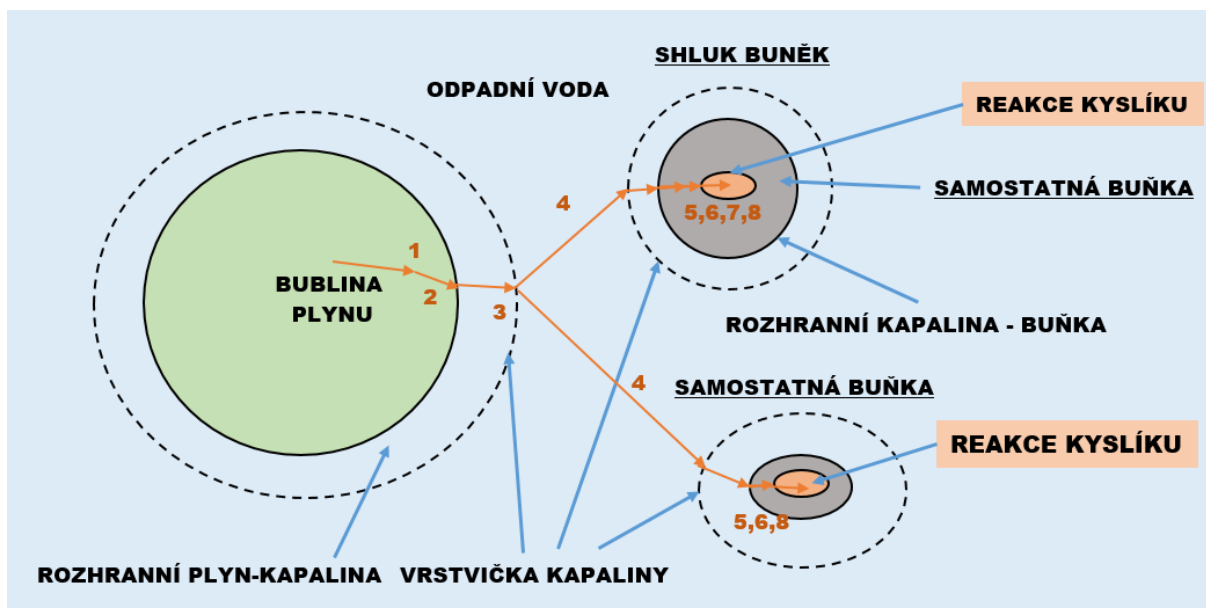
Důležitá je identifikovat oblast platnosti tohoto zákona.

1. Teplota systému musí být nad hodnotou jeho kritické teploty (pro případy pod kritickou teplotou je vhodně aplikovat Raoult Daltonův zákon) $T_s > T_K$
2. Nesmí docházet k chemické reakci mezi plynem a kapalinou
3. Koncentrace rozpuštěné složky x byla nízká. $x_i \downarrow$

8.2 Přenos hmoty z bubliny plynu do buňky

Při aeraci kyslíkem nebo vzduchem se přenáší hmota na dvou mezifázových rozhraních. Molekuly plynu při přestupu z bubliny do buněčné cytoplazmy musí překonávat sérii odporů. Tyto odpory jsou zobrazeny na diagramu (viz. **Obrázek 221**). Odpory lze popsat následovně. [11]

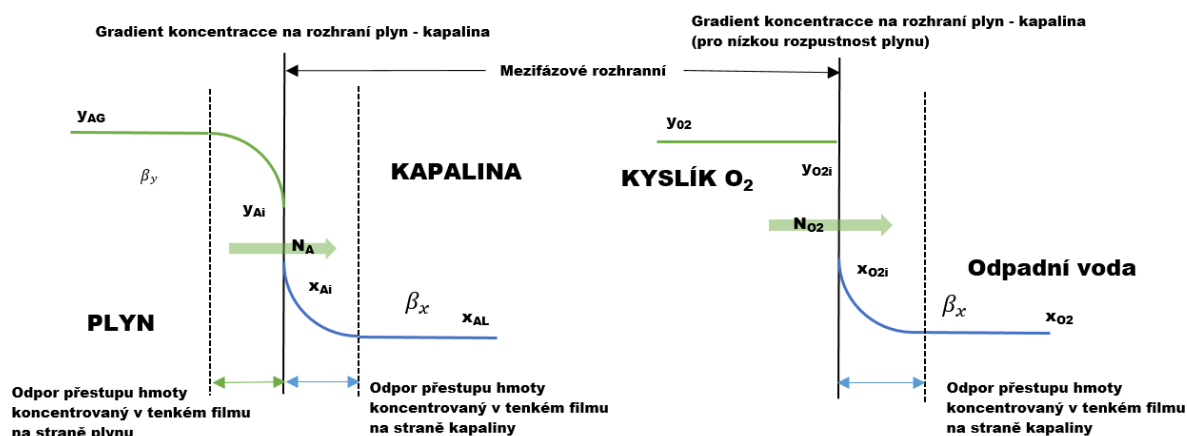
1. Přenos hmoty z vnitřku bubliny na rozhraní plyn-kapalina (relativně velmi rychlý).
2. Přenos hmoty přes rozhraní plyn – kapalina (většinou zanedbatelná hodnota).
3. Difuze hmoty přes film kapaliny obklopující bublinu plynu (tvoří majoritní odpor pro přestup kyslíku).
4. Transport přes kapalinu (tato hodnota bývá proměnlivá v závislosti na intenzitě míchání odpadní vody tanků. Pokud je odpadní voda zahuštěná a míchací aparáty nedostatečně nepromíchají vsádku v celém objemu, je i tento z hlediska přestupu kyslíku důležitým parametrem).
5. Difuze přes stagnantní film kapaliny obklopující buňky.
6. Přenos hmoty přes rozhraní kapalina – buňka.
7. Difuze přes vnitrobuněčnou hmotu.
8. Transport přes cytoplazmu do místa reakce s kyslíkem.



Obrázek 21 Model pro znázornění odporů přestupu kyslíku do vody (převzato a upraveno [11])

V tomto diagramu je důležité si uvědomit, že pro přestup kyslíku do shluku buněk (floků) se navíc vyskytuje odpor v podobě difúze přes buněčnou hmotu. Pro samostatnou buňku je tento odpor nepodstatný velmi malý a tudíž zanedbatelný. Je možné se setkat s proměnlivými velikostmi takovýchto odporů, jelikož reologické parametry odpadní vody, intenzita míchání, velikost bublin plynu, velikost shluku buněk, a parametry absorpce se na rozhraní mění s časem. Pokud je aerační nádrž dobře míchaná a buňky jsou v ní homogenně rozmístěny, bude hlavní odpor pro přenos kyslíku koncentrován ve filmu kapaliny, který obklopuje bublinu plynu (bod 3) [11]

8.2.1 Popis přenosu na rozhraní kapalina – plyn



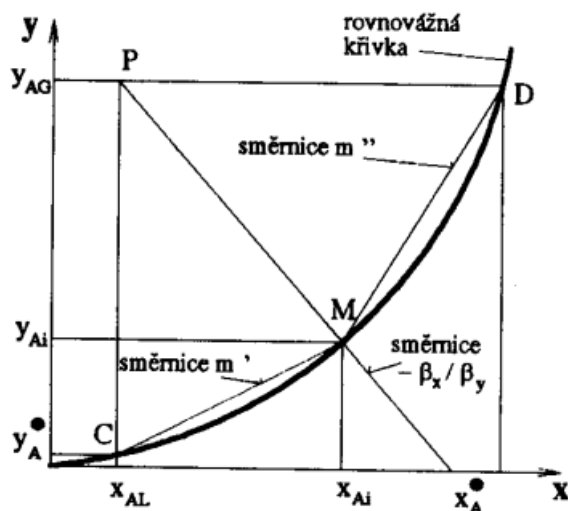
Obrázek 22 Přestup hmoty v mezifázovém rozhraní [13]

$$N_A = \beta_y(y_{AG} - y_{Ai}) = \beta_x(x_{Ai} - x_{AL}) \quad (10)$$

Koncentrace složky A (v našem případě kyslíku) a hlavním proudem kapaliny (pro řešený případ odpadní voda) je dána molárními podíly y_{AG} a x_{AL} viz. **Obrázek 22**. Pro přenos hmoty je nutné, aby koncentrace plynné a kapalné složky neodpovídaly hodnotám fázové rovnováhy. Rovnovážné koncentrace, které se ustaví na fázovém rozhraní, jsou označeny x_{Ai} a y_{Ai} . Hodnoty β_x, β_y jsou lokální hodnoty součinitele přenosu hmoty. Kvantifikaci toku hmoty při průchodu mezifázovým rozhraním popisuje rovnice (11). Úpravou této rovnice dostáváme poměr difuzního součinitele

$$\frac{(y_{AG} - y_{Ai})}{(x_{Ai} - x_{AL})} = - \frac{\beta_x}{\beta_y} \quad (11)$$

Kdybychom analogickou úlohu řešili pro přestup tepla, pouhý rozdíl teplot jako hnací síla by byl dostačující, což v případě přenosu hmoty nelze. Je třeba vzít do úvahy rovnováhu. Pro nás podstatná závislost $y_{Ai} = f(x_{Ai})$ určuje soustavě o daném tlaku a teplotě hodnoty y_A, x_A , které jsou odpovídající, tj. v daném případě v rovnováze, se známými koncentracemi x_{Ai}, y_{AG} .



Graf 8 rovnovážná křivka jako $y_A = f(x_A)$ mezi koncentracemi složek plynu a kapaliny x a y [13]

Tok hmoty fázovým rozhraním lze vyjádřit dle rovnice (12). [13]

$$N_A = k_x(x_A - x_{AL}) \quad (12)$$

kde k_x je součinitel prostupu hmoty na straně kapaliny. Při bližším pozorování grafického znázornění koncentračních diferencí lze odvodit vztah pro $x_A - x_{AL}$ dle rovnice (13)

$$x_A - x_{AL} = (x_A - x_{AL}) + (x_{Ai} - x_{AL}) = \frac{(y_{AG} - y_{Ai})}{m''} + (x_{Ai} - x_{AL}), \quad (13)$$

kde m'' představuje směrnici úsečky mezi body MD. Dosazením za rozdíly koncentrací jejich ekvivalenty vyjádřené z rovnic (11) a (12) získáme rovnici (14)

$$\frac{N_A}{k_x} = \frac{N_A}{m''\beta_y} + \frac{N_A}{\beta_x} \rightarrow N_A \rightarrow \frac{1}{k_x} = \frac{1}{m''\beta_y} + \frac{1}{\beta_x} \quad (14)$$

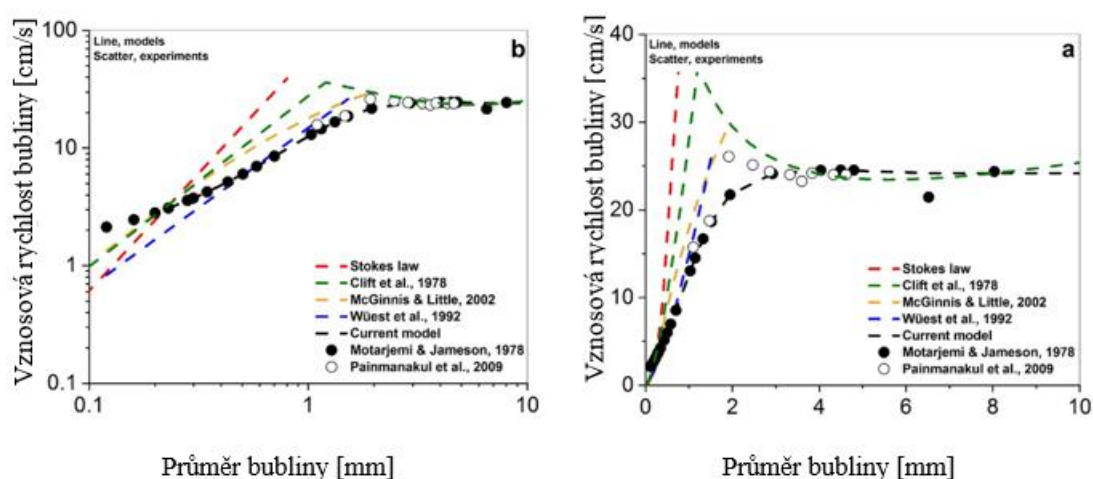
Z takto vyjádřené rovnice vyplývá, že celkový odpor prostupu hmoty vztažený na kapalnou fázi lze spočítat součtem odporů v plynné a kapalně fázi se zahrnutím rovnováhy na rozhraní. Pro řešený případ je však kyslík velmi málo rozpustný ve vodě, a proto je hodnota odporu na straně plynu velmi malá. Hodnotu prostupu hmoty lze tak zapsat ve formě rovnice (15). [13]

$$\frac{1}{k_x} = \frac{1}{m''\beta_y} + \frac{1}{\beta_x} \rightarrow k_x \doteq \beta_x \quad (15)$$

Pro intenzifikaci přestupu hmoty z plynu do kapaliny je třeba redukovat odpor koncentrovaný v tenké vrstvě filmu jak ze strany plynu, tak ze strany kapaliny. Pro řešený případ, kdy je rozpustnost kyslíku velmi malá v kapalně fázi, je důležité se soustředit na zvětšení součinitele β_x . Záměrem je dosáhnout co nejvyšší hustoty toku fázovým rozhraním, což lze docílit buď zvýšením hnací síly přenosu nebo zvýšením mezifázové plochy (velký specifický povrch) nebo zvýšením hodnoty součinitele prostupu hmoty.

8.3 Bublina vzduchu vs. bublina kyslíku

Závislost rychlosti vznosu bubliny v na jejím průměru zobrazuje Graf 9. Lze pozorovat, že pro bubliny do průměru 2 mm se vznosová rychlost značně zvyšuje. Pro bubliny průměru většího než 2 mm se vznosová rychlost udržuje takřka na konstantní hodnotě $25 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$. [1] Ze studií vychází pro bubliny o průměru $d_b \geq 2,5 \text{ mm}$ vznosová rychlost $u_b \cong 24,5 [\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}]$. V oblasti, kde je průměr bublin $d_b \leq 1 \text{ mm}$, je možné vznosovou rychlost definovat takřka lineární funkcí. [1]



Graf 9 Závislost rychlosti stoupajících bublin v závislosti na jejich průměru v rozmezí od 2 do 10 mm (Vlevo log log souřadnice Vpravo klasické souřadnice) převzato z [8]

Korelace pro výpočet rychlosti bubliny v závislosti na jejím průměru viz. **Graf 9**. Pro jemnobublinovou aeraci lze uvažovat bubliny do průměru $d_b = 2,5 \text{ mm}$. Celkově lze použít tři

korelace pro různé velikosti. [8] Pro průměry bublin kyslíku (viz. rovnice (16)) menší než 0,1 mm, pro oblast od 0,1 mm do 2,5 mm průměru je oblast dobře popsána (viz. rovnice (17)), a nakonec pro bubliny větší jak 2,5 mm je vznosová rychlost konstantní (viz. rovnice (18)). [1]

$$d_b \leq 0,1 \text{ mm} \quad u_b = \left(\frac{2}{36}\right) g \frac{(\rho_l - \rho_g)}{\mu} d_b^2 \quad (16)$$

$$0,1 < d_b < 2,5 \text{ mm} \quad u_b = 0,237d_b^3 - 3,7d_b^2 + 17,7d_b - 1,3 \quad (17)$$

$$2,5 < d_b < 10 \text{ mm} \quad u_b = 24,5 \text{ cm/s} \quad (18)$$

V oblasti bublin větších než 0,1 mm lze následující rovnice sjednotit odvozením korelace viz. rovnice (19), která vykazuje vyhovující shodu s parametrem $R^2=0,99$. Pro experimentální část byly zjištěny regresní hodnoty ve směsi kyslíku a vody s obsahem 288 CaCO₃ mg.l⁻¹. [1]

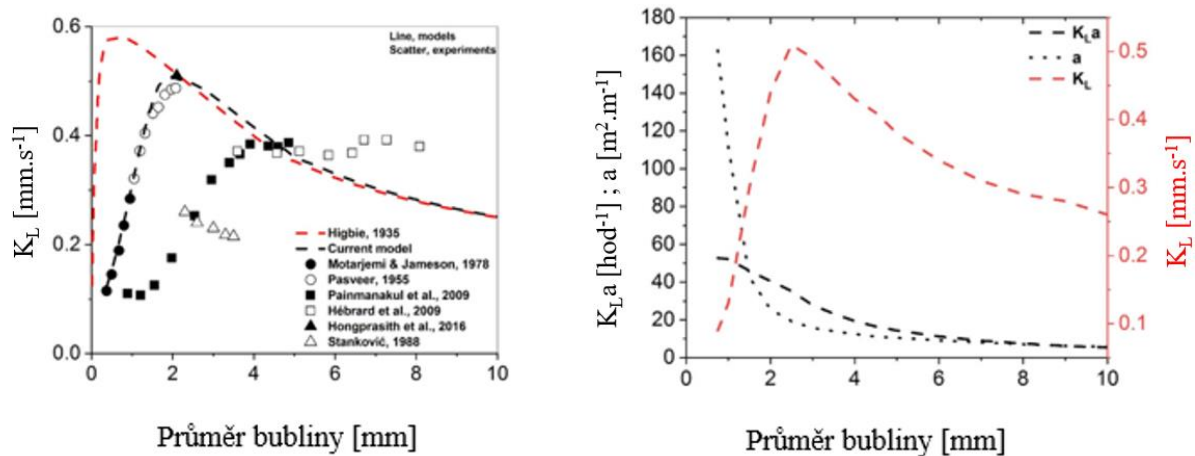
$$d_b > 0,1 \text{ mm} \quad u_b = 24,5 - \frac{27,5}{1 + \exp\left(\frac{d_b - 0,09}{0,05}\right)} \quad (19)$$

8.4 Součinitel přestupu hmoty

Pro identifikaci vlivu průměru bubliny kyslíku na kinetiku difúze je nutné určit součinitele přestupu hmoty na straně kyslíku pro jednotlivé velikosti bubliny. Z **Graf 10** (VLEVO) lze pozorovat, že s rostoucím průměrem bubliny stoupá také hodnota součinitele přenosu hmoty až do velikosti bubliny $d_b = 2$ mm, kde dosahuje tato hodnota svého maxima. V této oblasti si lze všimnout velké odchylky při srovnání s experimentálními daty jiných autorů. Prezentovanému modelu, který je charakterizován rovnicí (20), odpovídají data Motarjemi a Jamesona 1978, a Pasveera 1955. [1]

$$d_b < 2 \text{ [mm]} \quad K_L = C_0 \exp\left(\frac{-(d_b - 1,9)^2}{1,62}\right) \quad R^2 = 0,99 \quad (20)$$

Po dosažení maxima se hodnota K_L postupně zvyšuje v závislosti na zvyšující se hodnotě poloměru bubliny. V této oblasti s minimální odchylkou popisuje rovnice (21) (Higbie 1935) známou jako penetrační teorie.[1]



Graf 10 Porovnání experimentálních metod s modelovými pro stanovení průběhu součinitele přenosu hmoty (VLEVO) a objemového součinitele přenosu hmoty (VPRAVO) pro varianty se vzduchem a s čistým kyslíkem [1]

$$d_b > 2 [mm] \quad K_L = 2 \sqrt{\frac{D_{ab} u_b}{\pi d_b}}, \quad (21)$$

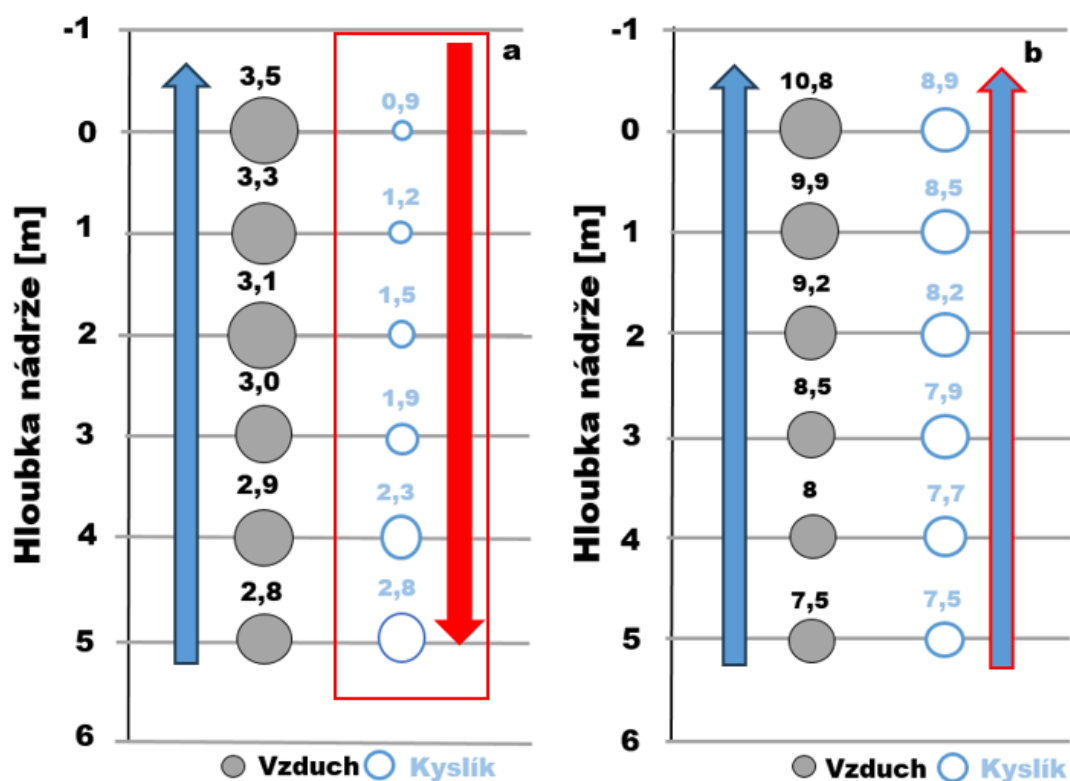
kde d_b je průměr bubliny [mm], D_{ab} je součinitel difúze [mm²s⁻¹], $C_0 = 4,8 [mm \cdot s^{-1}]$, u_b je rychlost vznosu bubliny [mm.s⁻¹], a K_L je celkový součinitel přestupu hmoty [mm.s⁻¹] na straně tekutiny, $K_L a$ je celkový objemový součinitel přestupu hmoty [hod⁻¹], ve které se experiment provádí. Pro tento účel byla použita kohoutková voda o obsahu 288 mg CaCO₃ v jednom litru H₂O. Pro **graf 10** (VPRAVO) byly pro zjednodušení modelu provedeny následující předpoklady: uvažovaná hloubka nádrže 5 m, specifický průtok média 2 [m³_{média}/m³_{tek}/hod], při hodnotě rozpuštěného kyslíku DO = 1 mg.l⁻¹. Po stanovení rovnic se v jednotlivých časových krocích dají stanovit hodnoty modelu, jako průměr bubliny, hloubka, ve které se daná bublina nachází, a z toho vyplývající hodnoty parciálního tlaku na straně kyslíku a zároveň specifický povrch bubliny kyslíku. [1]

Takovýto model potom dokáže podrobně popsat a kvantifikovat následující:

- Hodnoty součinitele přestupu hmoty K_L .
- Pokud máme předem stanovený průtok provzdušňovacího média, jsme schopni kvantifikovat střední dobu zdržení v nádrži s tekutinou.
- Specifický povrch $a = \frac{S}{V} [m^2 \cdot m^{-3}]$, pro S je použita hodnota aktivního povrchu bublin kyslíku a pro objem je použita hodnota průtoku provzdušňovacího média.
- $K_L a$ celkový objemový součinitel přestupu hmoty.
- Důležitý parametr jsou standardní hodnoty stupně přestupu kyslíku SOTR. Kde C_{SAT} je koncentrace nasycené vody kyslíkem použité v experimentu.

V **grafu 10** (VPRAVO) lze pozorovat, jak se vzrůstajícím poloměrem bubliny stoupá součinitel přestupu hmoty, dokud nedosáhne svého maxima, které se dle grafu pohybuje na hodnotě $d_{bmax} = 2,8$ mm. Pro hodnoty průměru bublin větších než 2,8 mm se hodnota součinitele přestupu

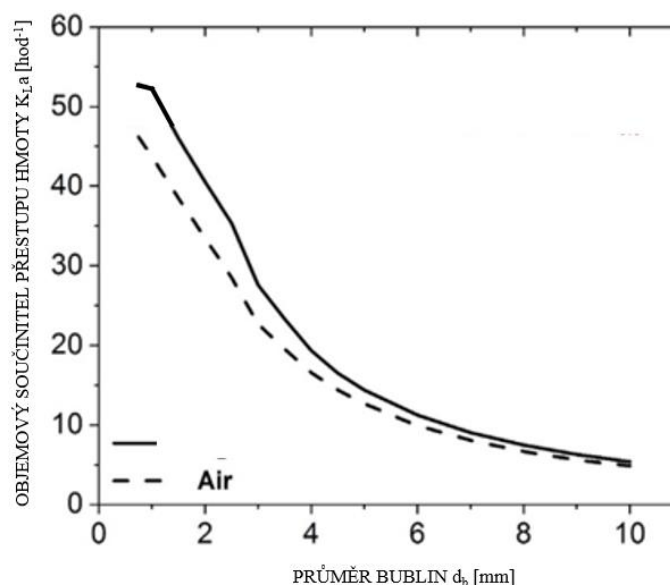
hmoty snižuje. Tento fenomén lze vysvětlit díky průběhu funkce specifického povrchu, která se chová exponenciálně. Tento průběh vysvětluje fakt, že malé bubliny poskytují velký specifický povrch a zároveň poskytují dostatečnou dobu zdržení v nádrži, kdežto jak se bubliny postupně od 2,8 mm zvětšují, začne se specifický povrch snižovat a také doba zdržení větších bublin se postupně zkracuje. [1]



Obrázek 23 Průběh vývoje bubliny v závislosti na různém počátečním průměru bubliny (VPRAVO $d_b=6$ mm , VLEVO $d_b=2$ mm) převzato [1]

Na **Obrázku 23** lze pozorovat zajímavý efekt způsobený hydrostatickým tlakem působícím na bublinu, kdy v případě vzduchové bubliny o velikosti 2 a 6 mm zvětšují po vypuštění v 5 m hloubky nádrže svoji velikost. Fenomén by se také dal vysvětlit jako koalescence, kdy se při střetu dvou bublin plynu v roztoku tyto bubliny sjednotí v jednu větší. Tento efekt je ovlivňován řadou jak chemických, tak fyzikálních vlastností kapaliny a plynu (např.: povrchové napětí, hydrostatický tlak, teplota soustavy ($1+g$), přítomnost solí atd.). V případě bublin kyslíku, se bubliny směrem k hladině zvětšují pouze v případě 6 mm bubliny, avšak v případě 2 mm bubliny je efekt směrem k hladině opačný. V tomto případě se také snižuje rychlost vznosu bubliny, jak se snižuje objem bubliny. Pro zvětšující se objemem bubliny se rychlost vznosu také zvyšuje. [1]

Pro určení účinnosti přenosu kyslíku aerace je vhodné mít představu o průběhu objemového součinitele přenosu hmoty na straně kyslíku. Na **Graf 11** lze vidět, že se srovnání průběhů k_{LA} pro vzduch a pro kyslík výrazně liší. Zejména v oblasti průměru bublin do 2,8 mm je patrný 20 % rozdíl většího k_{LA} kyslíku ve srovnání se vzduchem.



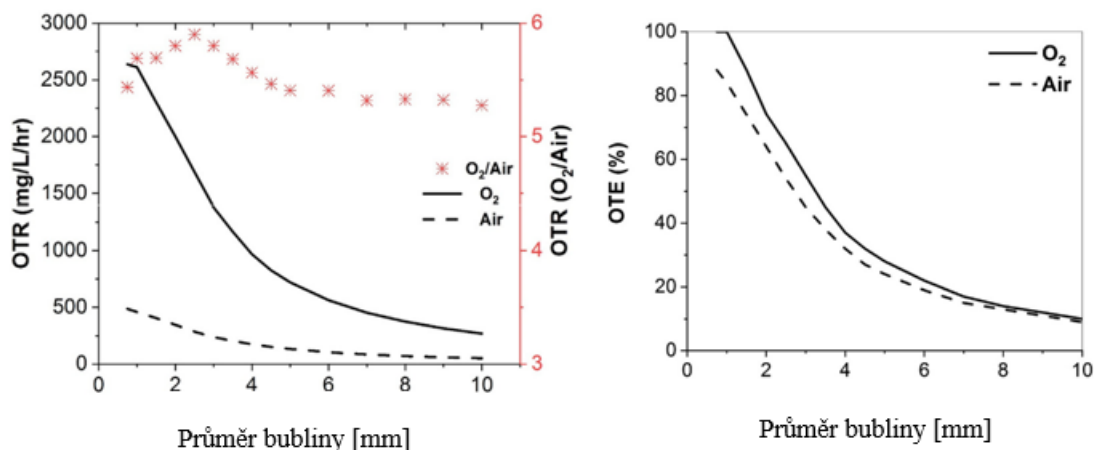
Graf 11 Vliv velikosti bublin na výsledné hodnoty objemového součinitele přestupu hmoty převzato [1]

V případě využití čistého kyslíku a za předpokladu konstantní hodnoty rozpuštěného kyslíku $1 \text{ mg O}_2 \cdot \text{l}^{-1}$ v kombinaci s 5 násobnou hnací silou lze na straně kyslíku pozorovat až 5 násobné hodnoty účinnosti přestupu kyslíku do vody OTR (Oxygen Transfer Rate). OTR jsou hodnoty vypočítané z dat modelu pro nestandardní podmínky, tj. tlak $p_s = 101,325 \text{ kPa}$ a teplota $T_s = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Pro průměry bublin větší jak 3 mm se však hodnoty OTR kyslíku a vzduchu postupně snižují a přibližují. Vzhledem k vysokým pořizovacím nákladům kyslíku je snahou dosáhnout maximální hodnoty součinitele přenosu hmoty a OTR.

Tabulka 4 Srovnání hodnot součinitelů přestupu kyslíku v závislosti na průtoku převzato [1]

| Hodnoty koeficientu přestupu kyslíku pro různé typy aerace a velikosti bublin | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|--------------------|-------------------|
| Relativní rychlost plynu $UG \times 10^3 \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1})$ | Přestupu kyslíku do kapaliny $k_{L,a} \times 10^{-3} \text{ [s}^{-1})$ | | |
| | Vzduch (velké bubliny) | PO (velké bubliny) | PO (malé bubliny) |
| 0,5 | 0,3 | 1 | 1,1 |
| 1 | 1,7 | 2,9 | 4,8 |
| 10 | 8,3 | 11,1 | 14 |

Pro bubliny kyslíku, které dosahají průměru 1 mm, lze dle **Graf 12** (VPRAVO) dosáhnout takřka 100 % OTE, kdežto pro vzduch pouze cca 80 %. Při dosažení 100 % se teoreticky veškerý kyslík rozpustí, a tedy je využit ještě předtím, než dosáhne hladiny. Pro dosažení takovýchto hodnot je ovšem potřebné, aby se v konvenčních čistírnách vod aerace posílila o míchadlo, které by napomohlo distribuci rozpuštěného kyslíku v celé hloubce nádrže. Při postupném zvyšování průměru bubliny lze do dosažení velikosti 2,8 mm dosáhnout až 20 % zvýšení OTE v porovnání se vzduchem. [1]



Graf 12 Průběh parametrů OTE a OTR v závislosti na průměru bublin převzato [8]

8.5 Vliv odpadní vody

Při návrhu ČOV je třeba zohlednit přítomnost nerozpuštěných a rozpuštěných organických látek v odpadních vodách. Typicky, jak uvádí Mueller et. al. [7], by se z odebraných vzorků odpadní vody experimentálně zjistily reálné hodnoty objemového součinitele $k_L a_{OV}$ a porovnal by se známými hodnotami v čisté vodě. Hodnota objemového součinitele přestupu hmoty z odpadních vod nabývá výrazně nižších hodnot než v čisté vodě. Aby bylo možné navrhovat reálné technologie, musí se tento nepoměr propsat do návrhových rovnic. Proto se zavádí koeficient zohledňující efekt odpadních vod definovaný v rovnici (22). V praxi hodnoty α nabývají hodnoty 0,7 - 0,9. [7]

$$\alpha = \frac{k_L a_{OV}}{k_L a_{H_2O}} \quad (22)$$

Analogický přístup lze aplikovat pro vliv odpadní vody na hodnoty saturace odpadní vody kyslíkem a to zavedením β faktoru viz rovnice (23). Pro danou teplotu jsou v čisté vodě hodnoty saturace kyslíkem známy. Hodnoty saturace v odpadních vodách lze zjistit z laboratorních vzorků např.: v probublávané koloně. [7]

$$\beta = \frac{C_{SAT_{OV}}}{C_{SAT_{H_2O}}} \quad (23)$$

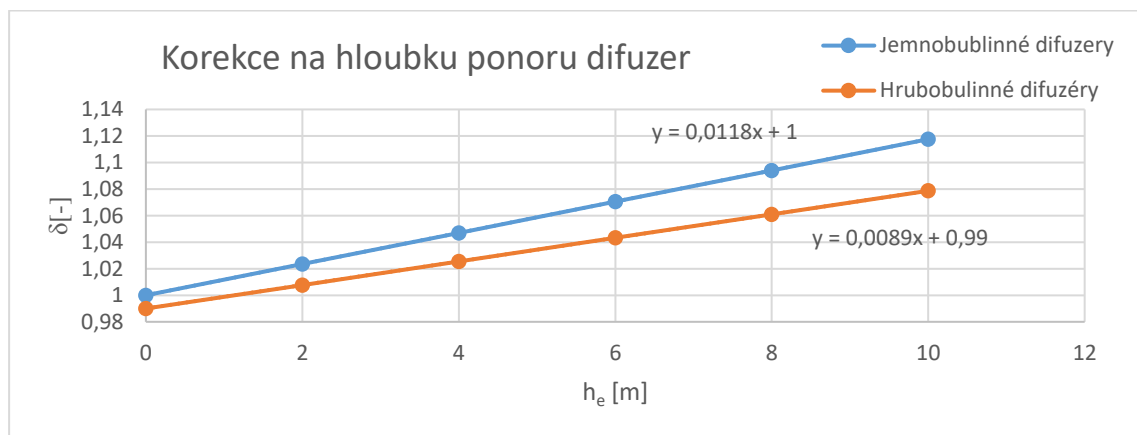
Pro komunální ČOV, kde koncentrace nerozpuštěných látek nepřekračuje hodnoty $NL < 1500 \text{ mg.l}^{-1}$, je doporučená hodnota β faktoru = 0,99. Z praktického hlediska je efekt β faktoru více významný pro farmaceutický průmysl, kde koncentrace nerozpuštěných látek výrazně překračují hodnoty $NL > 10\,000 \text{ mg.l}^{-1}$. Dle (ASCE, 2001) se počítá s hodnotami β faktoru = 0,94.

8.6 Vliv hloubky instalovaných difuzorů

Za standardních podmínek tj. 20 °C a tlaku 101,325 kPa se provede korekce na hloubku umístěných difuzorů. Se stoupající hloubkou umístěných difuzerů se hodnoty korekce zvyšují. Mueller et.al. [7] zkoumal vliv druhu použitých difuzerů. Pro hrubobublinné difuzéry je míra saturace kyslíkem ve vodě výrazně nižší v porovnání s hodnotami pro jemnobublinné aerační difuzéry. Z rovnice (24) uvedené v Mueller a kol. [7] lze pozorovat vliv rostoucí hloubky viz. **Graf 13**.

$$\delta = \frac{p_s + p_{h_e} - p''}{p_n - p''}, \quad (24)$$

kde $p_n = 101,325$ kPa, p_{h_e} je hydrostatický tlak v hloubce umístěného difuzeru a p'' je tlak sytých par.



Graf 13 Závislost hodnoty korekce na hloubku ponoru difuzoru pro jemno a hrubobublinné difuzory převzato [7]

Mueller a kol. [7] na základě naměřených hodnot uvádí pro jemnobublinnou aeraci následující lineární korekci na hloubku ponoru difuzery h_e dle rovnice (25).

$$\delta = 1 + 0,03858 \cdot h_e \quad (25)$$

Naopak pro hrubobublinnou aeraci uvádí lineární korekci na hloubku dle rovnice (26)[7].

$$\delta = 0,99 + 0,0089 \cdot h_e \quad (26)$$

8.7 Vliv nadmořské výšky

Dalším faktorem, který může ovlivnit saturaci kyslíkem, a se kterým je vhodné v některých případech počítat, je nadmořská výška, ve které se ČOV nachází. V podmínkách ČR tato korekce nemá tak výrazný účinek jako pro vysokohorské oblasti jinde ve světě. Metcalf a Eddy navrhuje korekci (převzato a upraveno dle [29]) na nadmořskou výšku dle rovnice (27):

$$\Omega = \frac{p_b}{p_n} = \frac{p_{b0} \cdot \left(1 - \frac{n \cdot m}{9100}\right)}{101,325} \quad (27)$$

V tomto případě hraje svou roli samotná velikost a hloubka aktivační nádrží, resp. výsledný hydrostatický tlak. Čím je nádrž hlubší, tím je efekt nadmořské výšky na výslednou hodnotu saturace kyslíkem nižší. [7] V případě stavby ČOV na vrcholu Sněžky, by hodnota saturace klesla na 75% obvyklé hodnoty, tj. z hodnoty saturace kyslíkem v podmínkách ČR 9,09 mg.l⁻¹ na 6,75 mg.l⁻¹.

8.8 Kinetika růstu organismů

Dále je experimentálně podloženo, že dávkování čistého kyslíku má pozitivní vliv na urychlení kinetiky některých biochemických procesů. Při použití vzduchu a čistého kyslíku jsou v případě denitrifikace vidět 8 % až 13,5 % zlepšení procesů pro 12 a 18 hodinové doby zdržení (HRT). Následné simulace potvrdily lepší výsledky denitrifikace, zvýšení hydrolýzní konstanty o 106 -184 %. Hydrolýzní reakce se podílí na rozkladu složitých organických nebo velkých molekul na menší a jednodušší celky. Hydrolýzní konstanta tak vypovídá o rychlosti hydrolýzních reakcí, které probíhají v odpadních vodách během procesu aktivace. Simulace dále zaznamenala velké zvýšení na straně Monodovy růstové konstanty o 190 až 324 %. Tato konstanta definuje a popisuje rychlost růstu mikroorganismů příj. koncentraci látek, které jejich růst brzdí.

Monodova konstanta (K_s) je důležitým parametrem, protože poskytuje indikaci toho, jak citlivý je mikrobiální růst na změny koncentrace substrátu. Nižší hodnota K_s naznačuje, že mikroorganismy jsou efektivnější při využívání nižších koncentrací substrátu. V běžné literatuře tato konstanta bývá součástí Monodovy rovnice (viz. rovnice (28)), kde K_s je Monodova konstanta známá jako saturační konstanta [g.m⁻³], μ_{max} je potom maximální rychlost růstu pozorovaných mikroorganismů [hod⁻¹] a c_{sub} je potom koncentrace substrátu, kterým se mikroorganismy živí. [11]

$$\mu = \mu_{max} \cdot \frac{c_{sub}}{K_s + c_{sub}} \quad (28)$$

Při provozu membránových bioreaktorů (MBR) v reálných podmínkách bylo pozorováno odstraňování BSK₅ a jeho kinetika. Účinnost odstranění organického znečištění při použití čistého kyslíku namísto vzduchu byla z původní hodnoty vzduchem provzdušňovaných nádrží 20 % zvýšena na hodnotu v průměru 47 % za podobných podmínek koncentrace kalu a teploty. Pokud jde o kinetické koeficienty, K_M se zvýšilo o 190,4 % při 12 hodinách a o 324,1 % při 18 hodinách, a k_d bylo výrazně sníženo. Tyto skutečnosti naznačují, že je kinetika ve studovaném systému při použití čistého kyslíku výrazně účinnější. [11] Podobné avšak ne tak výrazné výsledky zjistil i Rodriquez et.al. (2012), který pozoroval u membránových reaktorů zvýšení účinnosti zneškodnění sloučenin dusíku z původních 50 % na 67 %. Tedy zlepšení účinnosti zneškodnění znečištění dusíku až o 17 % [41]

9 Zdroje kyslíku pro aeraci

Kyslík je na Zemi přítomen v různých formách. Největší množství kyslíku je v litosféře, kde cca 50 % litosféry obsahuje kyslík, a to ve formě křemičitanů a jiných oxidů hornin. Technologicky je extrakce kyslíku z litosféry možná avšak ve srovnání s ostatními způsoby nákladově nesmyslná. Dalším dostupným zdrojem kyslíku je hydrosféra, která je z 86 % tvořena kyslíkem. Kyslík je vázán v molekulách H₂O a separaci molekul kyslíku lze uskutečnit elektrolýzou. Srovnatelné množství kyslíku jako v hydrosféře je také v atmosféře, cca 23,15 % hm.¹⁰. [43]

Technologie uvažované v této práci jako zdroj kyslíku pro aeraci aktivační nádrže jsou:

- PSA (Pressure Swing Adsorption).
- Dodávka kapalného kyslíku vyrobeného pomocí kryogenické separace vzduchu – pravidelná závážka kapalného kyslíku z průmyslové kryogenní separace vzduchu (ASU).
- Elektrolýza vody – využití kyslíku z výroby vodíků v rámci technologií Power-to-L/G.
- Membránové dělení vzduchu.

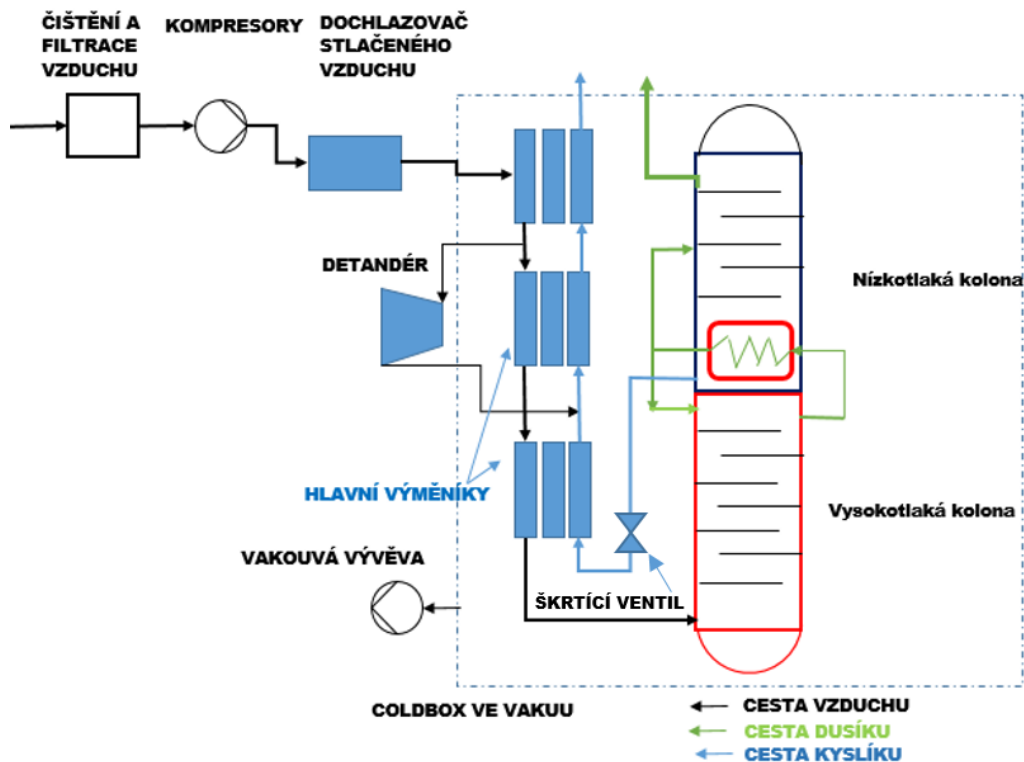
9.1 Kryogenická separace vzduchu

Kyslík se pro průmyslové aplikace získává zkapalňováním vzduchu a následnou kryogenní destilací. Největším odběratelem kyslíku jsou ocelářské závody, proto se většina ASU nachází v blízkosti ocelářských hutí. Německý inženýr Carl von Linde a anglický vědec Charles Hampson v roce 1895 nezávisle na sobě sestavili průmyslově aplikovatelný proces pro zkapalňování vzduchu známý jako Lindeho – Hampsonův oběh. Linde dále svůj výzkum posunul v roce 1902, kdy ze zkapalněného vzduchu separoval složku kapalného kyslíku pomocí rektifikační destilace. Lindeho oběh začíná na sání kompresorů, které stlačí vzduch na vysoké tlaky řádově 20 – 30 MPa. Dále se stlačený vzduch v dochlazovači ochladí. Vzduch poté vstupuje do hlavních výměníků, kde se zchladuje na nízkou teplotu a dále expanduje z vysokého tlaku při průchodu škrťacím ventilem, kde se v důsledku Joule Thompsonova efektu dále ochlazuje až na teplotu, kdy vzduch částečně kondenzuje. Po průchodu škrťacím ventilem se vzduch částečně zkapalní, nezkapalněný vzduch se vrací přes hlavní výměníky zpět na sání kompresorů. Z hlediska výtěžnosti zkapalňování je použití škrťacího ventilu výhodné pro vysoké tlaky a nízké teploty. Kapalný vzduch je dále čerpán do rektifikační kolony. Díky nižší teplotě varu se bude kyslík hromadit v ochuzovací části kolony. Naopak směs bohatá na dusík se bude agregovat v obohacovací části kolony. Roku 1910 byla do procesu kryogenické destilace vzduchu zařazena druhá kolona. Prakticky až dodnes jsou rektifikační kolony pro separaci vzduchu rozděleny do dvou, přičemž pracují při různých tlacích.

Jako první vstupuje zkapalněný vzduch do vysokotlaké kolony (5,6 bar) přičemž se směs obohacená na kyslík odebírá na spodku kolony a nastříkuje do středu nízkotlaké kolony (1,5 bar). Ochuzená směs dusíku z vrchní části kolony je vedena do vařáku nízkotlaké kolony, kde tak plní funkci topného media. Kapalný kyslík se potom jímá na spodku nízkotlaké kolony, a

¹⁰ Odpovídá atmosféra m_{O₂} = 1,19 · 10¹⁸ kg, z litosféry m_{O₂} = 5 · 10²¹ kg, z hydrosféry m_{O₂} = 1,19 · 10¹⁸ kg [43]

jak postupují páry obohacené na dusík na vrchní patra kolony a postupně zkvalňují až na vrchu nízkotlaké kolony.



Obrázek 24 Zjednodušené blokové schéma ASU jednotky

Postupem času se získávají ze vzduchu v ASU jednotkách viz. schéma na **Obrázek 24** další obsažené plyny, proto bývá jednotka opatřena o další systém kolon pro zkvalňování dalších produktů (Argon, Krypton, Xenon apod.) V souvislosti s ASU jednotkami je rovněž podstatné si uvědomit, že pro získání zkvalněných plynů musí jednotky pracovat při extrémně nízkých teplotách, a v důsledku toho jsou destilační kolony, posilovací (booster) kompresory a hlavní výměníky umístěny do coldboxu, který je vakuově oddělen od okolí, aby nedocházelo k velkým ztrátám tepla. Zároveň však pro účely dochlazování a zvýšení výkonnosti a snížení spotřeby energie jednotky jsou mezi jisté stupně výměníků zařazeny detandéry, které za pomoci expanze s konáním vnější práce odebírají ze soustavy teplo. Příklad konfigurace zapojení jednotlivých zařízení viz. **Obrázek 24**.

9.1.1 Energetická spotřeba vztažená na kapalný kyslík

Pro praktickou část energetické bilance a určení OPEX nákladů je potřeba znát energetickou náročnost této technologie. Bilancování samotné jednotky je ovšem komplexní úloha a vyžaduje podrobnější analýzu, která není předmětem této práce. Data pro stanovení spotřeby energií byla převzata z publikovaných dat. V **Tabulka 5** jsou uvedena vybraná katalogová data dodavatelů ASU jednotek, společností Cosmodyne Nikkiso a Air Liquide. Dále jsou uvedena benchmark data z reportu EIGA [15].

Z dat uvedených v **Tabulka 5** vyplývá, že se zvyšující se produkcí kapalného kyslíku obecně klesá měrná spotřeba energie. Velkokapacitní jednotky Air Liquide mají i více jak 50 % nižší energetickou spotřebu než malokapacitní jednotky společnost Cosmodyne. Dále také záleží na

formě produkovaného kyslíku (plyn, kapalina). Vzhledem k blíže nespecifikovaným detailům výpočtů katalogových dat byla pro účely této práce zvolena hodnota spotřeby specifické energie dle EIGA reportu [15] $\psi_m = 0,638 \text{ kWh} \cdot \text{kg}^{-1} \text{O}_2$.

Tabulka 5 Srovnání specifických spotřeb energie ASU (zdroj [15][18][19])

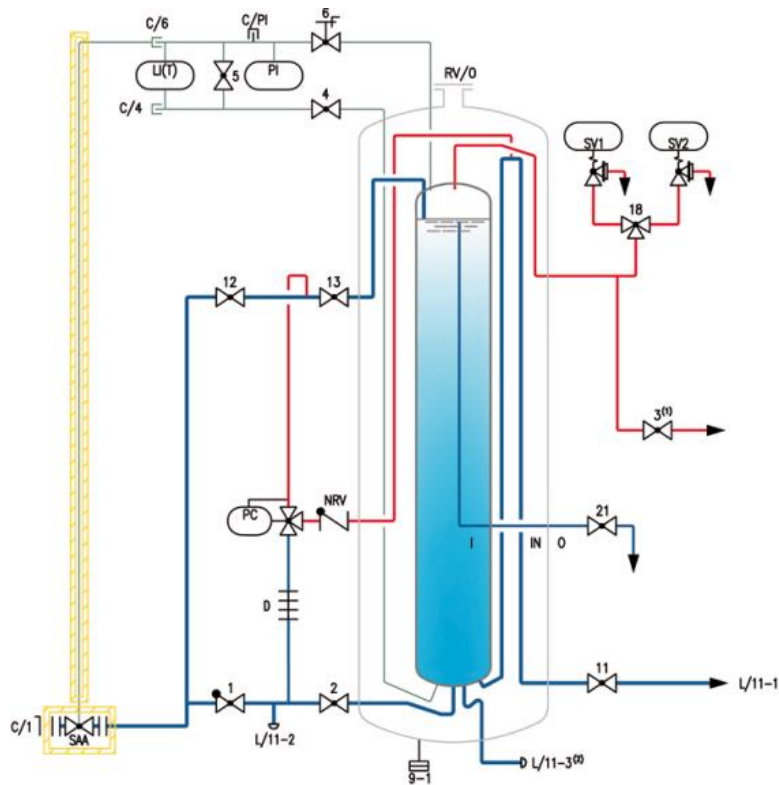
| Srovnávané ASU jednotky | Čistota kyslíku na výstupu % | Produkce kapalného kyslíku $m_{\text{LOX}} [\text{tun LOX} \cdot \text{den}^{-1}]$ | Specifická měrná spotřeba energie $\psi_m [\text{kWh} \cdot \text{kg}^{-1} \text{O}_2]$ |
|--------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| Air Liquids (Yango) | 99,5-99,6 | 330 - 770 | 0,4 - 0,6 |
| Cosmodyne Nikkiso (Poplar 2000 -14) | 99,5-99,6 | 62 - 158 | 0,82-0,77 |
| Cosmodyne Nikkiso (GFED 1 -3) | 99,6 | 4,1 - 6,5 | 1,7 - 1,9 |
| Cosmodyne Nikkiso (Spruce 200 - 500) | 99,6 | 6,7 - 19,6 | 1 - 0,79 |
| EIGA report LOX ^{1*} | - | - | 0,638 |
| EIGA report GOX ^{2*} | - | - | 0,4 |

Poznámka: ^{1*} Odpovídá spotřebě energií vztahné na kapalný kyslík. ^{2*} Odpovídá spotřebě energií vztahné na kapalný kyslík.

9.1.2 Dodávka kapalného kyslíku

Hlavními částmi systému dodávky kyslíku založeného na zavážce kapalného kyslíku z velkokapacitní ASU jednotky jsou skladovací nádrže na kapalný kyslík a odpařovač kyslíku.

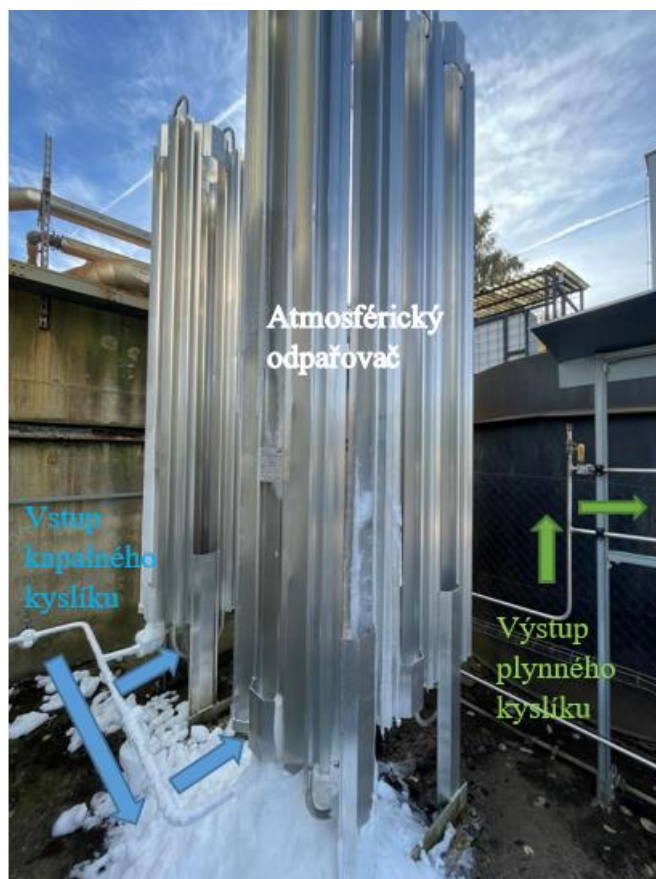
Nádrž pro skladování kapalného kyslíku je vakuově izolována (vakuum $p < 0,05 \text{ mBar}$). V mezi prostoru mezi pláštěm nádoby a nádrže je izolant (např.: expandovaný perlit). Plášť tanku je většinou vyroben z klasických uhlíkových ocelí, kdežto vnitřní nádoba by měla pro odolávání extrémně nízkých teplot vyrobena z austenitické oceli. U výrobců jsou k dispozici kapacity nádrží na zkapalněné plyny plněné většinou do 95 % pro tlak 18 bar a 90% pro tlak 36 bar celkového objemu nádrže viz. **Obrázek 25**. Zbylá procenta kapacity jsou určena pro plynnou fázi, která je v termodynamické rovnováze s kapalnou fází daného plynu.



Obrázek 25 Schéma nádrže pro zkapalněný kyslík převzato z [25]

9.1.3 Odpařovače

Nedílnou součástí sestavy je odpařovač. Úlohou odpařovače je kapalný kyslík přeměnit na plynný. Pro kapalný kyslík lze pomocí Antoineovy rovnice určit teplotu pro daný tlak sytých par v zásobníku. Dle NISTu [44] pro tlak $p_i=18$ Bar je potřeba udržet teplotu uvnitř tanku pod teplotou $-142,83$ °C. Z tanku proudí kapalný kyslík o teplotě $-142,83$ °C do odpařovače, kde s narůstající teplotou kapalný kyslík mění fázi na plyn, dokud se zcela neodpaří. Velikost odpařovače musí být dostatečná, aby došlo k totálnímu odpaření. V praxi se minimální velikost potřebná pro odpaření pro zajištění správné funkčnosti několikanásobně zvětší, neboť při provozu dochází k namrzání ledu na vnějším povrchu výměníku. Na **Obrázek 26** je možné pozorovat, že je potrubí opatřeno žebrováním pro intenzivnější a účinnější výměnu tepla s okolím. Pro tak extrémní teplotní rozdíly mezi teplotou kapalného kyslíku a okolní teplotou je potřeba volit kvalitní, odolný materiál, schopný dobře vést teplo např.: slitiny hliníku. Kyslík je navíc silné oxidační činidlo, a prostředí je silně korozivní, takže materiál musí být korozivzdorný.

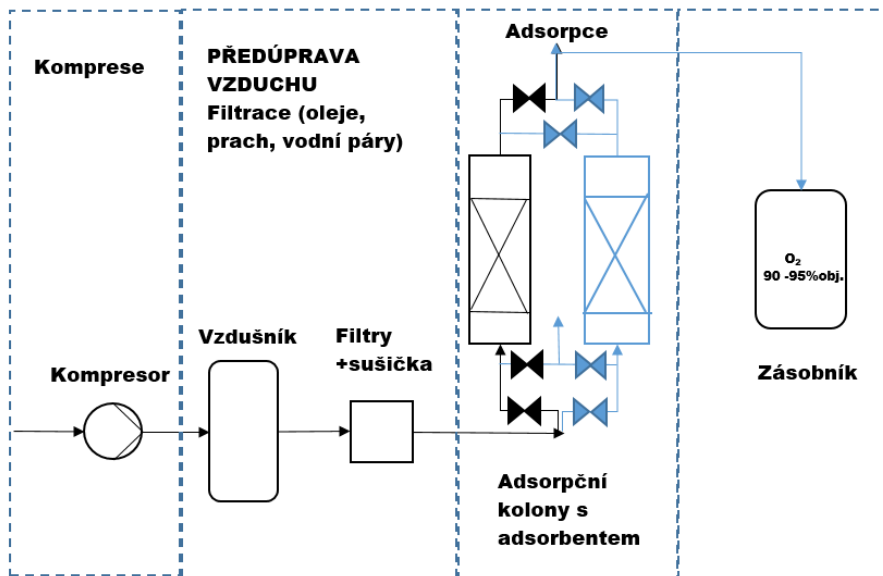


Obrázek 26 Atmosférický odpařovač Linde na ČOV Intersnacku v Choustníku

9.1 Adsorpční separace vzduchu

Dalším procesem pro výrobu kyslíku v průmyslu je technologie využívající procesu adsorpce. Tyto procesy mají dvě kolony naplněné adsorbentem. V praxi se pro kýžený produkt používají různé adsorbenty pro docílení požadovaného stupně selektivity.

Princip metody Pressure Swing Adsorption (viz. **Obrázek 27**) spočívá v nasávání média do kompresoru. Stlačené medium se skladuje ve vzdušníku, odkud prochází postupně filtry na záchyt prachových částic, olejovými filtry, a nakonec sušičkou na odstranění vody ve formě vodních par ve vzduchu. Médium vstupuje do jednoho z adsorbérů, kde se nežádoucí složka adsorbuje do adsorbentu (v našem případě dusík N_2 na zeolitových sítích), přičemž obohacená složka postupuje dále do zásobníku (v našem případě kyslíkem obohacená směs). Dochází k regeneraci adsorpčního nasyceného lože odtlakováním použitého adsorbéru a výfukem nežádoucích plynů (pro nás dusík). Ve stejném okamžiku se ventily otevřou tak, aby adsorpce probíhala v druhé nádrži. Periodickým střídáním těchto cyklů se plní zásobník kýženým médiem, se kterým lze dále manipulovat dle potřeby. V průběhu technologického vývoje se objevily jiné způsoby adsorpce. Proto se můžeme setkat s pojmy VPSA (Vacuum Pressure Swing Adsorption), TSA (Temperature Swing Adsorption). VPSA při adsorpce využívá přetlaku a při desorpci potom podtlaku za pomoci vakuové vývěvy. Naopak TSA k adsorpci nevyužívá rozdíl tlaku, ale teploty. Aplikace TSA je spíše vhodná pro záchyt CO_2 (CCS technologie).



Obrázek 27 Blokové schéma PSA jednotky

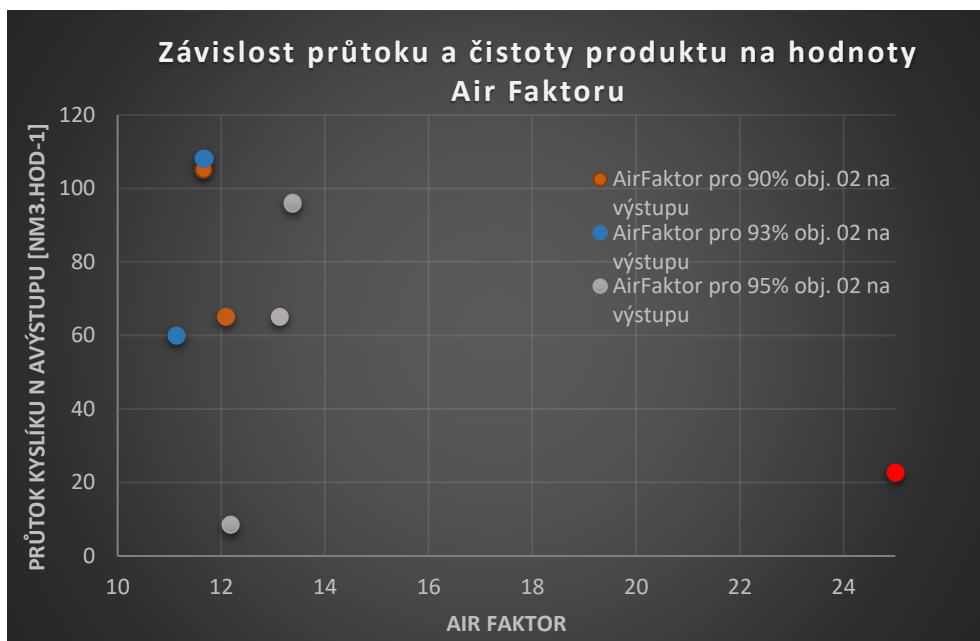
Z hlediska procesních parametrů jsou pro PSA jednotky determinující koncentrace kyslíku na výstupu, účinnost separace kyslíku, a tzv. *Air Factor* (af). Koncentrace kyslíku je dána molární koncentrací ve výstupním proudu $n_{O_2,out}$. Účinnost separace kyslíku popisuje veličina *Recovery*, která vyjadřuje podíl molárního toku kyslíku na výstupu $n_{O_2,out} [kmol/s]$ a molárního toku kyslíku ve vstupujícím proudu vzduchu $n_{O_2,in} [kmol/s]$ dle rovnice (29):

$$Recovery = \frac{n_{O_2,out}}{n_{O_2,in}} \quad (29)$$

Dalším významným parametrem je tzv. *Air Factor*, který vyjadřuje poměr objemového průtoku vzduchu a objemového průtoku produktu – kyslíku viz. rovnice (28).

$$af = \frac{c_{O_2,out}}{c_{O_2,in}} \frac{1}{Recovery} = \frac{V_{in}^n}{V_{O_2,out}^n} \quad (30)$$

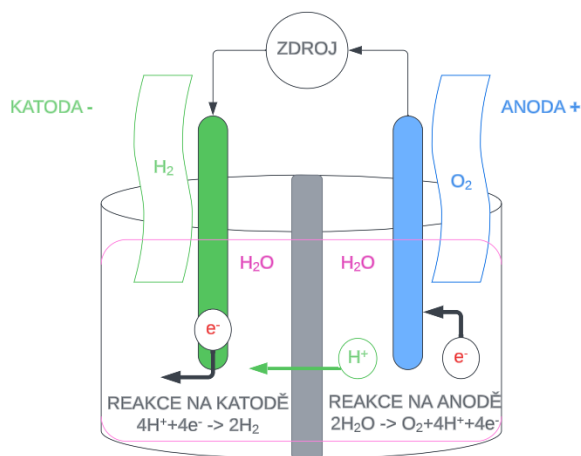
Hodnota Air faktoru je u každého výrobce jiná. V **Graf 14** jsou uvedeny hodnoty Air Faktoru vypočtené na základě katalogových hodnot 4 společností (Atlas Copco, Sümer, AirSep, Sysadvantage) pro různé hodnoty koncentrací kyslíku na výstupu.



Graf 14 Air faktor hodnoty v závislosti na průtoku vstupního vzduchu a čistoty produkt

9.1 Elektrolýza vody

Jedním z dalších způsobů, jak získat kyslík, je elektrolýza vody. Tento fyzikálně chemický proces je schopen při průchodu proudu dělit molekuly vody na molekuly vodíku a kyslíku. V roce 1888 byla vyvinuta ruským vědcem Dmitrim Lachinovem technologie elektrolýzy pro průmyslovou výrobu vodíku a kyslíku. Další výzkum v oboru elektrolýzy nastal až v 60. letech, kdy společnost GE vyvíjela ve spolupráci s vesmírnými programy PEM elektrolýzu. [21] Dnes se opět trend elektrolýzérů vrací jako potenciální zdroj pro výrobu vodíku jako paliva.



Obrázek 28 Schéma procesu elektrolýzy vody

Obrázek 28 schematicky znázorňuje typickou sestavu elektrolýzy vody, kdy vodík vzniká na katodě a kyslík na anodě. Konverze nebude ideální a také dochází k únosu vody, takže produkty obsahují stopy vodní páry, které je nutno zachytávat. Know-how společností, zabývajících se výrobou elektrolýzérů, spočívá ve volbě materiálu elektrod, či samotného elektrolytu a jejich vzájemném uspořádání. Dnes se v praxi uplatňuje mnoho typů elektrolýzérů s různými

technickými specifikacemi, které jsou shrnuty viz. **Tabulka 6**. Pro účely této práce byl zvolen nízkoteplotní PEM elektrolýzér. Často používaným materiálem elektrod bývá nikl. Důležitým komponentem je polymerní přepážka oddělující komory katod a anody propustné pouze pro hydroxidové ionty a molekuly vody (např.: Zifron membrány). [21] Výhodou těchto elektrolýzérů je vyspělost technologie, nižší pracovní teploty (60 – 120 °C), relativně vysoká účinnost (až 62 %), kratší náběh na provozní podmínky. V kontextu účinnosti elektrolýzérů je vhodné poznamenat, proč má tato technologie relativně velký potenciál v budoucnu jako zdroj paliv. Na rozdíl od konvenčních metod využití fosilních paliv (spalování zemního plynu, nafty, benzínu apod.), kde motory přeměňují energii tepelnou v energii mechanickou, a účinnost je limitována ideálním Carnotovým cyklem, elektrolýzér naopak využívá elektrickou energii pro získání chemické energie. Elektrolýzér netvoří při této transformaci energie škodlivé emise (např.: CO₂) na rozdíl od konvenčních metod. Je vhodné dodat, že elektrolýza spotřebovává úměrně vyšší množství elektrické energie, které se dnes stále s více jak 60 %¹¹ produkuje z fosilních paliv.

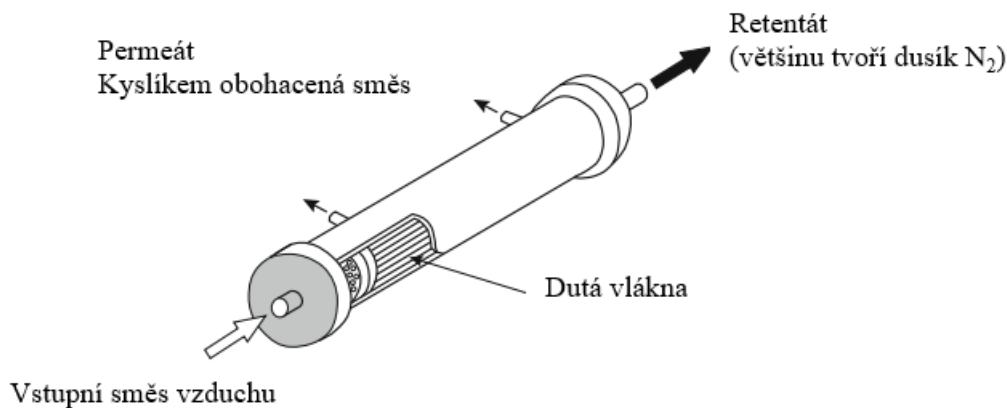
Tabulka 6 Přehled elektrolýzérů s provozními parametry [21]

| Palivový článek | AFC | PEMFC | PEM | DMFC | PAFC | MCFC | SOFC |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Jmenovité výkony [kW] | 1 - 100 | >100 | < 1 - 1000 | - | 5 - 400 | 300 - 3000 | 1-3000 |
| Pracovní tlaky [MPa] | 0,1 - 3 | < 7 | < 3,5 | <0,035 | 0,1 | <0,7 | 0,1 |
| Palivo | H ₂ | H ₂ , Bioplyn | H ₂ | CH ₃ OH | Bioplyn, Zemní Plyn | Zemní plyn, Bioplyn | Zemní plyn, Bioplyn |
| Elektrolyt | Roztok KOH | Polymer ní membrán a (materiál Nafion z PFSA s) | Polymerní membrána (materiál Nafion z PFSA s) | Polymer ní membrán a (materiál Nafion z PFSA s) | Kyselina Fosforečná H ₃ PO ₄ , typicky naimpregnována v nosném matriálu (Teflon) | Uhličitanová tavenina (např.: Li ₂ CO ₃ , K ₂ CO ₃) | Oxidy zirkonu (ZrO ₂) a yttria (Y ₂ O ₃), (keramický materiál YSZ) |
| Pracovní teploty [°C] | 60 - 120 | 60 - 120 | 80-120 | 90 - 120 | 160 - 220 | 600 - 650 | 800 - 1000 |
| Dělení dle teploty | Nízkoteplotní (Lepší startovací podmínky v porovnání s vysokoteplotními ale nižší η, a velké požadavky na kvalitu vstupujícího plynu) | | | | Středněteplotní | | Vysokoteplotní (Delší náběh, vyšší η, a nižší požadavky na kvalitu vstupujícího plynu) |
| Elektrická účinnost [%] | 62 | 38 - 42 | 40 - 60 | 20 - 30 | 38 - 40 | 50 - 55 | 55 - 65 |
| Použití | Letadla, lodě, armáda | Mobilní, stolní | Stolní notebooky, Kontejnerové velkokapacitní jednotky | Výzkum | Stacionární generátory | Stacionární generátory v elektrárnách | Generátory v elektrárnách |

¹¹ Podle nezávislého statistického institutu pro energetiku EIA.

9.2 Membránové procesy

Pro separaci kyslíku ze vzduchu lze použít porézní membránu a dostatečně velký gradient tlaku, který umožní kyslíku procházet membránou. Porézní membrána může být ve formě plátů v kazetovém pouzdře, spirálovitě svinutých pásů nebo ve formě dutého vlákna s průměrem 0,2 až 2 mm. [12] Membrány bývají uzavřené do modulů viz. **Obrázek 29**. V praxi se membránovými procesy dosahuje čistoty 35 – 45 % v permeátu. Pro účely zvýšené oxygenace je potřeba, aby čistota kyslíku byla alespoň 90 %. V souvislosti s vývojem stále novějších technologií a materiálů membrán je do budoucna zajímavé použít technologií membrán pro čištění na požadovanou čistotu kyslíku. Možná aplikace membránových procesů v souvislosti s aerací by byla v kombinaci s PSA jednotkou, která by byla schopna dočistit permeát na požadovanou kvalitu. V souvislosti s vývojem nových membrán možná v budoucnu bude možné použití membrán pro zvýšenou oxygenaci.



Obrázek 29 Typický membránový modul převzato a upraveno [12]

10 Koncepce a návrh řešení

Cílem práce je posoudit různé možné zdroje kyslíku pro aerobní čištění odpadní vody pomocí klasické aktivace. Na základě rešerše byly analyzovány čtyři možné zdroje kyslíku:

1. Aerace pomocí vzduchu.
2. Aerace pomocí 95 % kyslíku z PSA jednotky.
3. Aerace pomocí kyslíku zaváženého z ASU jednotky.
4. Aerace pomocí kyslíku získaného při elektrolytické výrobě vodíku.

První varianta představuje klasické uspořádání aktivace s pneumatickou aerací vzduchem. V této variantě je navíc sada dvou vrtulových ponorných míchadel.

Druhá varianta využívá jako zdroj kyslíku pro aktivaci PSA jednotku vyrábějící kyslík o čistotě 95 %.

Třetí varianta uvažuje pravidelně dováženou dávku kapalného kyslíku skladovaného v kryogenním tanku, ze kterého je řídicí jednotkou dávkován kyslík do aktivací nádrže.

Poslední, čtvrtá varianta využívá jako zdroj kyslíku pro aktivaci kyslík vznikající při výrobě vodíku v elektrolyzní jednotce. Záměrem je tak využít kyslík, který je jinak vypouštěn bez užitku do atmosféry. Takto využitý kyslík by mohl kompenzovat náklady na výrobu vodíku a pomoci snížit jeho cenu.

11 Spotřeba kyslíku v klasické aktivaci

Pro analýzu všech variant je nejprve nutné stanovit množství vzduchu, resp. kyslíku pro danou velikost ČOV a předpokládané specifické znečištění. Velikost čistírny odpadních vod je definována pomocí tzv. počtu ekvivalentních obyvatel. Bilance byla provedena pro ČOV o rozdílné velikosti a to 2 000, 5 000, a 10 000 ekvivalentních obyvatel (EO), což odpovídá velikostí čističce pro malé obce až středně velká města.

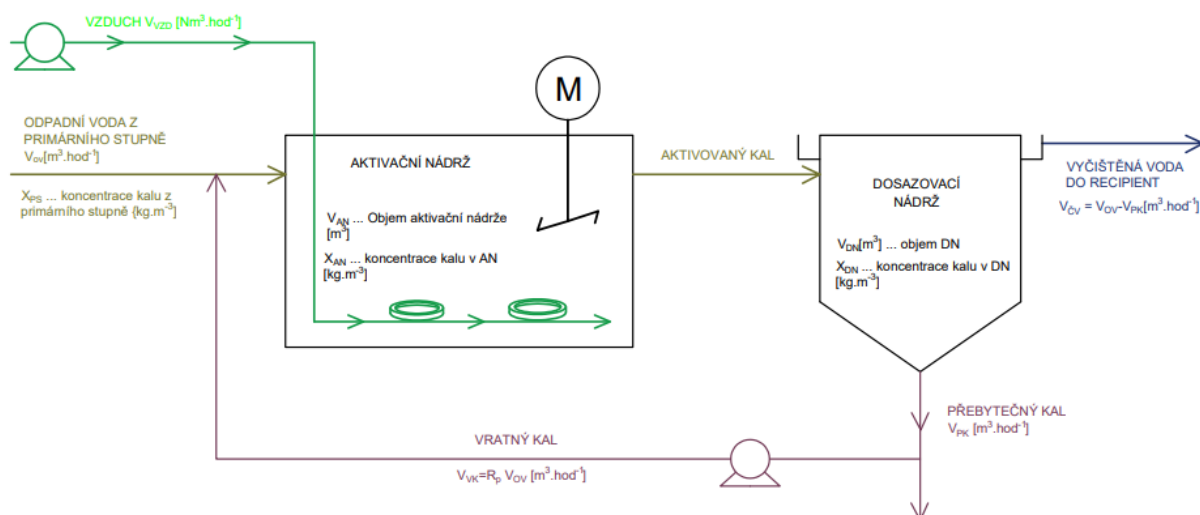
Hodnoty přípustného znečištění jednoho EO jsou normovány [5] a jsou uvedeny v **Tabulce 7**. BSK a CHSK jsou měřítka organického znečištění. CHSK je zkratkou pro „chemická spotřeba kyslíku“. Jeho hodnota udává množství kyslíku v mg potřebného na chemické zoxidování organických látek přítomných v jednom litru odpadních vod. Pro účely chemické oxidace organického znečištění se v praxi používají tato chemická oxidační činidla dichroman draselný ($K_2Cr_2O_7$) nebo manganistan draselný ($KMnO_4$). [5] Naproti tomu BSK je tzv. biochemická spotřeba kyslíku. Tato hodnota udává množství kyslíku potřebného k biochemické oxidaci organického znečištění v odpadní vodě.

Tabulka 7 Normované hodnoty na jeden ekvivalent obyvatele převzato [9]

| LÁTKY | | Minerální g/den | Organické g/den | BSK ₅ g/den | CHSK ₅ g/den | Σ g/den |
|-----------------|--------------|--------------------|--------------------|---------------------------|----------------------------|------------|
| NEROZPUSTITELNÉ | USADITELNÉ | 10 | 30 | 20 | 40 | 40 |
| | NEUSADITELNÉ | 5 | 10 | 10 | 20 | 20 |
| ROZPUSTITELNÉ | | 75 | 50 | 30 | 60 | 60 |
| NEROZPUSTITELNÉ | | 90 | 90 | 60 | 120 | 120 |

Dále je při výpočtu předpokládáno specifické množství odpadní vody $q_{dp} = 150 \text{ l.den}^{-1}$ odpadních vod (OV) na osobu, součinitel denní nerovnoměrnosti $k_d = 1,12$ a součinitel maximální nerovnoměrnosti $k_h = 1,9$. Hodnoty těchto součinitelů byly převzaty z české normy ČSN 75 6401 pro čistírny s EO větší než 500 [5].

Při určení spotřeby kyslíku, resp. vzduchu se uvažuje pouze odstranění organického znečištění, neuvažuje se odstranění sloučenin dusíku a fosforu. Schéma biologické části bilancované ČOV s klasickou aktivací je prezentováno na **Obrázek 30**. Přítok odpadní vody V_{OV} je míchán s částí vratného aktivačního kalu V_{VK} , tyto dva proudy vstupují do aktivační nádrže.



Obrázek 30 Schéma bilancované ČOV

Bilance aktivace byla provedena pro následující parametry:

- Množství BSK₅ v NL pro středně zatěžovaný stupeň = 0,2 mg.l⁻¹
- Průměrná teplota odpadních vod $T_{prům} = 13^{\circ}\text{C}$, ($T_{max} = 18^{\circ}\text{C}$, $T_{min} = 8^{\circ}\text{C}$)
- Objemové zatížení v AN = 0,25 kg BSK₅.m⁻³.den⁻¹.
- Specifická produkce dusíku na obyvatele 11 g.EO⁻¹.den⁻¹
- Koncentrace sušiny aktivovaného kalu $X = 3 \text{ kg.m}^{-3}$
- Látkové zatížení kalu $B_X = 0,08 \text{ kg.kg}^{-1}_{DMS} \cdot \text{den}^{-1}$
- Objemové látkové zatížení kalu $B_V = 0,25 \text{ kg BSK}_5 \cdot \text{m}^{-3}_{AN} \cdot \text{den}^{-1}$ ¹²
- Teoretický koeficient produkce biomasy $Y = 0,7 \text{ kg}$
- Rychlostní konstanta rozkladu $k_b = 0,03 \text{ den}^{-1}$
- Koeficient využití kyslíku pro jemnobublinné aerační elementy $\alpha = 0,85$
- Koeficient endogenní respirace $k_{re} = 0,2 \text{ kg O}_2 \cdot \text{den}^{-1}$
- Koncentrace rozpuštěného kyslíku ve vodě při teplotě 18°C $C_{s20} = 11,3 \text{ mg.l}^{-1}$
- Saturační koncentrace kyslíku při teplotě 13°C $C_{s13} = 10,59 \text{ mg.l}^{-1}$
- Provozní uvažovaná koncentrace kyslíku v intervalu <1;2> ; zvoleno $c_u = 1,5 \text{ mg.l}^{-1}$
- Hloubka aktivační nádrže $h_{AN} = 6 \text{ m}$,
- Hloubka umístění aeračních elementů $H_{ae} = 5,98 \text{ m}$
- Recirkulační poměr $R_p = 41,18\%$
- Procentuální využití kyslíku ze vzduchu $\chi = 30\%$ (dle výrobce 5% na m hloubky instalovaného aeračního elementu)

Návrh dosazovacích nádrží byl proveden pro tyto parametry:

- koncentrace kalu v dosazovací nádrži $X_{DN} = 5 \text{ kg.m}^{-3}_{DN}$
- hydraulické zatížení hladiny dosazovací nádrže $v = 1,05 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hod}^{-1}$
- zatížení hladiny nerozpuštěnými látkami $N_L = 6 \text{ kg.m}^{-2} \cdot \text{hod}^{-1}$
- kalový index $KI = 100 \text{ mg.l}^{-1}$

Výpočtové vztahy

¹² Pro středně zatíženou aktivaci B_V 0,2 - 0,5 kg.

Průměrný denní průtok (obyvatelstvo) [26]:

$$\dot{V}_{24}^o = EO \cdot q = [l \cdot den^{-1}] \quad (31)$$

Maximální denní průtok (obyvatelstvo):

$$\dot{V}_d^o = \dot{V}_{24}^o \cdot k_d = \dot{V}_{24}^o \cdot 1,35 = [l \cdot den^{-1}] \quad (32)$$

Přítok balastních vod:

$$\dot{V}_B = \%_B \cdot \dot{V}_{24}^o = [l \cdot den^{-1}] \quad (33)$$

Průměrný bezdeštný denní přítok:

$$\dot{V}_{24} = \dot{V}_{24}^o + \dot{V}_B = [l \cdot den^{-1}] \quad (34)$$

Maximální bezdeštný přítok:

$$\dot{V}_D = \dot{V}_d^o + \dot{V}_B = [l \cdot den^{-1}] \quad (35)$$

Celkové zatížení BSK₅:

Specifické zatížení $S_{BSK_5} = 60 \text{ g.EO}^{-1} \cdot \text{den}^{-1}$

$$BSK_5 = S_{BSK_5} \cdot EO = 0,060 \cdot EO = \text{kg.EO}^{-1} \cdot \text{den}^{-1} \quad (36)$$

Celkové zatížení CHSK:

Specifické zatížení dusíkem $S_{CHSK} = 120 \text{ g.EO}^{-1} \cdot \text{den}^{-1}$

$$CHSK = S_{CHSK} \cdot EO = 0,120 \cdot EO = \text{kg.EO}^{-1} \cdot \text{den}^{-1} \quad (37)$$

Celkové zatížení dusíkem:

Specifické zatížení dusíkem $S_{NOX} = 11 \text{ g.EO}^{-1} \cdot \text{den}^{-1}$

$$N_C = S_{NOX} \cdot EO = 0,011 \cdot EO = \text{kg.EO}^{-1} \cdot \text{den}^{-1} \quad (38)$$

Množství nerozpuštěných látek na vstupu do primárního stupně:

$$Z_{PS_in} = S_p \cdot EO = 0,055 \cdot EO = kg \cdot den^{-1} \quad (39)$$

Množství nerozpuštěných látek na výstupu z primárního stupně (s účinností $\eta_{PS}=15\%$):

$$Z_{PS_out} = (100 - E_{PS}) \cdot Z_{PS_in} = kg \cdot den^{-1} \quad (40)$$

Koncentrace nerozpuštěných látek v přebytečném kalu z dosazovací nádrže:

$$Z_{DN_out} = S_{DN_out} \cdot \dot{V}_{24} \left[kg \ BSK_5 / m^3 \right] \quad (41)$$

Množství vratného kalu se určí jako součin průměrného přítoku

$$\dot{V}_{VK} = \dot{V}_{24} \cdot R_p \left[m^3 / h \right] \quad (42)$$

Koncentrace kalu v aktivační nádrži

$$S_{AN_in} = \frac{Z_{DN_out} + Z_{PS_out}}{\dot{V}_{24} + \dot{V}_{VK}} \left[m^3 / h \right] \quad (43)$$

Objem aktivačního tanku se určí ze vstupního a výstupního znečištění a parametru objemového zatížení B_V :

$$V_{AN_min} = \frac{Z_{DN_out} + Z_{PS_out}}{B_V} \left[m^3 \right] \quad (44)$$

Doba zdržení v aktivačním tanku:

$$\tau_{AN} = \frac{V_{AN}}{\dot{V}_{24}} \left[m^3 / h \right] \quad (45)$$

Biologická účinnost aktivace:

$$\eta_{AN} = \frac{S_{AN_in}}{S_{AN_in} - S_{AN_out}} [\%] \quad (46)$$

Denní produkce kalu [26]:

$$Y_{SP_KAL} = 1,2 \cdot B_X^{0,23} \cdot \eta_{AN} \cdot S_{AN_in} \quad (47)$$

Denní přírůstek biomasy ΔX [26]:

$$\Delta X = Y \cdot \Delta B_V - k_b \cdot X = [kg \cdot m^{-3} \cdot d^{-1}] \quad (48)$$

Množství kalu v aktivační nádrži [26]:

$$W_S = \frac{S_{AN_in}}{B_X} = [kg_{kal}] \quad (49)$$

Stáří kalu:

$$\theta_X = \frac{X}{\Delta X} = [den] \quad (50)$$

Denní spotřeba kyslíku O_s [26]:

$$O_s = 0,5 \cdot \frac{\eta_{AN}}{100} \cdot BSK_5 + k_{re} \cdot W_S + 3,5 \cdot N_C = [kgO_2 \cdot den^{-1}] \quad (51)$$

Denní oxygenační kapacita OC[26]:

$$\begin{aligned} OC &= \frac{O_s}{\alpha} \cdot \frac{c_{SAT_13}}{c_{SAT_20} - c_u} \cdot \theta^{T-20} \\ &= \frac{O_s}{0,85} \cdot \frac{c_{s13}}{c_{s20} - c_u} \cdot 0,985^{T-20} [kgO_2 \cdot den^{-1}] \end{aligned} \quad (52)$$

Hodinová oxygenační kapacita OC_h [26]:

$$OC_h = \frac{OC_\alpha}{24} = [kgO_2 \cdot hod^{-1}] \quad (53)$$

Potřebné množství vzduchu \dot{V}_{vzd} :

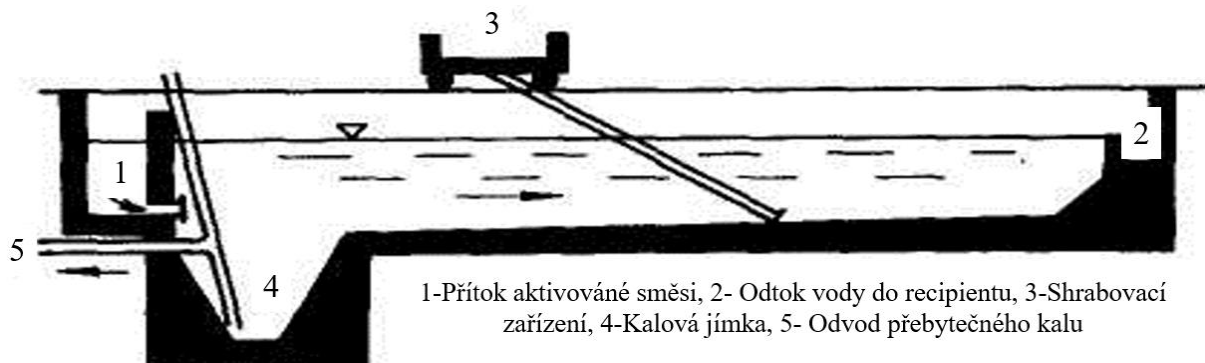
$$\dot{V}_{vzd} = \frac{OC_h}{c_{O_2}^v \cdot \chi} = \frac{OC_h}{0,2095 \cdot 0,3} [kgO_2 \cdot hod^{-1}] \quad (54)$$

11.1 Návrh dosazovací nádrže

Návrh dosazovací nádrže byl proveden podle normy ČSN 75 6401. Orientační přehled návrhových parametrů pro dosazovací nádrž je uveden v **Tabulce 8**. Schématický řez obdélníkové dosazovací nádrže s horizontálním průtokem je prezentován na **Obrázku 31**.

Tabulka 8 Orientační přehled návrhových parametrů pro dosazovací nádrže [26]

| Uspořádání průtoku DN | Střední doba zdržení (h) | Hydraulické zatížení plochy v (m ³ /m ² /h) |
|------------------------------|--------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| ČOV 500 – 5000 EO | | |
| Horizontální průtok nádržemi | | |
| Za biologickými kolonami | 1,5 | 2 |
| Za aktivací | 2 | 1,5 |
| Vertikální průtok kolonami | | |
| Za biologickými kolonami | 1,2 | 2 |
| Za aktivací | 1,3 | 1,5 |
| ČOV >5000 EO | | |
| Horizontální průtok nádržemi | | |
| Za biologickými kolonami | 1,6 | 2 |
| Za aktivací | 1,8 | 1,6 |
| Vertikální průtok kolonami | | |
| Za biologickými kolonami | 1,2 | 2,5 |
| Za aktivací | 1,6 | 2 |



Obrázek 31 Schématický řez dosazovací nádrže s horizontálním průtokem převzato a upraveno [26]

Výpočtové vztahy

Plocha dosazovací nádrže [26]:

$$S_{DN} = \frac{\dot{V}_{24}}{v \cdot 24} = [m] \quad (55)$$

Hloubka nádrže:

$$H_{DN} = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 = [m] \quad (56)$$

Hloubka dosazovací nádrže pro zahuštění [26]:

$$h_1 = \frac{X \cdot KI}{1000} = [m] \quad (57)$$

Hloubka dosazovací nádrže pro oddělování kalu [26]:

$$h_2 = 0,8 \text{ až } 1 [m] \quad (58)$$

Hloubka dosazovací nádrže pro čistou vodu na odtok do recipientu [26]:

$$h_3 = 1 [m] \quad (59)$$

Hloubka dosazovací nádrže pro případ akumulace při dešťovém přítoku [26]:

$$h_4 = 0,6 \text{ až } 1,5 [m] \quad (60)$$

Teoretická doba zdržení vody v nádrži:

$$\tau_{DN} = \frac{V_{DN}}{\dot{V}_{24}} = \frac{S_{DN} \cdot H_{DN}}{\dot{V}_{24}} = [hod] \quad (61)$$

11.2 Souhrn vypočtených parametrů

Návrhové parametry biologického stupně jsou souhrnně uvedeny pro tři velikosti ČOV v **Tabulce 9**.

Tabulka 9 Návrhové parametry biologického stupně ČOV (pro 2000, 5000, 10 000 EO)

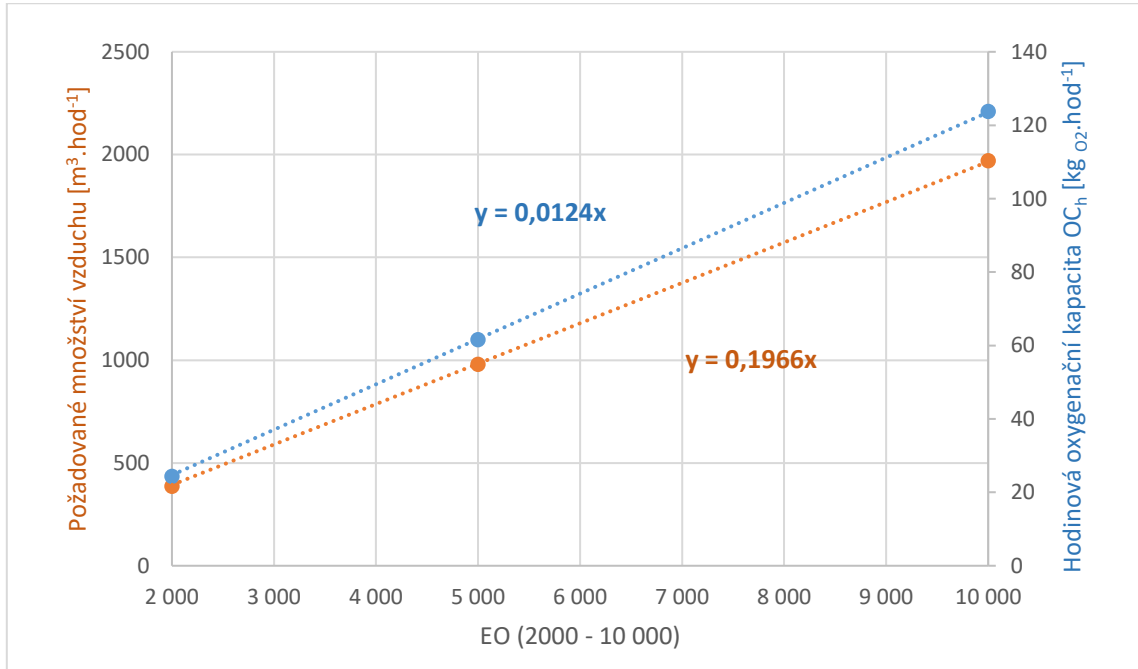
| Výpočtový parametr | Označení | Jednotka | Modelové velikosti ČOV v závislosti na EO | | |
|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------|----------|----------|
| | | | 2 000 | 5 000 | 10 000 |
| LÁTKOVÉ ZATÍŽENÍ NA VSTUPU DO AN | | | | | |
| Zatížení na vstupu do AN | BSK₅ | kg.den ⁻¹ | 119,82 | 299,55 | 599,10 |
| Zatížení na vstupu do AN (120g/EO.den) | CHSK | kg.den ⁻¹ | 240 | 600 | 1 200 |
| Zatížení na vstupu do AN (55g/EO.den) | N_C | kg.den ⁻¹ | 110 | 275 | 550 |
| Množství nerozpuštěných látek na vstupu do PS | Z_{PS_IN} | kg.den ⁻¹ | 120,00 | 300,00 | 600,00 |
| Množství nerozpuštěných látek na výstupu z PS | Z_{PS_OUT} | kg.den ⁻¹ | 102,00 | 255,00 | 510,00 |
| HYDRAULICKÉ ZATÍŽENÍ | | | | | |
| Průměrný denní přítok | V^o₂₄ | m ³ .den ⁻¹ | 420,00 | 1 050,00 | 2 100,00 |
| Maximální denní přítok | V^o_d | m ³ .den ⁻¹ | 540,00 | 1 350,00 | 2 625,00 |
| Maximální hodinový přítok | V^o_{h,max} | m ³ .hod ⁻¹ | 22,50 | 56,25 | 109,38 |
| OBJEM NÁDRŽE | | | | | |
| Objem aktivační nádrže | V_{AN} | m ³ | 200 | 500 | 1 000 |
| Plocha dosazovací nádrže | S_{DN} | m ² | 40 | 80 | 180 |
| Objem dosazovací nádrže | V_{DN} | m ³ | 178 | 356 | 801 |
| TECHNOLOGICKÉ PARAMETRY | | | | | |
| Objemové zatížení | B_V | kg.m ³ _{AN} .d ⁻¹ | 0,12 | 0,12 | 0,12 |
| Množství nerozpuštěných látek na vstupu do aktivační nádrže | Z_{AN_IN} | kg BSK ₅ .den ⁻¹ | 26,4 | 66,0 | 132,0 |
| Množství nerozpuštěných látek na výstupu z dosazovací nádrže | Z_{DN_REC} | kg BSK ₅ .den ⁻¹ | 8,4 | 21,0 | 42,0 |
| Stáří kalu | θ_x | dnů | 7,47 | 7,47 | 7,47 |
| Biologická účinnost aktivace | E_B | % | 92,39 | 92,39 | 92,39 |
| Hodinová oxygenační kapacita | OC_h | kgO ₂ .hod ⁻¹ | 24,28 | 61,55 | 123,75 |
| Požadované množství vzduchu | V_{vzd} | Nm ³ .hod ⁻¹ | 386,26 | 979,26 | 1968,99 |
| Recirkulace vratného kalu | R | % | 41,18 | 41,18 | 41,18 |
| Doba zdržení v aktivačním tanku | τ_{AN} | hod | 7,66 | 7,66 | 7,66 |
| Specifická denní produkce kalu | Y_{sp, kal} | kg.den ⁻¹ | 80,32 | 200,79 | 401,58 |
| VYPOČTENÉ HODNOTY DÍLČÍCH TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ | | | | | |
| Průtok vratného kalu | V_{VK} | m ³ .hod ⁻¹ | 7,21 | 18,01 | 36,03 |
| Odtok vody přepadem DN do recipientu | V_{REC} | m ³ .hod ⁻¹ | 4,54 | 7,94 | 19,30 |
| Průtok přebytečného kalu | V_{PK} | m ³ .hod ⁻¹ | 20,17 | 53,82 | 104,23 |

11.3 Spotřeba vzduchu vs. kyslíku

Výsledné hodnoty spotřeby vzduchu a oxygenační kapacity jsou graficky vyneseny v závislosti na počtu ekvivalentních obyvatel v **Grafu 15**. Hodnoty spotřeb kyslíku, resp. vzduchu mají lineární trend. Pro odhad spotřeby a oxygenační kapacity pro jiný počet EO lze využít viz rovnice (62) a (63).

$$Vzduch \left[m^3/hod \right] = 0,1966 \cdot EO \quad (62)$$

$$O_2 \left[\frac{kg \ O_2}{hod} \right] = 0,0124 \cdot EO \quad (63)$$



Graf 15 Závislost počtu ekvivalentních obyvatel na množství potřebného aeračního media

Množství provzdušňovacího media pro jednotlivé varianty jsou uvedeny v **Tabulka 10**. Pro varianty využívající kyslík bylo nutné pro přepočítání ze vzduchu zjistit parametry přenosu kyslíku za jednotku času a výtěžnost kyslíku.

Pro varianty využívající kyslík je uvažováno řešení v provedení technologie Solvox Linde. Dle datasheetu technologie Solvox Linde lze předpokládat v průměru s přenosem kyslíku 0,4 Nm³.hod⁻¹ odpovídající 0,44 kg.hod⁻¹ na 1 metr délky perforované hadice. Přesná data o výtěžnosti těchto zařízení je obtížné dohledat. Společnosti Air Products, Messer a Linde uvádějí, že dosahují 90% a vyšší účinnosti rozpuštěného kyslíku ve vodě při aplikaci čistého kyslíku.

Jak je uvedeno v rešeršní části, na základě experimentálních dat jsou pro 6 m hluboké aerační tanky s jemnobublinnou aerací (průměr bublin $d_b < 2$ mm) čistým kyslíkem hodnoty parametru účinnosti přestupu kyslíku OTE větší jak 90%. Lze tak hodnotu uváděnou výrobcem akceptovat.

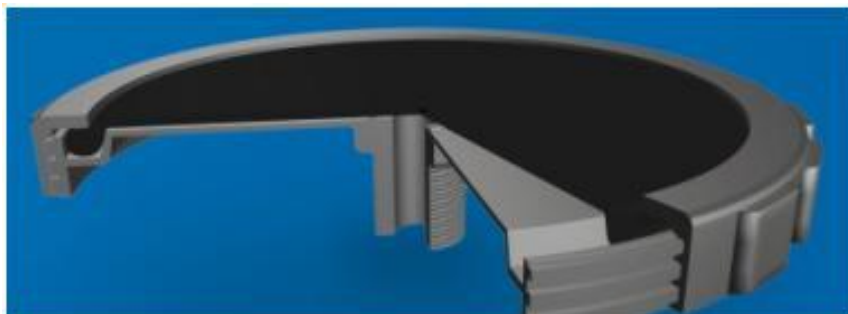
Tabulka 10 Množství provzdušňovacího média pro jednotlivé technologie

| Medium pro zvolenou technologii | Fáze média | Označení | Jednotka | Modelové velikosti ČOV v závislosti na EO | | |
|-------------------------------------------------------------|--------------|-----------|---------------------------|-------------------------------------------|--------|---------|
| | | | | 2 000 | 5 000 | 10 000 |
| Aerace vzduchem | Plyn (g) | V_{vzd} | $Nm^3 \cdot hod^{-1}$ | 386,26 | 979,26 | 1968,99 |
| Aerace dováženým kyslíkem Aerace kyslíkem z PSA jednotky | Plyn (g) | V_{O_2} | $Nm^3 O_2 \cdot hod^{-1}$ | 18,25 | 46,26 | 93,02 |
| Aerace kyslíkem z Elektrolyzéro | Kapalina (l) | m_{O_2} | $kg O_2 \cdot hod^{-1}$ | 24,28 | 61,55 | 123,75 |

11.4 Volba aeračních elementů

11.4.1 Elementy pro vzduch

Pro pneumatickou aeraci vzduchem byly zvoleny jemnobublinné aerační diskové elementy Flex Air společnosti Envi Pur viz. **Obrázek 32**. [20]



Obrázek 32 Flex Air jemnobublinný diskový aerační element společnosti ENVI-PUR převzato z [20]

Jedná se o konstrukčně jednoduché a elegantní řešení, kde polypropylenové nosné těleso s výztuhou skelných vláken drží perforovanou membránu z odolného elastomeru¹³ pro pružnost a s vrstvou teflonu na povrchu pro chemickou odolnost. Aby se předešlo případnému natečení odpadní vody do porušeného elementu, jsou v konstrukci elementů integrované zpětné klapky. Provedení High Cap má průměr perforace membrán $d = 2 \text{ mm}$ a pro Micro variatu dokonce $d = 1 \text{ mm}$. Dle velikosti elementu je možno dávkovat na element 0,9 až 22,1 $Nm^3 \cdot h^{-1}$ vzduchu. Dále pro středně zatížené elementy lze očekávat tlakovou ztrátou 3,2 až 4 kPa na element. [20] Počet elementů je možno určit jako podíl potřebného průtoku vzduchu V_{vzd} a specifického průtoku vzduchu na element V_e :

$$n_e = \frac{V_{vzd}}{V_e} \quad (64)$$

Celková tlaková ztráta je daná součtem hydrostatického tlaku, který působí na dně nádrže na elementy a celkovou tlakovou ztrátou n-elementů dle rovnice (63):

¹³ Vhodným materiálem pro provzdušňování jsou gumy nebo silikony např.: EPDM (etylen propylen dien monomer).

$$\Delta p_{cz} = p_H + \overline{\Delta p_{ze}} = H_e \cdot \rho_{kal} \cdot g + \overline{\Delta p_{ze}} \cdot n_e \quad (65)$$

Parametry a počty aeračních elementů pro tři velikosti ČOV jsou souhrnně uvedeny v **Tabulce 11**. Na základě hodnoty tlakových ztrát a požadovaného průtoku vzduchu lze následně vybrat vhodné šroubová dmychadla.

Tabulka 11 Technické parametry aeračních elementů Envi-Pur [20]

| Jemnobublinný aerační element Flex Air 12" High Cap Envi-Pur | | | EO 2000 | EO 5000 | EO 10 000 |
|--------------------------------------------------------------|-----------------|-------------------------------------|---------------------|---------|-----------|
| Parametr | Označení | Jednotka | Hodnota | | |
| Specifický průtok vzduchu na element | V_e | $\text{Nm}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$ | 3,4 až 22,1 (12,75) | | |
| Tlaková ztráta elementu pro střední zatížení | Δp_{ze} | kPa | 3,2 až 4 (3,6) | | |
| Průměr elementu | D | m | 0,328 | | |
| Hmotnost | m_e | kg | 1 | | |
| Vypočtené hodnoty | | | | | |
| Potřebné množství vzduchu | V_{vzd} | $\text{m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$ | 386,26 | 979,26 | 1968,99 |
| Počet elementů | n_e | - | 30 | 77 | 154 |
| Celková tlaková ztráta elementů | Δp_{ze} | kPa | 3,60 | 3,60 | 3,60 |
| Hydrostatický tlak | p_H | kPa | 59,84 | 59,84 | 59,84 |
| Celková tlaková ztráta aeračního systému | Δp_{cz} | kPa | 63,44 | 63,44 | 63,44 |
| Minimální zástavbová plocha elementů | $S_{e, \min}$ | m^2 | 3,26 | 8,26 | 16,61 |

11.4.2 Elementy pro kyslík

Pro distribuci kyslíku byly zvoleny perforované Linde Solvox hadice (viz. **Obrázek 33**). Tyto hadice odolávají oxidačním účinkům kyslíku a zároveň je jejich povrch odolný vůči agresivnímu prostředí odpadních vod. Nevýhodou je, že materiál EPDM, ze kterého jsou hadice vyrobeny, není vhodný pro mastné a alkalické prostředí ale má výborné vlastnosti vůči kyselinám. Parametry hadic a vypočtené hodnoty jsou uvedené v **Tabulce 12** Bohužel výrobce neuvádí data tlakových ztrát, nicméně pro volbu zařízení postačí uváděná hodnota pracovního tlaku $p_p = 6 \text{ bar}$.



Obrázek 33 Solvox perforovaná hadice (1000 póru na m délky) zdroj [3]

Postup pro stanovení délky je analogický jako u aeračních diskových elementů. Pro výpočet byly použity následující data z datasheetu, podle kterých lze uvažovat v průměru s přenosem kyslíku $0,4 \text{ Nm}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$ odpovídající $0,44 \text{ kg} \cdot \text{hod}^{-1}$ na 1 metr délky perforované hadice.

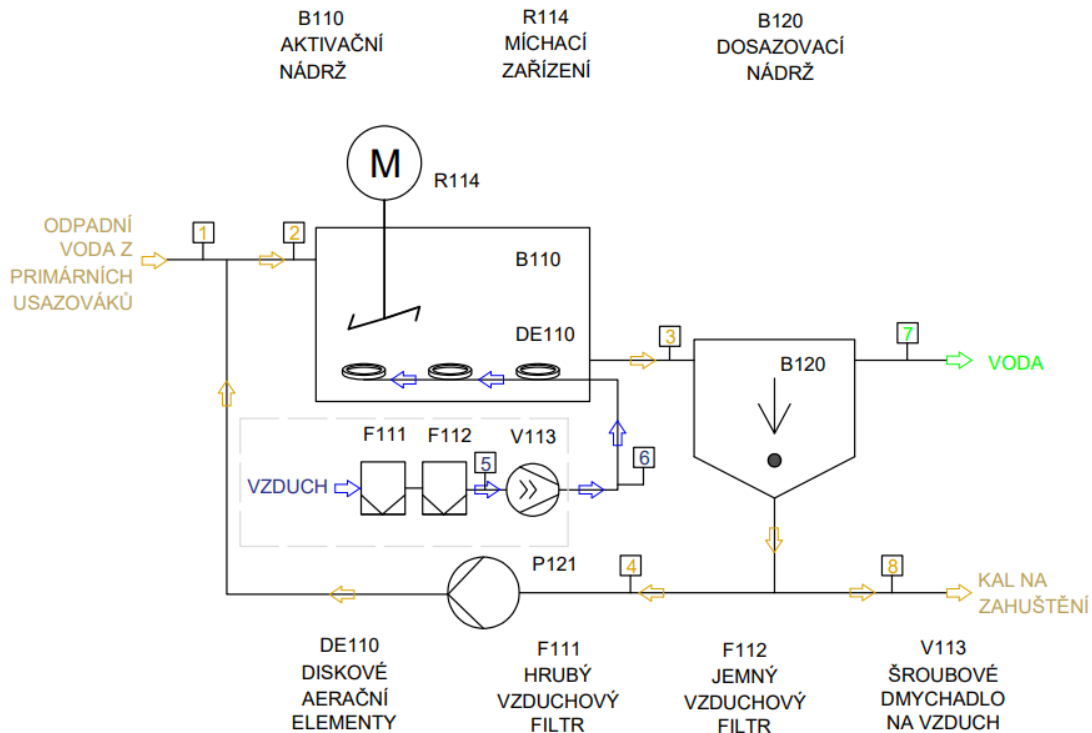
Tabulka 12 Technické specifikace SOLVOX aeračního systému společnosti Linde převzato z [3]

| SOLVOX STANDARTNÍ RÁM DIFUZNÍCH (perforovaných) HADIC - materiál EPDM | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------|------------------------------------------------|----------------------------------|---------|-----------|---------------------------------|
| Popis veličiny | Označení | Jednotka | Hodnota pro x metrů délky hadice | | | Zprůměrované na 1m délky hadice |
| | | | 20 m | 40 m | 60m | |
| Nominální pracovní tlak | P_p | Bar | 1,5 až 6 | | | - |
| Vnitřní a vnější průměr hadic | d | mm | 13 (20) | | | 13,00 |
| Přenos kyslíku | | $\text{m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$ | 4-12 | 8-24 | 12-36 | 0,4 |
| Kapacita přenosu kyslíku | | $\text{kg} \cdot \text{hod}^{-1}$ | 6-17 | 11-34 | 17-51 | 0,45 |
| Rozměry rámu | S_e | m | 4x1 | 5x2,2 | 5x2,2 | 0,22x1 |
| Hmotnost sestavy | m_e | kg | 7 | 14 | 21 | 0,35 |
| Vypočtené hodnoty | | | EO 2000 | EO 5000 | EO 10 000 | |
| Potřebné množství kyslíku (g) | V_{O_2} | $\text{Nm}^3 \text{O}_2 \cdot \text{hod}^{-1}$ | 18,25 | 46,26 | 93,02 | |
| Potřebné množství kyslíku (l) | m_{O_2} | $\text{kg O}_2 \cdot \text{hod}^{-1}$ | 24,28 | 61,55 | 123,75 | |
| Potřebná délka hadic (pro přenos kyslíku) | l_e | m | 45,62 | 115,66 | 232,55 | |
| Potřebná délka hadic (pro kapacitu) | l_e | m | 53,95 | 136,77 | 275,00 | |
| Zprůměrované hodnoty | l_e | m | 49,78 | 126,21 | 253,78 | |
| Zástavěná plocha | S_e | m^2 | 10,95 | 27,77 | 55,83 | |

Pro dopravu kyslíku od zdroje k aktivační nádrži bývá voleno potrubí z nerezové oceli, které vykazuje vysoké antikoroziční účinky a dostatečnou chemickou odolnost.

12 Varianta – aerace pomocí vzduchu

Schéma pro variantu pneumatické aerace aktivační nádrže vzduchem je uvedeno na **Obrázek 34**. Návrh diskových aeračních elementů byl proveden v části 11.4.1.



Obrázek 34 Návrh PI&D schéma varianty pneumatické aerace vzduchem

12.1 Návrh a filtrace vzduchu

Pro záchyt pevných částic a aerosolů na vstupu do dmychadel byla zvolena dvoustupňová filtrace. Filtrace pevných částic má význam pro trvanlivost membrán aeračních elementů a snižuje riziko ucpávání a foulingu pórů. Byl zvolen hrubý koalescenční filtr basic (KB) a pro záchyt jemných částic byl zvolen koalescenční filtr extra (KE) z katalogu Kaeser [36]. Filtry byly vybrány podle katalogu výrobce pro hodnoty průtoku vzduchu V_f a zvolený pracovní tlak $p_p = 2$ bar (g). Tabulková a vypočtená data pro filtraci vzduchu jsou uvedena v **Tabulce 13**.

Tabulka 13 Vypočtené a tabulkové hodnoty pro jemný a hrubý filtr [36]

| Model podel | Typ filtrů Kaeser | | | | | |
|----------------------------------------|--------------------|-------------------------------------|----------|---------------|---------------|----------------|
| | Veličina | | Jednotka | F 250 KB a KE | F 530 KB a KE | F 1060 KB a KE |
| Provozní tlak | p_p | Bar | | 2 | | |
| Nominální průtok (pro $p = 7$ Bar (g)) | V_N | $\text{Nm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ | 25 | 53,1 | 106,2 | |
| Korekční faktor pro $p = 2$ Bar | k_f | - | | 0,38 | | |
| Provozní teplota | T | $^{\circ}\text{C}$ | | +3 až +66 | | |
| Zkorigovaný provozní průtok | V_{kor_f} | $\text{Nm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ | 9,50 | 20,18 | 40,36 | |

12.2 Návrh dmychadel

Hlavním zařízením technologie pneumatické aerace jsou dmychadla, která bývají zpravidla zapojena v paralelním zapojení. Jeden stroj běží, druhý stroj slouží jako záložní a zapíná se v případě poruchy, aby nebyl ohrožen chod ČOV. Pro výpočet energetické spotřeby je započten příkon pouze běžícího stroje.

Metodika výpočtu:

- Katalogový nominální průtok se přepočítává pro katalogové parametry $p = 1 \text{ bar}$, bývá tam teplota $T = 20^\circ\text{C}$:

$$\dot{V}_{dm} = \dot{V}_N \frac{p_N}{p} \frac{T}{T_N} = \dot{V}_N \frac{101,325}{100} \frac{293,15}{273,15} = 1,087 \cdot \dot{V}_N \quad (66)$$

- Výpočet příkonu dmychadel dle rovnice (67):

$$P_{dm} = \frac{e_{dm} \dot{m}}{\eta_{dm}} = \frac{(p_2 - p_1) \cdot \dot{m}}{\rho_{sv} \cdot \eta_{dm}} = \frac{\dot{V}_{dm} \cdot (p_2 - p_1)}{\eta_{dm}} \quad (67)$$

Výpočet celkové účinnosti byl vypočten jako součin účinnosti kompresoru η_k a elektromechanické účinnosti η_m . Elektromechanická účinnost v sobě zahrnuje účinnost elektromotoru, která je daná mezinárodními standardy pro danou kategorií s účinností IE 4.

$$\eta_{c_dm} = \eta_k \cdot \eta_m \quad (68)$$

Parametry vstupního vzduchu na sání dmychadla (teplota, tlak, relativní vlhkost) se mění v závislosti na počasí, ročním období a jejich umístění. Důležitá je také informace o celkové tlakové ztrátě přívodního potrubím a samotných aeračních elementů. Aerační elementy mají definovanou katalogovou hodnotu tlakové ztráty. Pro podrobnější stanovení tlakové ztráty přívodním potrubím by bylo nutné znát konkrétní provedení potrubní trasy, tj. průměr a celkovou délku potrubí, rozměry potrubních armatur, počty kolen, použité tvarovky, apod. Z tohoto důvodu byla uvažována 5% rezerva na armatury a 10 % na potrubí, která by v reálných provozech ztráty měla kompenzovat. Pracovní tlak na výstupu dmychadla p_2 byl vypočten jako součet atmosférického tlaku, hydrostatického tlaku, celkové tlakové ztráty podle potřebného počtu aeračních elementů a 10% rezervy na pokrytí tlakových ztrát přívodním potrubím.

Vypočtené potřebné parametry dmychadla jsou uvedeny v **Tabulce 14**. Na základě těchto parametrů byla zvolena šroubová dmychadla výrobce KAESER. Parametry jsou uvedeny v **Tabulka 15**.

Tabulka 14 Technické parametry spočtené pro dmyhadla

| Parametr | Veličina | Jednotka | EO 2000 | EO 5000 | EO 10 000 |
|--------------------------|----------------|----------------------------------|---------|---------|-----------|
| Potřebný průtok vzduchu | V_N | $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | 386,26 | 979,26 | 1968,99 |
| Průtok vzduchu dmyhadlem | V_{dm} | $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | 419,87 | 1064,46 | 2140,29 |
| Příkon dmyhadla | P_{dm} | kW | 10,85 | 27,51 | 55,32 |
| Celková tlaková ztráta | p_z | kPa | | 69,78 | |
| Celková účinnost | $\eta_{c, dm}$ | % | 49,32 | 74,35 | 73,75 |

Tabulka 15 Parametry vybraných šroubových dmyhadel z katalogu Kaeser

| Pro model | | | EO 2000 | EO 5000 | EO 10 000 |
|--------------------------------------|----------|-------------------------------------|---------------------|---------------|--------------|
| Parametr | Veličina | Jednotka | Typ dmyhadel Kaeser | | |
| | | | CBS 120 M SFC | DBS 220 M SFC | EB 421 C STC |
| Max. provozní přetlaky | p | Bar | 1100 | 1100 | 1000 |
| Nominální průtok (pro $p=1$ Bar (g)) | V_N | $\text{Nm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ | 12,5 | 22 | 40,1 |
| Jmenovitý výkon | P | kW | 22 | 37 | 75 |

12.3 Návrh míchadel

Pro zajištění homogenizace vsádky aktivačního tanku a intenzifikace přenosu hmoty na mezifázovém rozhraní plyn kapalina byla navržena instalace vrtulových dvou ponorných míchadel viz. **Obrázek 35**. Tvar lopatek v tomto případě hraje významnou roli, protože při čerpání nesmí narušit při daných otáčkách buněčnou stěnu polykultury v aktivačním tanku. Se zvyšujícími se otáčkami intenzifikuje přenos hmoty mezi aktivovanou směsí a vzduchem. Uvádí se, že objemový součinitel přestupu hmoty se mícháním zvyšuje s $2/3$ mocninou průměru míchadla stejně jako měrný příkon míchadla. [6] Parametry vybraných míchacích ústrojí jsou uvedeny v **Tabulce 16**.



Obrázek 35 Ponorné vrtulové míchadlo Oramont převzato [33]

Tabulka 16 Technická specifikace míchadel

| Model podél EO | | | 2000 | 5000 | 10 000 |
|--------------------------|----------|----------|-------------------------------------------|--------|----------|
| Parametr | Veličina | Jednotka | Typ ponorného vrtulového míchadla ORAMONT | | |
| | | | MON 7,5 | MON 11 | MON 18,5 |
| Otáčky míchadla | n_m | ot.min-1 | 320 | 320 | 320 |
| Průměr míchadla | d_m | mm | 650 | 680 | 800 |
| Nominální výkon míchadla | P_m | kW | 7,5 | 11 | 18,5 |

12.4 Návrh čerpadel vratného kalu

V dosazovací nádrži sedimentuje z aktivované směsi kal, z něhož část se vrací zpět na přítok do aktivační nádrže jako tzv. vratný kal. Průtok vratného kalu byl stanoven podle rovnice (69) pomocí tzv. recirkulačního poměru.

$$\dot{V}_{VK} = \dot{V}_{24} \cdot R_p \left[\frac{m^3}{h} \right] \quad (69)$$

Recirkulační poměr R_p je definovaný jako poměr průtokového množství vratného kalu a odpadní vody. Hodnota recirkulačního poměru bývá v rozsahu od 0,1 do 0,5 a ovlivňuje množství kalu a stáří kalu kvalitu kalu a jeho sedimentovatelnost. Z praktického hlediska se sedimentovatelnost kalu posuzuje pomocí tzv. kalového indexu a kvalitní kal vykazuje hodnoty KI menší než 100 ml.g⁻¹. Pro výpočet byla zvolena hodnota $R_p = 41,18 \%$.

Metodika výpočtu pro stanovení výkonu čerpadla a třecích ztrát v potrubí:

- Výpočet střední rychlosti uvnitř potrubí
- Výpočet Reynoldsova čísla pro zjištění charakteru proudění
- Určení hodnoty ztrátového součinitele λ (dle Re ve všech případech pro plně vyvinuté turbulentní proudění) z Coolbrookova vztahu

$$\lambda = \left(-2 \log \left(\frac{k}{3,7 \cdot d} + \frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} \right) \right)^{-2} \quad (70)$$

- Stanovení třecích ztrát v potrubí pomocí Darcy Weisbachovy rovnice
- Energie před čerpadlem e_ζ [kJ/kg] (tzv. výšky čerpadla [m])

$$E_\zeta = \rho_{kal} \frac{u_{stř}^2}{2} + g \cdot \rho_{kal} \cdot \Delta H + p_1 - \rho_{kal} \cdot e_z - p'' [Pa \approx m] \quad (71)$$

- Výpočet příkonu čerpadla P [kW]

$$P_\zeta = \frac{Q_{VK} \cdot \rho_{kal} \cdot e_\zeta}{\eta_\zeta} [kW] \quad (72)$$

Pro výpočet potřebného příkonu čerpadla je třeba znát alespoň orientačně hodnoty hustoty a dynamické, resp. kinematické viskozity kalu. Tyto hodnoty byly převzaty od Dorana (2013) [12] a jsou uvedeny v **Tabulce 17**. Dále jsou potřeba průměr a délka potrubí. Průměr byl zvolen na základě rozměru přípojovacího hrdla a délka potrubí byla odhadnuta. Rozměry jsou uvedeny v **Tabulce 18**.

Vypočtené parametry čerpadel jsou uvedeny v **Tabulka 17**. Pro přečerpávání vratného kalu byla vybrána čerpadla společnosti HCP z řady AL [34]. Parametry a specifikace vybraných čerpadel vratného kalu jsou uvedeny v **Tabulka 19**.

Tabulka 17 Data potřebná pro výpočet příkonu čerpadla vratného kalu

| Parametr | Veličina | Jednotka | EO 2 000 | EO 5 000 | EO 10 000 |
|--------------------------|--------------|--------------------|----------|----------|-----------|
| Navržený průtok | V_s | $m^3 \cdot h^{-1}$ | 17,50 | 43,75 | 87,50 |
| Uvažovaná hustota OV | ρ_{kal} | $kg \cdot m^{-3}$ | 1020 | 1020 | 1020 |
| Kinematická viskozita | ν_{kal} | $mPa \cdot s^{-1}$ | 0,0588 | 0,0588 | 0,0588 |
| Gravitační konstanta | g | m^2/s | 9,81 | 9,81 | 9,81 |
| Rozměr potrubí | D | mm | 57,0 | 88,9 | 108,0 |
| Tloušťka stěny potrubí | s | mm | 3,0 | 3,0 | 4,0 |
| Vnitřní průměr potrubí | d | mm | 51,0 | 82,9 | 100,0 |
| Předpoklad délky potrubí | l | m | 30 | 30 | 30 |

Tabulka 18 Výpočet parametrů čerpadel

| Parametr | Veličina | Jednotka | EO 2000 | EO 5000 | EO 10 000 |
|----------------------------------|-----------|--------------------|---------|---------|-----------|
| Průtok vratného kalu | V_{VR} | $m^3 \cdot h^{-1}$ | 17,50 | 43,75 | 87,50 |
| Střední rychlost proudění | $u_{stř}$ | $m \cdot s^{-1}$ | 2,38 | 2,25 | 3,09 |
| Ztráty v potrubí | e_z | $J \cdot kg^{-1}$ | 30,63 | 25,30 | 75,09 |
| Potřebná dopravní výška | H_c | m | 11,83 | 10,74 | 20,89 |
| Tlak nasycených par | p'' | kPa | | 2,34 | |
| Měrná energie dodávané čerpadlem | $e(Y)$ | kPa | 110,99 | 116,12 | 67,64 |
| Příkon čerpadla | P | kW | 0,55 | 1,44 | 1,68 |
| Instalovaný výkon | P | kW | 0,75 | 1,50 | 2,20 |
| Účinnost čerpadla | η_c | % | 0,73 | 0,96 | 0,76 |

Poznámky: ^{*1} Hodnota tlaku sytých par vody pro teplotu 20°C. Pro výpočet NPSH parametru čerpadel. Tento parametr určuje podmínky, aby za kterých by docházela ke kavitaci. Kavitace je pro čerpadla nežádoucí jev, a mohlo by čerpadlo poškodit. Při kavitaci tedy při tlaku nasycených par dané tekutiny vznikají v čerpaném proudu navíc bubliny plynu.

Tabulka 19 Technická specifikace vybraných čerpadel vratného kalu společnosti HCP data převzata [34]

| Model podél EO | | | 2000 | 5000 | 10 000 |
|---------------------------|-----------|--------------------|--------------------------------|---------|---------|
| Parametr | Veličina | Jednotka | Typ čerpadel vratného kalu HCP | | |
| | | | AL 21,5-N | AL-32AN | AL-43AN |
| Jmenovitý výkon | P | kW | 0,75 | 1,5 | 2,2 |
| Maximální průtok | V_{max} | $m^3 \cdot h^{-1}$ | 19,2 | 54 | 78 |
| Provozní průtok | V_p | $m^3 \cdot h^{-1}$ | 7,2 | 30 | 42 |
| Maximální výtlač | H_{max} | m | 18,5 | 20 | 19,5 |
| Provozní výtlač | H_p | m | 13,5 | 10,5 | 11,5 |
| Rozměr přípojovacho hrdla | DN | | DN 50 | DN 80 | DN 100 |

12.5 Aerace vzduchem – shrnutí

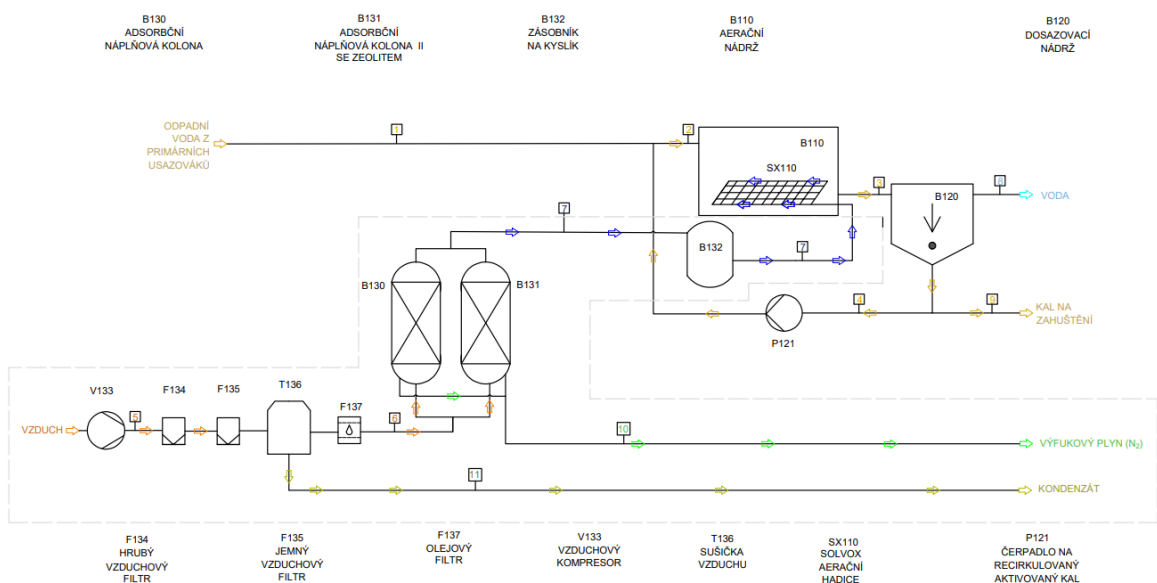
Vypočtená data měrné spotřeby elektrické energie a odhad ročních provozních nákladů potřebný na chod aktivace a aeraci vzduchem jsou uvedena pro tři uvažované velikosti ČOV souhrnně v **Tabulce 20**.

Tabulka 20 Souhrnná bilance energetické náročnosti pneumatické aerace

| Model podél EO | | | 2000 | 5000 | 10 000 |
|-----------------------------------------------|------------|-------------------------------------|------------|--------------|--------------|
| Parametr | Veličina | Jednotka | EO 2 000 | EO 5 000 | EO 10 000 |
| Celkový instalovaný výkon | P_e | kW | 37,75 | 60,50 | 114,20 |
| Energetická spotřeba | | kWh | 26,40 | 50,95 | 93,99 |
| Cena silové elektřiny za 1kWh (Říjen 2023) | N_{el} | Kč.kWh ⁻¹ | | 3,58 | |
| Specifická spotřeba energie vtažená na | | | | | |
| 1 Nm ³ vzduchu | | kWh.Nm ⁻³ | 0,10 | 0,06 | 0,06 |
| 1 m ³ odpadní vody | ξ_{Si} | kWh.m ⁻³ _{ov} | 2,16 | 1,38 | 1,31 |
| kg O ₂ | | kWh.kg ⁻¹ O ₂ | 3,01 | 1,45 | 0,91 |
| 1 Nm ³ O ₂ | | kWh.Nm ⁻³ O ₂ | 0,47 | 0,29 | 0,28 |
| Provozní roční náklady (pro 345 denní provoz) | N_p | Kč | 783 178 Kč | 1 511 376 Kč | 2 788 172 Kč |

13 Varianta – aerace kyslíkem z PSA jednotky

Schéma pro variantu pneumatické aerace aktivační nádrže kyslíkem z PSA jednotky je uvedeno na **Obrázku 36**. Návrh diskových aeračních elementů byl proveden v části 11.4.1.



Obrázek 36 Návrh P&ID schéma varianty aerace kyslíkem z PSA jednotky

Je zvoleno klasické uspořádání PSA jednotky se dvěma adsorpčními kolonami viz. **Obrázek 36**. Adsorpční kolony budou naplněny zeolitem. Typicky pro výrobu kyslíku volím zeolity s vysokou selektivitou typu 13X nebo 5A. Pro dosažení dostatečně vysoké čistoty kyslíku a selektivity na výstupu z jednotky je vhodné provozovat adsorpční kolony za vyšších tlaků. [13] Pro model PSA jednotky jsem zvolil pracovní tlak $p_p = 7$ Bar. Na výstupu ze zásobníku na kyslík předpokládám stejný tlak $p_p = 7$ Bar.

Pro návrh zapojení a bilanci je důležité stanovení přípustných parametrů vstupního vzduchu. Tyto parametry stanovuje norma ISO 8573-1:2010, kde provoz PSA jednotky vyžaduje třídu kvality vzduchu 1.4.1. První číslice stanovuje třídu pro pevné částice, druhá pro vlhkost vzduchu, a třetí pro obsah oleje ve vzduchu (viz. **Tabulka 21**). Aby bylo dosaženo požadované kvality vzduchu je vzduch z kompresoru upraven pomocí jemného a hrubého filtru na záchyt pevných částic, olejového filtru a kondenzační sušičky s cyklonovým odlučovačem (viz. **Obrázek 36**).

Tabulka 21 Parametry třídy kvality vzduchu 1.4.1 dle ISO 8573-1:2010 převzato z [35]

| Parametr | Třída kvality | Průměr částic | Veličina | Jednotka | Hodnota |
|---------------------------------|---------------|---------------|-----------------------------------|-------------------|-----------|
| Tuhé částice (prach, nečistoty) | 1 | 0,1 < d < 0,5 | Max. počet částic o | μm/m ³ | ≤ 20 000 |
| | | 0,5 < d < 1,0 | průměru d na m ³ média | | ≤ 400 |
| | | 1,0 < d < 5,0 | | | ≤ 10 |
| Voda a vodní páry | 4 | - | Tlakový rosný bod | °C | ≤ 3 |
| Olej (olejové aerosoly a mlhy) | 1 | - | Celková koncentrace oleje | mg/m ³ | max. 0,01 |

Jedním ze vstupních parametrů pro bilanci PSA jednotky je průtok vzduchu na vstupu do PSA jednotky.

Průtok vzduchu na PSA jednotku se stanoví jako násobek produkovaného množství kyslíku a tzv. air faktoru. Air faktor je možno nalézt v produktových katalozích výrobců a stanoví, kolik vzduchu o požadované kvalitě je potřeba pro výrobu jednotkového množství vyráběného kyslíku o dané čistotě.

$$V_{PSA_{in}} = af \cdot \dot{V}_{O_2} \quad (73)$$

13.1 Návrh kompresorů

Výběr kompresorů se provádí podle hodnoty FAD - tzv. Free Air Delivery (FAD). FAD určuje množství vzduchu, které je na sání kompresoru při standardních podmínkách, tj. množství vzduchu při tlaku $p = 1$ bar, okolní teplotě nasávaného vzduchu $T_n = 20^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti $\varphi = 0\%$. [8] Postup stanovení FAD je dán normou ISO 1217 Annex C a DIN 1945 Annex F.

Tlak p_2 je určen volbou kompresorů tedy hodnotou tlaku dodávaného kompresorem $p_2 = 8$ Bar. Ohřev plynu po stlačení na tlak p_2 není uveden v katalogu výrobce. Dle Šulce [8] je hodnota maximálního teplotního rozdílu mezi vstupním a výstupním proudem vzduchu v kompresorech je 10°C . [8] Volím proto teplotu $T_2 = 30^\circ\text{C}$.

Množství FAD se vypočte z požadovaného množství vzduchu pro PSA jednotku dle vztahu:

$$\begin{aligned} FAD &= V_{PSA_{in}} \cdot \frac{p_2 T_1}{p_1 T_2} = V_{PSA_{in}} \cdot \frac{800 \cdot 273,15}{(100) \cdot 303,15} \\ &= \frac{7,208}{60} \cdot V_{PSA_{in}} \frac{\text{Nm}^3}{\text{min}} \end{aligned} \quad (74)$$

Průtok vlhkého vzduchu se vyjádří jako součet suché složky vzduchu a vlhké složky jako v rovnici (75) [8]:

$$\dot{V}_{v,vzd} = \frac{R \cdot T}{p} (n_{H_2O} + n_{s,vzd}) = \frac{R \cdot T}{p} \left(\frac{x_{H_2O} \cdot m_{s,vzd}}{M_{H_2O}} + \frac{m_{s,vzd}}{M_{s,vzd}} \right) \quad (75)$$

Měrná práce na kompresi plynu bude vypočtena za předpokladu adiabatické komprese:

$$pv^\kappa = konst. , \quad (76)$$

kde κ ...Poissonova konstanta nebo také izoentropický koeficient (pro vzduch tj. dvouatomový plyn $\kappa = 1,4$).

Metodika výpočtu:

- Výpočet adiabatického příkonu P_{ad}

$$P_{ad} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot p_1 \cdot \dot{V}_{v,vzd} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] \quad (77)$$

- Výpočet celkové účinnosti

Celková účinnost je vypočtena jako součin účinnosti kompresoru η_k a elektromechanické účinnosti η_m . Elektromechanická účinnost v sobě zahrnuje účinnost elektromotoru, která je daná mezinárodními standarty pro kategorií IE 4 s vysokou účinností.[8]

$$\eta_c = \eta_k \cdot \eta_m \quad (78)$$

- Výpočet příkonu kompresoru

$$P_k = \frac{P_{ad}}{\eta_c} \quad (79)$$

- Výpočet měrné spotřeby energie vztažené na hmotnost produkovaného kyslíku

$$\psi = \frac{R \cdot T}{\eta_c} \cdot \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \frac{\dot{n}_{vz}}{\dot{m}_{O_2}} \left(\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right) \left[\frac{kJ}{kg O_2} \right] \quad (80)$$

Vypočtené potřebné parametry kompresorů jsou uvedeny v **Tabulce 22** a vybrané specifikace z katalogu pro vybrané kompresory jsou v **Tabulce 23**.

Tabulka 22 Technické parametry spočtené pro kompresory v PSA jednotce

| Parametr | Veličina | Jednotka | EO 2000 | EO5000 | EO 10 000 |
|------------------------------------------------------------|-------------|-----------------------|---------|---------|-----------|
| Průtok vzduchu | V_{VZD} | $m^3 \cdot hod^{-1}$ | 1055,43 | 2675,74 | 5380,07 |
| Air Faktor | af | | 13 | 13 | 13 |
| Free Air Delivery | FAD | $Nm^3 \cdot min^{-1}$ | 19,13 | 48,50 | 97,51 |
| Izoentropický příkon | P_{ie} | kW | 90,54 | 229,55 | 461,55 |
| Izoentropická účinnost | η_{ie} | % | 68,59 | 91,82 | 73,26 |
| Celková účinnost | η_c | % | 93 | 93 | 93 |
| Celkový příkon | P_c | kW | 97,36 | 246,83 | 496,29 |
| Měrná spotřeba energie (na normálový metr O ₂) | ψ | $kWh \cdot Nm^3 O_2$ | 3,46 | 2,59 | 3,24 |

Tabulka 23 Technické parametry pro vybrané kompresory v PSA jednotce převzato z [42]

| Pro model | | | EO 2 000 | EO 5 000 | EO 10 000 |
|-------------------|------------|-----------------------|------------------------------------|-------------|-----------------------------|
| Parametr | Veličina | Jednotka | Typ kompresoru dle katalogu Kaeser | | |
| | | | DSD-240 | FSD 475 SFC | FSD 575 SFC ^(*1) |
| Provozní přetlak | $p^{(*2)}$ | Bar | 8,5 | 8,5 | 8,5 |
| Dodávané množství | V | $Nm^3 \cdot hod^{-1}$ | 25,15 | 49,8 | 59,83 |
| Jmenovitý výkon | P | kW | 132 | 250 | 315 |

Poznámka: ^{*1} Hodnota odpovídá provoznímu tlaku dodávanému kompresorem. V adsorbčních kolonách bude tlak snížen o celkové tlakové ztráty. ^{*2} Pro model EO 10 000 byly zvoleny dva kompresory. Hodnoty v tabulce jsou pouze pro jeden.

13.2 Návrh kondenzační sušičky

Dalším důležitým zařízením je kondenzační sušička. Kondenzační sušička vzduchu odstraňuje vlhkost ze vstupního vzduchu a také stlačený vzduch ochlazuje. Se zvyšující se teplotou klesá totiž adsorpční selektivita. Proto je vhodné PSA jednotky udržovat na nízkých teplotách a vysokých tlacích.

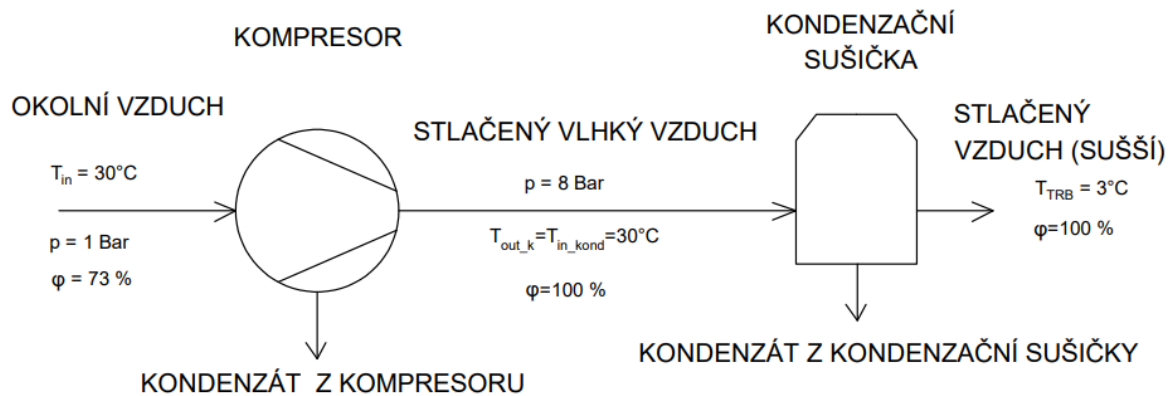
Kondenzační sušička chladí vzduch pod teplotu tlakového rosného bodu. Teplota tlakového rosného bodu určuje, kdy se páry ve vzduchu za daného tlaku začnou kondenzovat. Výrobce vybrané kondenzační sušičky uvádí že $T_{TRB} = +3^\circ C$. Odvedený tepelný výkon se vypočte dle rovnice (81). [8]

$$\dot{Q} = m_{s,vz} \cdot (h_1(T_1, x_1) - h_2(T_2, x_2)) \quad , \quad (81)$$

kde h_{in} a h_{out} jsou měrné entalpie vzduchu před sušením pro teplotu $T_1=30^\circ C$ a stavu 2 po sušení $T_2 = 3^\circ C$. Hodnoty entalpií se stanoví z rovnice (82) převzaté od Ditla a Šulce [8], kde $c_{p,s,vz}$ je měrná tepelná kapacita suchého vzduchu, c_{p,H_2O} je hodnota měrné tepelné kapacity je pro vodní páry, l_{v,H_2O} je výparné teplo potřebné na změnu fáze.

$$\begin{aligned} h_i &= c_{p,s,vz} \cdot T_i + x_{H_2O} (c_{p,H_2O} \cdot T_i + l_{v,H_2O}) \\ &= 1,01 \cdot T_i + x_{H_2O} (1,84 \cdot T_i + 2500) \end{aligned} \quad (82)$$

Na vstupu do kompresoru je vlhký vzduch. Pro náš případ předpokládám průměrnou relativní vlhkost okolního vzduchu $\varphi = 73\%$. Bilance kondenzace vlhkosti v kompresoru a kondenzační sušičce byla vypočtena na základě schéma na **Obrázek 37**.



Obrázek 37 Bilance kondenzační sušičky

Specifická vlhkost x_{H_2O} se vypočte z rovnice (83).

$$x_{H_2O} = \frac{M_{H_2O}}{M_{s,vzd}} \cdot \frac{\varphi \cdot p_{H_2O}''}{(p - \varphi \cdot p_{H_2O}'')} \quad (83)$$

Pro určení tlaku sytých par byl využit vztah (viz. rovnice (84))¹⁴.

$$p_{H_2O}'' = e^{77,34 - \frac{7235}{273,15+T} - 8,2 \cdot \ln T + 0,0055711 \cdot T} = p_{H_2O}'' [Pa] \quad (84)$$

Hmotnostní průtok suchého vzduchu za předpokladu, že se vzduch bude chovat jako ideální plyn, se vypočte pomocí stavové rovnice:

$$m_{s,vz} \dot{=} = \frac{p \cdot \dot{V}_{v,vzd} \cdot M_{s,vzd}}{R \cdot T} \cdot \left(M_{s,vzd} \cdot \left(\frac{M_{H_2O}}{x_{H_2O}} + 1 \right) \right) \quad (85)$$

Množství kondenzátu odseparované ze stlačeného vzduchu je potom definováno jako množství vodní páry zkondenzované v kompresoru a množství vodní páry zkondenzované v sušičce viz. rovnice (86):

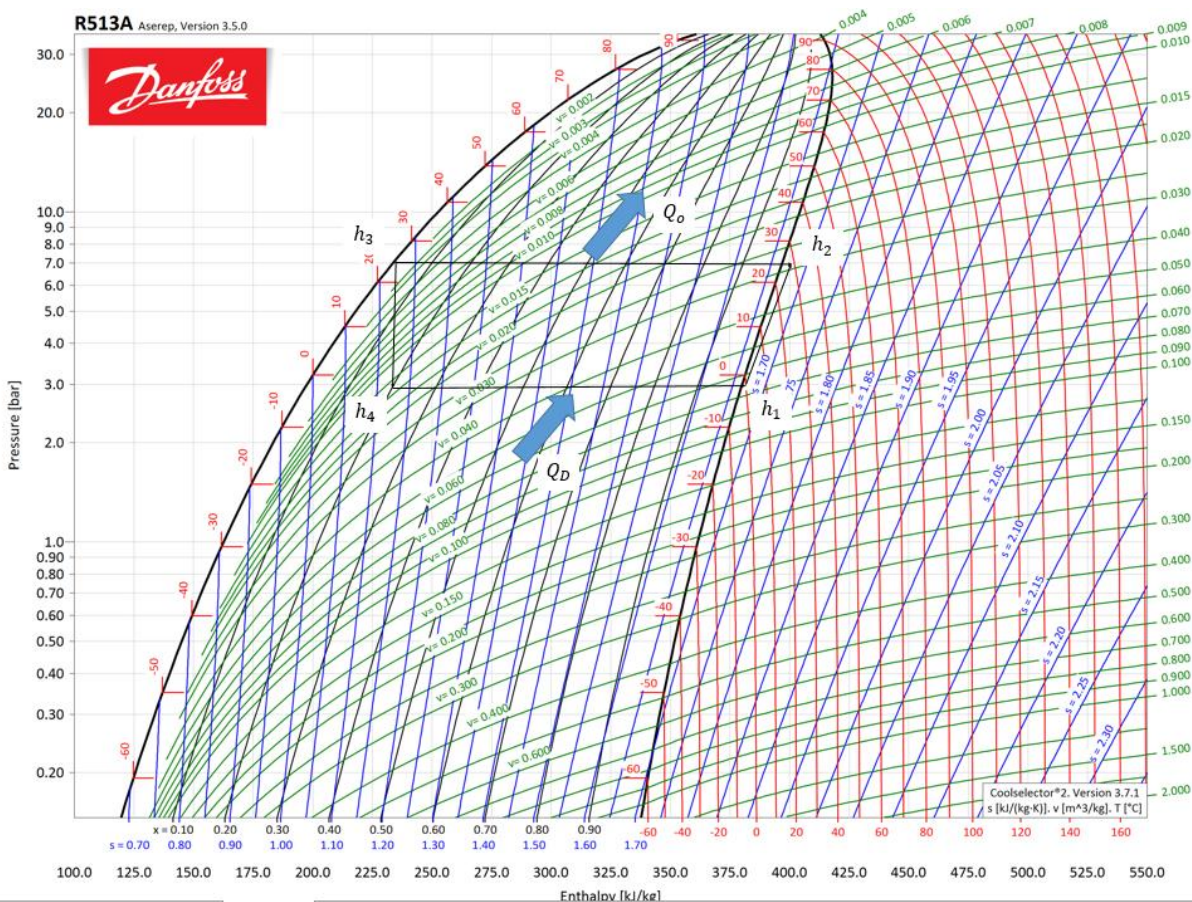
$$m_{H_2O} \dot{O}_{out} = m_{H_2O} \dot{O}_K - m_{H_2O} \dot{O}_{kond} \quad (86)$$

¹⁴ Zdroj: https://www.engineersedge.com/calculators/water_vapor_saturation_pressure_15730.htm

Poslední krok je určení potřebného elektrického výkonu kompresoru sušičky $P_{suš}$ [kW]. Pro výpočet je potřeba stanovit účinnost kompresoru a mechanických komponentů, entalpie pro jednotlivé stavy cyklu a průtok chladiva. Průtok chladiva je dán celkovým chladícím výkonem sušičky a rozdílem entalpií na sání kompresoru h_1 a za škrtícím ventilem h_4 při dolním tlaku $p_d = 3$ Bar. Entalpie h_2 popisuje stav chladiva po stlačení na horní pracovní tlak $p_h=8$ Bar, a stav 3 popisuje chladivo po průchodu kondenzátorem chladiva.

$$P_{suš} = \frac{\dot{Q}}{\eta_C} \dot{m}_{ch} \left(\frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_4} - 1 \right) \quad (87)$$

Pro odečet entalpií byl použit p-h diagram pro chladivo R513A od společnosti Danfoss viz. **Graf 16**.



Graf 16 Log p – h diagram chladiv R-513a [35]

Analogicky k výběru kompresoru byly vybrány kondenzační sušičky vzduchu od stejného výrobce Kaeser. Vypočtená data pro kondenzační sušičky Kaeser Secotec jsou uvedeny v **Tabulka 24** a **Tabulka 25**.

Tabulka 24 Data pro kondenzační sušičky společnosti Kaeser [36]

| Kondenzační sušičky Kaeser Secotec | | | 2 000 EO | 5 000 EO | 10 000 EO |
|-------------------------------------------------|-------------------|-----------------------------------|----------|----------|-----------|
| | | | TF 230 | TG 650 | TG 980 |
| Parametr | Označení | Jednotka | Hodnoty | | |
| Dodávané množství vzduchu | V | m ³ .min ⁻¹ | 23 | 65 | 99 |
| Tlaková ztráta kondenzační sušičky | Δp | bar | 0,15 | 0,12 | 0,25 |
| Příkon pro 100 % obj. | P | kW | 2,2 | 4,83 | 9,82 |
| Přetlak | P _p | Bar | 3 až 16 | 3 až 13 | |
| Chladivo | ch | | R-513a | R-513a | R-513a |
| Teplota stlačeného vstupního vzduchu | T _{in} | °C | 30 | 30 | 30 |
| Teplota stlačeného výstupního vzduchu | T _{out} | °C | 3 | 3 | 3 |
| Korekční faktory pro přetlak (p = 8 Bar) | k _p | - | 1,05 | 1,05 | 1,05 |
| Korekční faktory pro stlačený vzduch (T = 30°C) | k _T | - | 1 | 1 | 1 |
| Celkový faktor | k _{fc} | - | 1,05 | 1,05 | 1,05 |
| Maximální dodávané množství | V _{pmax} | m ³ .min ⁻¹ | 24,15 | 68,25 | 103,95 |

Tabulka 25 Technická specifikace a výsledné hodnoty bilance kondenzační sušičky

| Kondenzační sušičky Kaeser Secotec | | | 2 000 EO | 5 000 EO | 10 000 EO |
|------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------|----------|------------|-----------|
| | | | TF 230 | TG 520 | TG 980 |
| Parametr | Označení | Jednotka | Hodnoty | | |
| Dodávané množství vzduchu | m _{s,vz} | kg.min ⁻¹ | 0,41 | 1,04 | 2,09 |
| Tlak sytých par vodních par | p ["] _{H2O,in} | kPa | | 4,2240 | |
| Tlak sytých par vodních par | p ["] _{H2O,out} | kPa | | 0,7543 | |
| Specifická vlhkost na sání do kompresoru | x _{H2O,in} | kg H ₂ O.kg ⁻¹ _{s,vz} | | 0,00241 | |
| Specifická vlhkost na výstupu ze sušičky | x _{H2O,out} | kg H ₂ O.kg ⁻¹ _{s,vz} | | 0,00000587 | |
| Měrná entalpie na vstupu | h ₁ | kJ.kg-1 | | 2807,52 | |
| Měrná entalpie na výstupu | h ₂ | kJ.kg-1 | | 2778,91 | |
| Průtok odváděného kondenzátu | m _{H2O,out} | kg H ₂ O.hod ⁻¹ | 28,95 | 73,41 | 147,60 |
| Tlaková ztráta kondenzační sušičky | Δp | bar | 0,11 | 0,12 | 0,25 |
| Celkový tepelný výkon | Q _C | kW | 11,74 | 29,77 | 59,85 |
| Teplo odvedené z chladicího zařízení | Q _O | kW | 13,67 | 34,65 | 69,67 |
| Teplo dodané do výparníku | Q _D | kW | 12,33 | 31,25 | 62,84 |
| Příkon kompresoru | P _K | kW | 1,34 | 3,40 | 6,83 |
| Příkon motoru | P _M | kW | 2,29 | 4,47 | 8,99 |
| Výkon | P | kW | 2,40 | 4,69 | 9,43 |
| Celková účinnost (EL + M) | η _C | % | 81,09 | 81,09 | 81,09 |

13.3 Návrh filtrace vzduchu pro PSA jednotku

Pro splnění požadované třídy čistoty stlačeného vzduchu ISO 8573-1, který vstupuje do adsorpčních kolon PSA jednotky, byly vybrány následující filtry z řad filtrů společnosti Kaeser [36]. Pro záchyt olejových par byl zvolen filtr s KA filtr s aktivním uhlím. Pro záchyt pevných částic a aerosolů byl vybrán hrubý koalescenční filtr basic (KB) a pro záchyt jemných částic byl vybrán koalescenční filtr extra (KE), který je pro ilustraci prezentován na **Obrázek 38**.



Obrázek 38 Filtr 530 KE převzato [36]

Filtry byly vybrány z katalogu výrobce pro hodnoty průtoku vzduchu V_f a pro zvolený pracovní tlak $p_p = 8$ Bar (g). Dále je uveden celkový korekční faktor k_{fc} dle pracovního tlaku a přepočtený objemový průtok po průchodu všemi filtry V_{kor_f} dle rovnice (88). Pro

$$\dot{V}_{kor_f} = k_{fc} \cdot \dot{V}_f \quad (88)$$

Parametry vybraných filtrů pevných částic KB, KE a oleje KA byly vybrány na základě potřebných průtoků jsou uvedeny v **Tabulce 26**.

Tabulka 26 Parametry filtrů pevných částic a oleje pro PSA jednotku [36]

| Pro model | | | EO 2000 | EO5000 | EO 10 000 |
|----------------------------------------------------------------|-----------------|----------------------|----------------------------------------------|-------------------|--------------------|
| Parametr | Veličina | Jednotka | Typ filtru z katalogu Kaeser ^{(*)1} | | |
| | | | F 250 KB/KE/KA | F 530 KB/KE/KA | F 1060 KB/KE/KA |
| Dodávané množství vzduchu | V_{vzd} | $m^3 \cdot min^{-1}$ | 19,13 | 48,50 | 97,51 |
| Katalogový průtok | V_f | $m^3 \cdot min^{-1}$ | 25 | 53,1 | 106,2 |
| Pracovní tlak | p_p | Bar(g) | | 2 až 16 | |
| Teplota okolního vzduchu | T_{ok} | °C | | 3 až 50 | |
| Celkový korekční faktor tlaku ($p_p = 8$ Bar) ^{(*)2} | k_f | - | | 1,06 | |
| Zkorogiovaný dodávaný průtok ^{(*)3} | V_{kor_f} | $m^3 \cdot min^{-1}$ | 20,28 | 51,40 | 103,36 |
| Celkový zkorogiovaný průtok pro filtraci ^{(*)4} | $V_{kor_f_c}$ | $m^3 \cdot min^{-1}$ | 22,78 | 57,76 | 116,13 |

Poznámka: ^{(*)1} Pro filtraci stlačeného vzduchu jsou zapotřebí tři filtry. V tabulce jsou hodnoty pro KB, KE, a KA filtry katalogu shodné provozními parametry. ^{(*)2} Pro provozní tlak 8 Bar má každý z filtrů stejný korekční faktor 1,06. Tato hodnota je výsledný faktor pro všechny tři filtry pro daný model. ^{(*)3} Průtok vypočten pro jednotlivé filtry. ^{(*)4} Celkový zkorogiovaný průtok pro všechny filtry z (př.: F 250 KB + F 250 KE + F 250 KA).

13.4 Aerace kyslíkem z PSA jednotky – shrnutí

Vypočtená data měrné spotřeby elektrické energie a roční provozní náklady na provoz PSA jednotky jsou uvedena pro tři uvažované velikosti ČOV souhrnně v **Tabulce 27**.

Po sečtení hodnot instalovaného příkonu všech zařízení je vidět, že jsou tyto hodnoty násobně vyšší než u pneumatické aerace vzduchem.

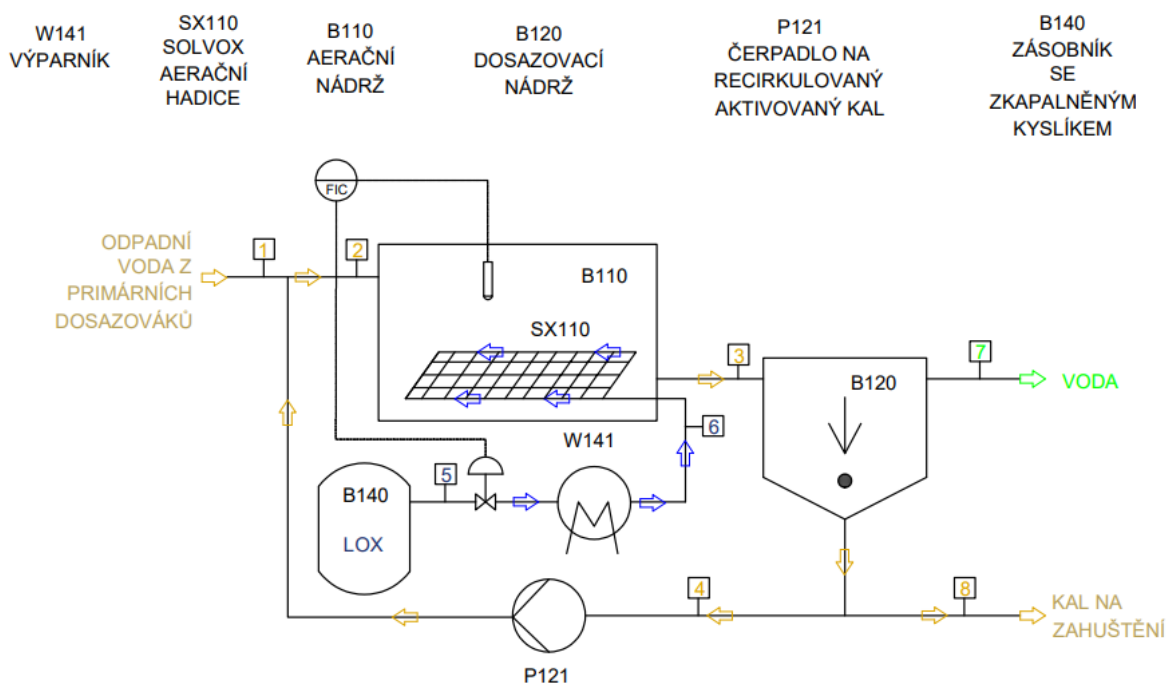
Tabulka 27 Souhrnná energetická náročnost PSA jednotky

| Parametr | Veličina | Jednotka | EO 2 000 | EO 5 000 | EO 10 000 |
|-------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|--------------|--------------|---------------|
| Celkový instalovaný výkon | P_c | kW | 135,15 | 256,19 | 641,63 |
| Energetická spotřeba PSA jednotky ^(*1) | | kWh | 93,70 | 235,74 | 473,18 |
| Cena silové elektřiny za 1kWh (Říjen 2023) - bez distribuce | N_{el} | Kč.kWh ⁻¹ | | 3,58 | |
| Specifická spotřeba | 1 Nm ³ vzduchu | kWh.Nm ⁻³ | 12,25 | 12,34 | 12,36 |
| energie | 1 m ³ odpadní vody | kWh.m ⁻³ ov | 5,35 | 5,39 | 5,41 |
| vztahovaná na | kg O ₂ | kWh.kg ⁻¹ O ₂ | 5,57 | 5,32 | 5,18 |
| | 1Nm ³ O ₂ | kWh.Nm ⁻³ O ₂ | 5,51 | 5,47 | 5,46 |
| Provozní roční náklady (pro 345 denní provoz) | N_p | Kč | 2 779 464 Kč | 6 992 984 Kč | 14 036 498 Kč |

Poznámka: ^{*1} Celková spotřeba pouze pro provoz PSA jednotky.

14 Varianta – aerace zaváženým kapalným kyslíkem

Schéma pro variantu aerace aktivační nádrže kyslíkem zaváženým z velké ASU jednotky je uvedeno na **Obrázek 39**.



Obrázek 39 Návrh P&ID schéma varianty aerace zaváženým kapalným kyslíkem

Specifikace tanků pro skladování kapalného kyslíku a jejich technické parametry jsou pro různé velikosti ČOV uvedeny v **Tabulce 28**. Pro skladování potřebného množství kyslíku byly voleny vertikální tanky z katalogu společnosti Chart Ferro [37].

Stanovení energetické spotřeby této varianty je komplexnější. Pro srovnání různých zdrojů kyslíku je třeba zahrnout i samotnou produkci kapalného kyslíku kryogenní destilací vzduchu

v ASU jednotce. Je potřeba přihlídnout k faktu, že produktem ASU jednotky jsou z velké části kapalný nebo plynný dusík a také kapalný argon a to podle uspořádání ASU jednotky. Z toho důvodu, jak bylo uvedeno v kapitole 9.1.1, byla pro výpočet použita referenční hodnota specifické spotřeby energie na výrobu kyslíku v ASU jednotce $\psi_{ASU} = 0,638 \text{ kWh} \cdot \text{kg}^{-1} \text{O}_2$ převzata z EIGA reportu [15]. Transport do položky energetické spotřeby nebyl zahrnut. Transport se ale podílí na OPEX nákladech. Poslední položkou je spotřeba energie na řízení odpařovačů a ventilů, které jsou potřeba pro zplynění kapalného kyslíku z nádrže LOX a dávkování do aeračních hadic. Tato energie byla vypočtena pomocí uváděné specifické energií na řízení a odpaření $\psi_{LOX} = 0,5 \text{ kWh} \cdot \text{kg}^{-1} \text{O}_2$. [8]

Tabulka 28 Technické parametry LOX technologie pro různé velikosti ČOV vybrané z katalogu Chart Ferox [37]

| Pro Model | | | EO 2 000 | EO 5 000 | EO 10 000 ^(*) |
|-------------------------------------------------------------------|------------------------|---------------------------------------------------|----------|----------|--------------------------|
| Parametr | Označení | Jednotka | Hodnoty | | |
| Průtok kyslíku (100%) | V_{O_2} | $\text{Nm}^3 \text{O}_2 \cdot \text{h}^{-1}$ | 18,25 | 46,26 | 93,02 |
| LOX hmotnostní průtok | m_{O_2} | $\text{kg O}_2 \cdot \text{h}^{-1}$ | 24,28 | 61,55 | 123,75 |
| LOX měsíční spotřeba | S_{mO_2} | $\text{tun}_{\text{O}_2} \cdot \text{měsíc}^{-1}$ | 17,48 | 44,31 | 89,10 |
| Zvolená nádrž | VT | | VT 21 | VT 31 | VT 43 |
| Objem nádrže | V | l | 20 250 | 32 080 | 44 030 |
| Množství kyslíku (pro 95% zaplnění, pro 18 bar) | m_{O_2} | tun LOX | 21,97 | 34,81 | 47,77 |
| Průměr nádrže | D | mm | 2 100 | 2 500 | 2 500 |
| Výška tanku | H | mm | 10 440 | 11 760 | 15 420 |
| Provozní tlak v tanku | p_p | Bar | 18 | 18 | 18 |
| Maximální možný průtok plynného kyslíku na výstupu pro daný p_p | V_{max} | $\text{Nm}^3 \text{O}_2 \cdot \text{h}^{-1}$ | 590 | 670 | 670 |
| Předpokládaná vzdálenost pro transport LOX | s | km | 150,00 | 150,00 | 150,00 |
| Frekvence dovozů (maximální kapacita cisterny 15 tun LOX) | f | 1/měsíc | 2,00 | 3,00 | 6,00 |
| Spotřeba elektřiny na řízení dávkování a odpařování | ψ_{de} | $\text{kWh} \cdot \text{kg}^{-1}$ | | 0,50 | |
| Spotřeba energie na výrobu 1kg LOX | ψ_{LOX} | $\text{kWh} \cdot \text{kg}^{-1}$ | | 0,638 | |
| Počet pracovních hodin do roka | | $\text{hod} \cdot \text{rok}^{-1}$ | 8760,00 | 8760,00 | 8760,00 |
| Hodinová spotřeba na řízení dávkování a odpařování LOX do AN | $\psi_{\text{h_LOX}}$ | $\text{kWh} \cdot \text{h}^{-1}$ | 12,14 | 30,77 | 61,88 |
| Hodinová spotřeba energie ASU | $\psi_{\text{h_ASU}}$ | $\text{kWh} \cdot \text{h}^{-1}$ | 15,49 | 39,27 | 78,95 |
| Celková hodinová spotřeba energie | ψ_c | $\text{kWh} \cdot \text{h}^{-1}$ | 27,63 | 70,04 | 140,83 |

Poznámka: ^{*}1 Tank na LOX pro variantu EO 10 000 volím z důvodu kapacity a množství 2x.

14.1 Aerace se zaváženým kyslíkem – shrnutí

Vypočtená data spotřeby elektrické energie a odhad ročních provozních nákladů potřebný na chod aktivace a aeraci zaváženým kyslíkem jsou uvedena pro tři uvažované velikosti ČOV souhrnně v **Tabulce 29**. Na první pohled jsou hodnoty spočítané pro tuto variantu výrazně nižší v porovnání s variantou s PSA jednotkou. Je zde ale spousta neznámých, které tato studie nezapočítala. Pro reálný příklad by bylo potřeba znát přesnou vzdálenost dopravy dováženého kyslíku a její ceny. Další položkou, která bude ovlivňovat náklady, je nádrž na LOX. Je otázkou, zda by se vyplatila ČOV vlastnit a kupovat nádrž na LOX anebo si jí nechat pouze pronajímat a za jakou cenu. Tato data nejsou veřejně dostupná. Společnosti tímto se zabývající tuto hodnotu nesdílejí. Podobně také nejsou dostupné skutečné energetické spotřeby pro výrobu kapalného kyslíku nebo marže při prodeji kapalného kyslíku. Proto byla použita data EIGA reportu pro energetickou spotřebu ASU a ekonomické studie Šulc et. al. pro spotřebu na dávkování LOX.

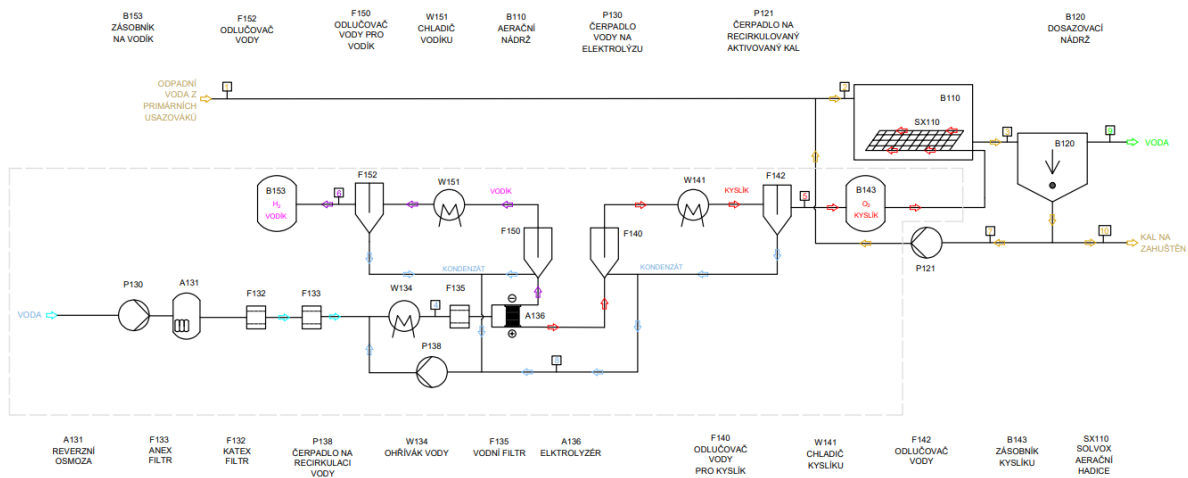
Tabulka 29 Souhrnná data pro variantu zaváženého kyslíku

| Parametr | Veličina | Jednotka | EO 2 000 | EO 5 000 | EO 10 000 |
|-------------------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Energetická spotřeba na hodinu provozu LOX jednotky | | kWh | 27,63 | 70,04 | 140,83 |
| Cena silové elektřiny za 1kWh (Říjen 2023) | N_{el} | Kč | | 3,58 | |
| Specifická spotřeba | 1 Nm ³ vzduchu | kWh.Nm ⁻³ | - | - | - |
| energie | 1 m ³ odpadní vody | kWh.m ⁻³ _{OV} | 1,58 | 1,60 | 1,61 |
| vztážená na | kg O ₂ | kWh.kg ⁻¹ O ₂ | 1,14 | 1,14 | 1,14 |
| | 1 Nm ³ O ₂ | kWh.Nm ⁻³ O ₂ | 1,51 | 1,51 | 1,51 |
| Provozní roční náklady (pro 345 denní provoz) ^{*1} | N_{ASU} | Kč | 819 520 Kč | 2 077 657 Kč | 4 177 518 Kč |
| Provozní náklady spojené z transportem kyslíku | N_{trans} | Kč | 606 389 Kč | 1 537 324 Kč | 3 091 078 Kč |
| Celkové náklady na dovážení kyslík | N_C | Kč | 1 425 909 Kč | 3 614 981 Kč | 7 268 596 Kč |

Poznámka: ^{*1} V provozních nákladech jsou zahrnuté také náklady na přepravu kyslíku počítám jako 0,118 Eur. tuna O₂ – Tyto údaje jsou převzaty ze studie Šulc et al. [8] a přepočítány kurzem 1 EUR – 24,7 Kč (29.12.2023)

15 Varianta – aerace kyslíkem z elektrolyzáru

Schéma pro variantu aerace aktivací nádrže kyslíkem z elektrolyzáru je uvedeno na **Obrázku 40**.



Obrázek 40 Návrh P&ID schéma varianty aerace kyslíkem z elektrolyzáru

Byly zvoleny PEM elektrolyzéry společnosti NEL. Technické specifikace elektrolyzérů vybraných pro různé velikosti ČOV jsou uvedeny v **Tabulce 30**. Na základě provozních parametrů bylo stanoveno celkové množství energie spotřebované na výrobu vodíku, resp. kyslíku. Jak bylo uvedeno, záměrem je využít kyslík vypouštěný při elektrolytické výrobě vodíku. Z toho důvodu byla katalogová spotřeba energie rozdělena dle stechiometrie na část potřebnou pro výrobu kyslíku a na část pro výrobu vodíku. Z rovnice (89) vyplývá, že z 1 mol vody se získá 1 molu vodíku a 0,5 molu kyslíku.



Tabulka 30 Technická specifikace vybraných elektrolyzérů pro různé velikosti ČOV převzato [38]

| NEL PEM ELECTROLYZER | | | EO 2 000 | EO 5 000 | EO 10 000 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|------------|
| | | | NEL C20 ^{*1} | NEL C30 ^{*2} | NEL MC 250 |
| Parametr | Označení | Jednotka | Hodnota | | |
| Objemový průtok vodíku na výstupu | V _{H2} | Nm ³ .H ₂ .hod ⁻¹ | 40,00 | 90,00 | 246,00 |
| Hmotnostní průtok vodíku na výstupu | m _{H2} | kg.H ₂ .hod ⁻¹ | 3,58 | 8,13 | 22,13 |
| Objemový průtok kyslíku na výstupu | V _{O2} | Nm ³ .O ₂ .hod ⁻¹ | 20,08 | 45,27 | 123,97 |
| Objemový průtok kyslíku na výstupu | m _{O2} | kg.O ₂ .hod ⁻¹ | 28,67 | 65,00 | 177,00 |
| Spotřeba energie ^{*3} | | kWh | 240,00 | 522,00 | 1107,00 |
| Měrná spotřeba energie na Nm ³ vodíku | ψ _{H2} | kWh.Nm ⁻³ H ₂ | 6,00 | 5,80 | 4,50 |
| Spotřeba energie stechiometricky rozdělena (H ₂ /O ₂) ^{*4} | ψ _{H2} /ψ _{O2} | kWh H ₂ / kWhO ₂ | 160/80 | 348/174 | 738/369 |
| Měrná spotřeba vody | | 1.Nm ⁻³ H ₂ | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| Spotřeba vody | V _{H2O} | l.hod ⁻¹ | 36,00 | 81,00 | 221,40 |
| Typ Elektrolytu | ELE | | PEM (Polymer Electrolyte Membrane) | | |
| Koncentrace kyslíku ve výstupním proudu H ₂ | c _{O2} | PPM | | <1 | |
| Koncentrace vody ve výstupním proudu H ₂ | c _{H2O} | PPM | | <5 | |
| Teplota vody v elektrolyzéro | T _{H2O,ELE} | °C | | 90 | |

Poznámky: ^{*1} Pro získání dostatečného množství kyslíku není v katalogu vhodný ekvivalent jednoho zařízení, proto jsou technická data převzata jako dvojnásobek elektrolyzéro NEL 20, aby byla pokryta dodávka kyslíku. ^{*2} Pro získání dostatečného množství kyslíku není v katalogu vhodný ekvivalent jednoho zařízení, proto jsou technická data převzata jako trojnásobek elektrolyzéro C30, aby byla pokryta dodávka kyslíku. ^{*3} Hodnota této energie byla stanovena jako součin potřebného množství vodíku a katalogové spotřeby energie na kg H₂. ^{*4} Tyto hodnoty odpovídají hypotéze stechiometrického rozdělení energetické spotřeby tj. 1 mol H₂O = 1 mol H₂ + 0,5 molu O₂.

15.1 Aerace kyslíkem z elektrolyzy – shrnutí

Vypočtená data spotřeby elektrické energie a odhad ročních provozních nákladů potřebný na chod aktivace a aeraci kyslíkem z elektrolyzy jsou uvedena pro tři uvažované velikosti ČOV souhrnně v **Tabulce 31**.

Tabulka 31 Souhrnná data pro variantu aerace kyslíkem z elektrolyzy

| Parametr | Veličina | Jednotka | EO 2 000 | EO 5 000 | EO 10 000 | |
|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------|---------------|-------|
| Celková energetická spotřeba ^{*1} | | kWh | 240 | 522 | 1107 | |
| | 1m ³ odpadní vody | kWh.m ⁻³ _{OV} | 13,71 | 13,15 | 12,65 | |
| | kg O ₂ | kWh.kg ⁻¹ O ₂ | 8,37 | 8,03 | 6,25 | |
| Specifická spotřeba energie vztážená na | $\frac{\text{kg H}_2}{1\text{m}^3 \text{ odpadní vody}^{*2}}$ | ξ _i | kWh.kg ⁻¹ H ₂ | 66,98 | 64,25 | 50,03 |
| | kg O ₂ ^{*2} | | kWh.kg ⁻¹ O ₂ | 2,79 | 2,68 | 2,08 |
| | kg H ₂ ^{*2} | | kWh.kg ⁻¹ H ₂ | 44,65 | 42,83 | 33,36 |
| Cena silové elektřiny za 1kWh (Říjen 2023) | N _{el} | Kč | | 3,58 | | |
| Cena za 1 kg vodíku ^{*3} | N _{H2} | Kč | | 278 | | |
| Náklady na elektřinu celkem (pro 345 denní provoz) | N _{c_el} | Kč | 7 119 331 Kč | 15 484 545 Kč | 32 837 915 Kč | |
| Výnosy z prodaného vodíku ^{*4} | N _{H2} | Kč | 8 254 237 Kč | 18 716 003 Kč | 50 965 115 Kč | |

Poznámky: ^{*1} Katalog elektrolyzéro NEL typicky udává pouze energetickou spotřebu, instalovaný výkon nebyl uveden [38]. ^{*2} Tyto hodnoty odpovídají hypotéze stechiometrického rozdělení energetické spotřeby tj. 1 mol H₂O = 1 mol H₂ + 0,5 molu O₂. ^{*3} Pro bilanci provozních nákladů jsou uvažovány prodejní ceny vodíku, kterou poskytuje

*Unipetrol na vybraných čerpacích stanicích Cena $H_2 = 278$ Kč (27.října 2023). *4 Výnosy z prodaného vodíku je pouze množství předpokládaného vyrobeného vodíku vynásobené jeho cenou.*

16 Souhrn výsledků a posouzení variant

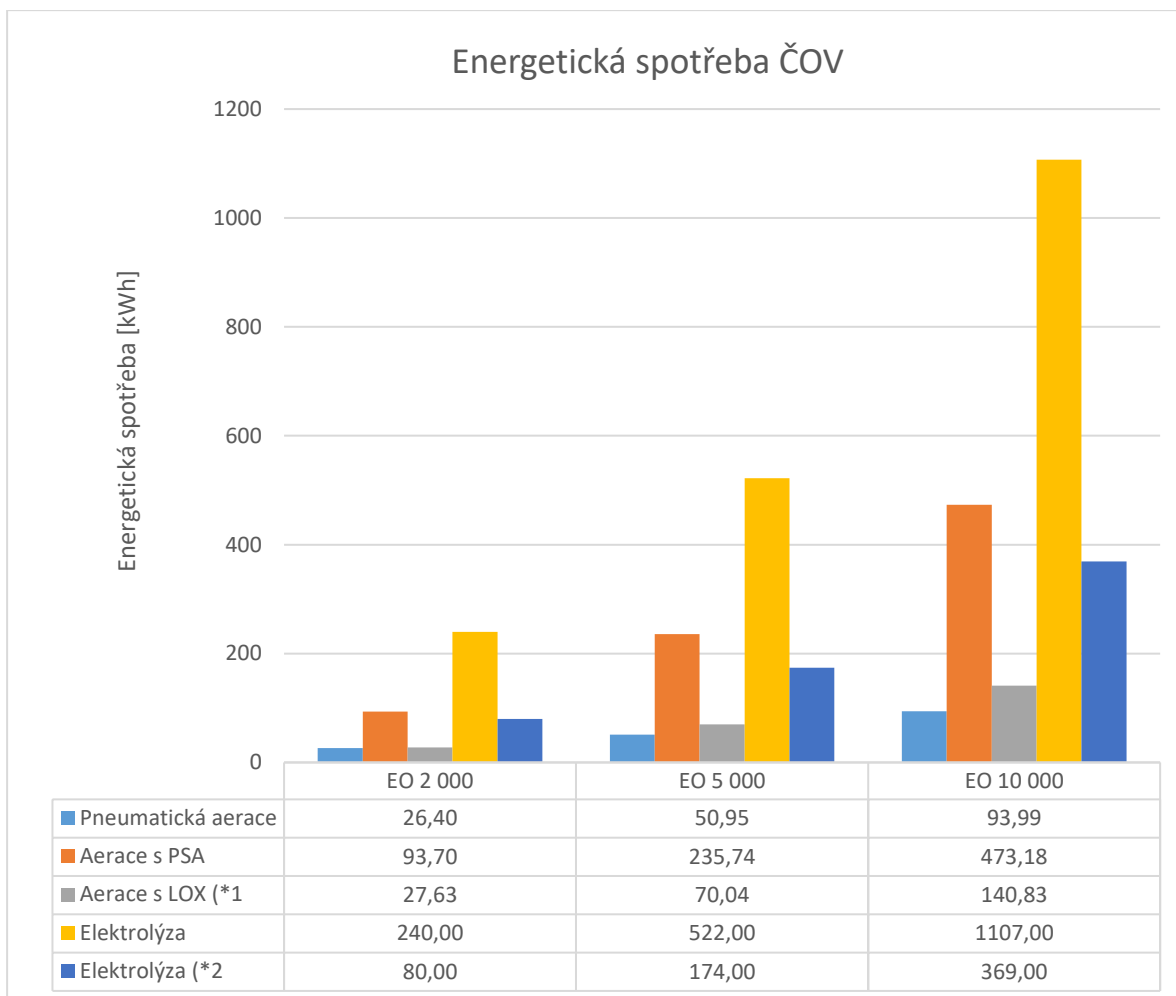
Srovnání-hodinové spotřeby elektrické energie pro různé zdroje kyslíku a různé velikosti ČOV je prezentováno na **Grafu 17**. Nejnižší spotřebu elektrické energie vykazuje varianta pneumatická aerace vzduchem, která je nejčastějším řešením v praxi.

Druhé místo v žebříčku energetické náročnosti zaujímá aerace kyslíkem zaváženého z velké ASU jednotky. Je však třeba poznamenat, že v tomto případě byla spotřeba elektrické energie získána odhadnuta přepočtem ze spotřeby kapalného kyslíku pomocí referenční hodnoty spotřeby elektrické energie potřebné pro výrobu kapalného kyslíku. Dále by měla být zohledněna energie vynaložená na transport samotného kyslíku a jeho přečerpávání.

V praxi je tato technologie aerace kyslíkem zaváženého z ASU jednotky používána v případech intenzifikace čistíren jako rychlé a zástavbově nenáročné řešení. Otázkou vždy bude cena za kg kyslíku, kterým dodavatel bude schopný zásobovat danou čistírnu. V případě zápočtu energie vložené do přepravy kyslíku, tato hodnota by se významně změnila. Podle autorů Šulc a Ditl [8] celkové náklady na kapalný kyslík činí více než 80 %, 0,5 % tvoří energie na dávkování kapalného kyslíku, a zbylá procenta tvoří jiné režijní náklady.

Třetí místo zaujímá aerace kyslíkem vyrobeným v PSA jednotce, která dosahuje až pětinasobných hodnot energetické spotřeby energie ve srovnání s klasickou pneumatickou aerací vzduchem. Energeticky nejnáročnější je výroba kyslíku elektrolýzou, kdy je spotřeba elektrické energie přiřazena pouze kyslíku. Je však třeba poznamenat, že záměrem bylo využít kyslík jinak vypouštěný do atmosféry při elektrolytické výrobě vodíku. Varianta „Elektro stecho“ vyjadřuje rozdělení spotřeby elektrické energie na kyslík a vodík podle stechiometrie tvorby. V tomto případě se tato varianta posune na třetí místo.

Srovnání měrné spotřeby elektrické energie vztahované na objem odpadní vody je pro různé zdroje kyslíku a různé velikosti ČOV prezentováno na **Grafu 18**.



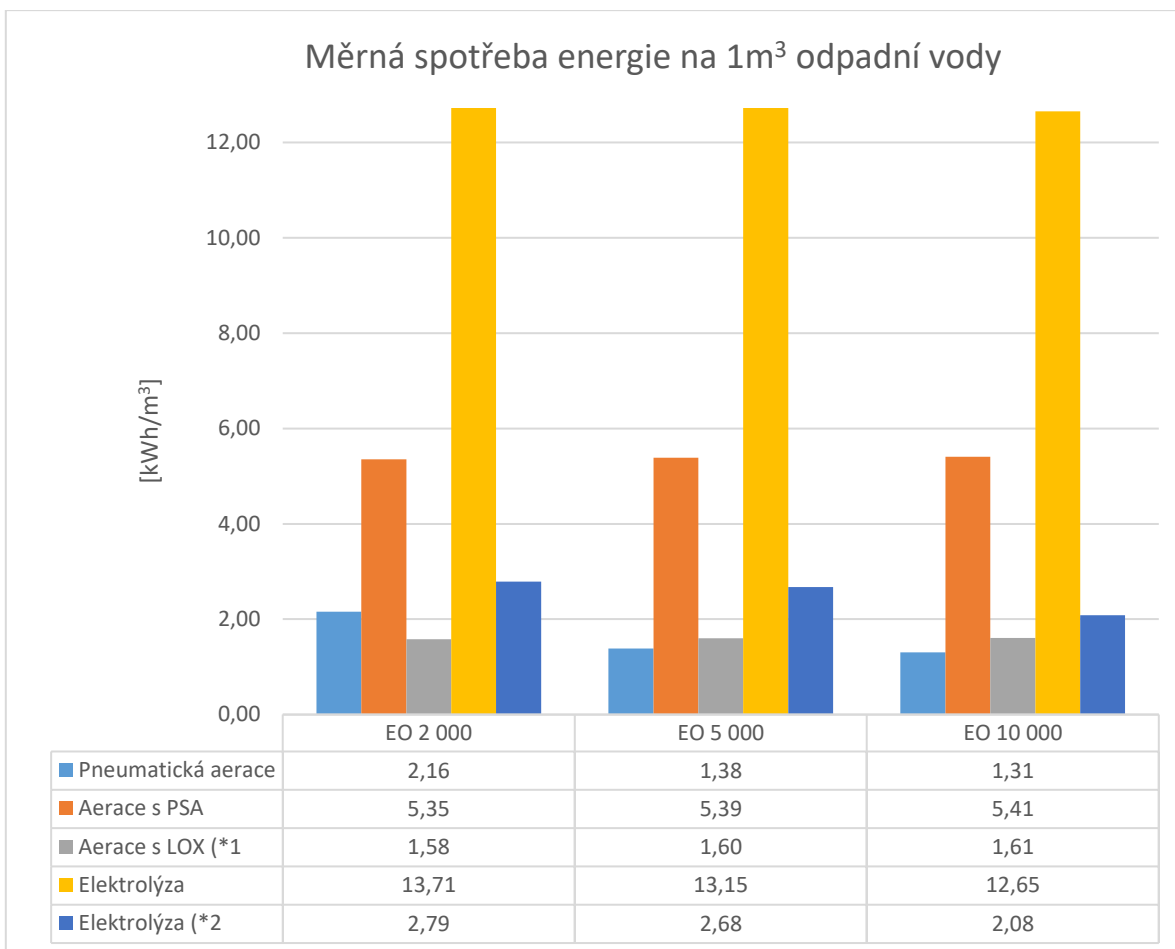
Graf 17 Graf výsledné energetické spotřeby pro různé zdroje kyslíku a různé velikosti ČOV

Poznámky: *¹ Tato hodnota odpovídá pouze spotřebě energie na výrobu kapalného kyslíku v ASU dle EIGA reportu [15] a spotřebě energie potřebné na dávkování kyslíku dle Šulce [8]. *² Z katalogových hodnot energetické spotřeby, celkový instalovaný výkon zařízení výrobce NEL [38] neudává. Uvedené hodnoty jsou vypočteny pro hypotézu stechiometricky rozdělené spotřeby energie.

Z hlediska měrné spotřeby energie jsou výsledky do značné míry protichůdné. Očekával jsem, že s rostoucím průtokem likvidovaných odpadních vod budou hodnoty měrné spotřeby energie úměrně klesat, jak je vidět v případě aerace vzduchem. Měrná spotřeba energie v případě výroby kyslíku pomocí PSA jednotky a v případě zaváženého kyslíku mírně stoupá s počtem ekvivalentních obyvatel resp. s přítokem OV. V případě elektrolytické výroby měrná spotřeba s velikostí čistírny klesá.

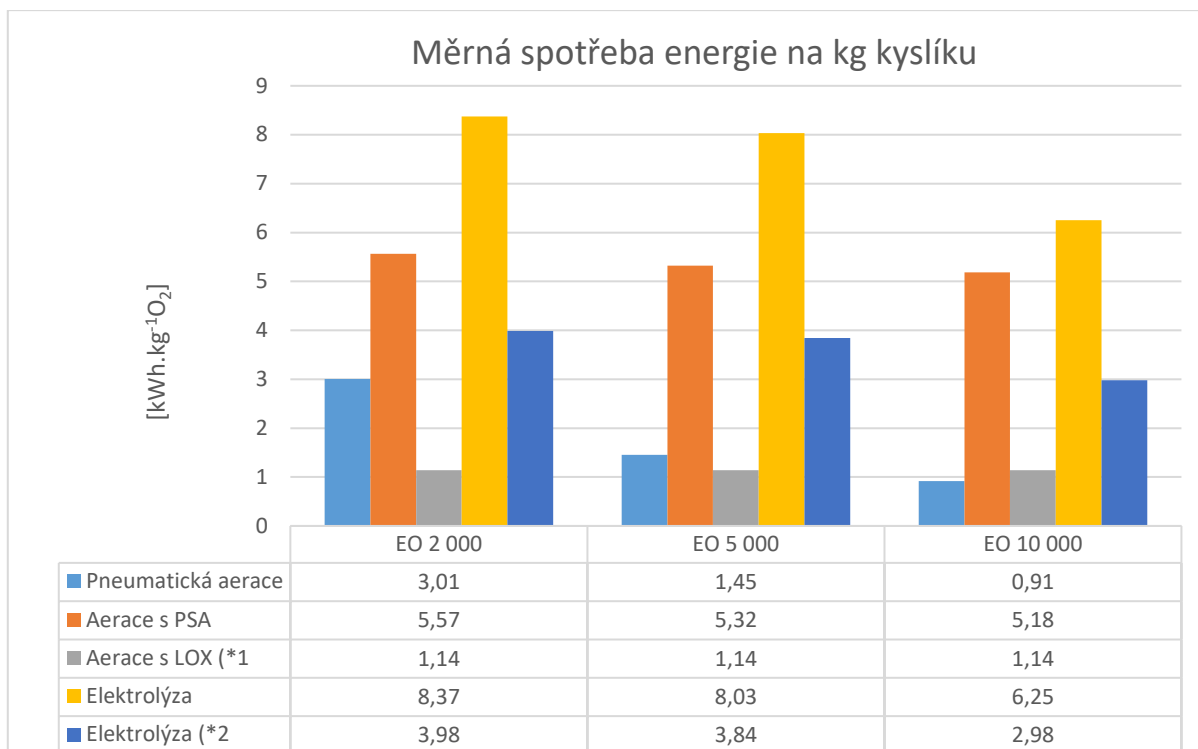
Na **Graf 19** je prezentováno srovnání měrné spotřeby elektrické energie vztažené na 1 kg dodaného kyslíku.

V tomto případě měrná spotřeba energie vztažená na kg vyrobeného kyslíku v případě pneumatické aerace vzduchem, elektrolytické výroby kyslíku a PSA jednotky klesá se zvyšujícím se průtokem odpadní vody. U varianty zaváženého kyslíku je hodnota měrné spotřeby energie stejná.



Graf 18 Měrná spotřeba elektrické energie vztahovaná na 1m³ vstupní OV pro různé zdroje kyslíku a různé velikosti ČOV

Poznámky: *¹ Tato hodnota zabírá pouze spotřebu energie na výrobu kapalného kyslíku v ASU dle EIGA reportu [15] a spotřebu energie potřebnou na dávkování kyslíku dle Šulce [8]. *² Hodnota měrné spotřeby energie vypočtena ze stechiometricky vyjádřené spotřeby energie vynaložené pouze na kyslík.



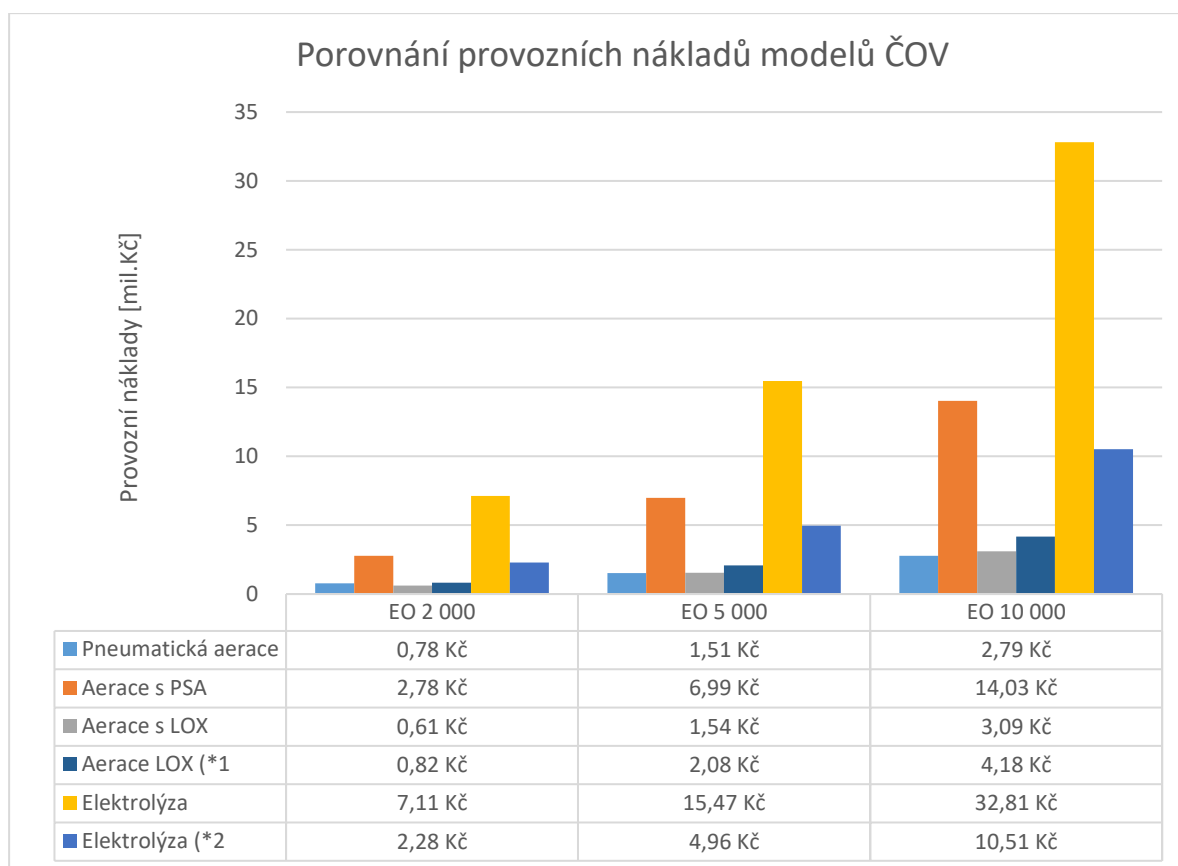
Graf 19 Měrná spotřeba elektrické energie vztahovaná na 1 kg kyslíku pro různé zdroje kyslíku a různé velikosti ČOV

Poznámky: ^{*1} Tato hodnota zabírá pouze spotřebu energie na výrobu kapalného kyslíku v ASU dle EIGA reportu [15] a spotřebu energie potřebnou na dávkování kyslíku dle Šulce [8]. ^{*2} Specifická spotřeba energie vyjádřená z pro stechiometricky vyjádřenou spotřebu energie vynaloženou pouze na kyslík.

17 Provozní náklady

V případě provozních nákladů byly uvažovány pouze náklady za elektřinu potřebnou pro chod zařízení. Klíčovým parametrem pro stanovení provozních nákladů je cena elektřiny za kWh. Pro výpočty byla použita cena silové elektřiny a její distribuce ve výši 3,44 Kč.kWh⁻¹ (Říjen 2023).

Srovnání ročních provozních nákladů pro různé zdroje kyslíku a různé velikosti ČOV je prezentováno na **Grafu 20**. Z grafu je zřejmé, že nejnižší náklady má klasická aerace vzduchem. Pro uvažované velikosti ČOV (EO 2 000, EO 5 000 a EO 10 000) jsou náklady pro zavážení kyslíkem od 5 do 50 % nákladů na aeraci vzduchem dle velikosti ČOV. V případě výroby kyslíku pomocí PSA jsou náklady 3,5 - 5 krát vyšší ve srovnání s aerací vzduchem dle velikosti ČOV. Obdobný průběh mají náklady v případě elektrolýzy. Jak však bylo uvedeno, tento zdroj se uvažuje v případě využití kyslíku jako vedlejšího produktu při výrobě vodíku.



Graf 20 Roční provozní náklady pro různé zdroje kyslíku a různé velikosti ČOV

Poznámky: *1 Do této hodnoty nákladů je navíc započtena orientační cena za dovoz kyslíku na 150 km dle Šulce [8] 0,118 Eur.tun⁻¹O₂. *2Hodnota odpovídá pouze nákladům na výrobu kyslíku vycházející ze stechiometricky rozdělených spotřeb energií.

Náklady na výrobu 1 kg dodaného kyslíku jsou uvedeny v **Tabulka 32**. Z dat vyplývá, že nejnižší náklady jsou v případě pneumatické aerace vzduchem. V případě dováženého kapalného kyslíku jsou ceny ve srovnání s aerací vzduchem cca čtyřnásobné.

Tabulka 32 Cena za kg vyrobeného produktu

| Parametr | Jednotka | 2000 EO | 5000 EO Hodnota | 10000 EO |
|--------------------------------------------------|------------------------------------|-----------|--------------------|-----------|
| Cena za kg vyrobeného kyslíku pneumatická aerace | Kč.kg ⁻¹ O ₂ | 0,53 Kč | 0,32 Kč | 0,19 Kč |
| Cena za kg vyrobeného kyslíku PSA jednotky | Kč.kg ⁻¹ O ₂ | 13,82 Kč | 13,71 Kč | 13,69 Kč |
| Cena za kg zavaženého kyslíku *1 | Kč.kg ⁻¹ O ₂ | 2,28 Kč | 2,28 Kč | 2,28 Kč |
| Cena za kg vyrobeného kyslíku z elektrolyzéry | Kč.kg ⁻¹ O ₂ | 35,39 Kč | 30,36 Kč | 32,02 Kč |
| Cena za kg vyrobeného vodíku *2 | Kč.kg ⁻¹ H ₂ | 239,78 Kč | 230,00 Kč | 179,12 Kč |
| Cena za kg vyrobeného kyslíku z elektrolyzéry *3 | Kč.kg ⁻¹ O ₂ | 11,34 Kč | 9,73 Kč | 10,26 Kč |
| Cena za kg vyrobeného vodíku *4 | Kč.kg ⁻¹ H ₂ | 159,85 Kč | 153,33 Kč | 119,41 Kč |

Poznámky: *1 U ceny zaváženého kyslíku nejsou zahrnuty náklady na přepravu kapalného kyslíku do nádrže. *2 Platí pouze pro výrobu vodíku bez spotřeby na výrobu kyslíku. *3Hodnoty jsou vypočtené pro náklady na výrobu 1

kg kyslíku vyplývajících ze stechiometricky rozdělené spotřeby energie ^{*4} Výše nákladů spojená výrobou 1kg vodíku za předpokladu stechiometricky rozdělené spotřeby energie.

Jak bylo uvedeno, elektrolyticky vyrobený kyslík se uvažuje v případě využití kyslíku jako vedlejšího produktu při výrobě vodíku. V **tabulce 33** jsou uvedeny náklady na elektrickou energii a výnos z prodeje vodíku. V případě větší ČOV pro 2 000, 5 000 a 10 000 EO výpočtem vychází za daných předpokladů zisk cca 1,1, 4,5, resp. 17,5 mil. Kč ročně.

Tabulka 33 Souhrn celkových ročních nákladů

| Náklady ^{*1} | Označení | Jednotka | 2 000 EO | 5 000 EO Hodnota | 10 000 EO |
|------------------------------------------------|------------------|----------|------------|---------------------|-------------|
| Pneumatická aerace | | Kč | 782 611 | 1 510 281 | 2 786 153 |
| PSA | | Kč | 2 777 451 | 6 987 921 | 14 026 334 |
| LOX ^{*2} | | Kč | 819 520 | 2 077 657 | 4 177 518 |
| Dovážený LOX ^{*3} | N _{c,i} | Kč | 606 389 | 1 537 324 | 3 091 078 |
| Elektrolýzér | | Kč | 7 114 176 | 15 473 333 | 32 814 137 |
| Kyslík z elektrolyzeru ^{*4} | | Kč | 2 278 656 | 4 956 077 | 10 510 301 |
| Výnos z vodíku ^{*5} | | Kč | 8 254 237 | 18 716 003 | 50 965 115 |
| Elektrolýzér – náklady na kyslík ^{*6} | | Kč | -1 140 061 | -3 242 670 | -18 150 978 |

Poznámky: ^{*1} Náklady jsou počítány pro 345 dní v roce. Zbylé dny jsou uvažovány pro případ údržby či nutné odstávky. ^{*2} U této hodnoty nejsou započteny náklady na přepravu kapalného kyslíku do nádrže. ^{*3} Platí se započtením uvažovaných nákladů na transport kyslíku dle Šulce [8] 0,188 Eur.tun⁻¹ O₂ ^{*4} Hodnoty jsou vypočtené pro náklady na výrobu 1 kg kyslíku vyplývajících ze stechiometricky rozdělené spotřeby energie ^{*5} Výše výnosu za vyprodukovaný vodík (345 dní) při ceně 1kg H₂ = 278 Kč (4.1.2024). ^{*6} Náklady na provoz elektrolyzérů na kyslík po odečtení výnosů za prodaný vodík.

18 Závěr

- V literární rešerši jsou shrnuty poznatky o vývoji technologií pro intenzifikace čištění odpadních vod za pomoci HPO systémů. Jsou popsána a uvedena konkrétní technická řešení intenzifikace čištění vod nebo pěstování akvakultur pomocí čistého kyslíku nebo kyslíkem obohacené směsi. Dále jsou popsány používané procesně-technologické parametry (k_L, C_{sat}, SOTE, SOTR apod.) a teoretické chování kyslíku v závislosti na teplotě, tlaku, eventuálně hloubce umístění aeračních elementů apod. Na základě prostudované literatury byly vybrány a popsány možné zdroje kyslíku nebo kyslíkem obohacené směsi pro ČOV a sice:
 - PSA jednotka
 - Kapalný kyslík dovážený z jednotky kryogenické separace vzduchu (ASU)
 - Kyslík z elektrolytické výroby vodíku
 - Membránová separace
- V praktické části jsou porovnávány varianty čištění odpadních vod s vybraným zdrojem kyslíku, tj. s PSA jednotkou, s dováženým kyslíkem a kyslíkem z elektrolytické výroby vodíku, se standardním provedením, pneumatickou aerací vzduchem a pro tři různé velikosti ČOV. Postup pro určení spotřeby kyslíku pro klasickou aktivaci a určení množství potřebného vzduchu pro pneumatickou aeraci vzduchem byl určen dle Hlavínek [22] pro tři různé velikosti ČOV pro 2000, 5000 a 10000 EO. Dále byly pro všechny variant stanoveny: spotřeba energie, specifické spotřeba energie vztažená na kg dodaného kyslíku, na 1 m³ odpadních vod a konečně celkové provozní náklady.

- Nejnižší hodinovou spotřebu elektrické energie vykazuje varianta pneumatická aerace vzduchem, která je nejčastějším řešením v praxi.
- Druhé místo v žebříčku energetické náročnosti zaujímá aerace kyslíkem zaváženého z velké ASU jednotky. Nutno poznamenat, že v tomto případě byla spotřeba elektrické energie získána pomocí referenční hodnoty spotřeby elektrické energie potřebné pro výrobu kapalného kyslíku. Je však třeba uvést, že nebyla zohledněna energie vynaložená na transport samotného kyslíku a jeho přečerpávání.
- Třetí místo zaujímá aerace kyslíkem vyrobeným v PSA jednotce, která dosahuje až pětinasobných hodnot energetické spotřeby energie ve srovnání s klasickou pneumatickou aerací vzduchem.
- Energeticky nejnáročnější je výroba kyslíku elektrolýzou, kdy je spotřeba elektrické energie přiřazena pouze kyslíku. Záměrem bylo využít kyslík jinak vypouštěný do atmosféry při elektrolytické výrobě vodíku. Varianta „Elektro stehio“ vyjadřuje rozdělení spotřeby elektrické energie na kyslík a vodík podle stechiometrie tvorby. V tomto případě se tato varianta posune na třetí místo.
- V případě provozních nákladů byly uvažovány pouze náklady za elektřinu potřebnou pro chod zařízení. Pro uvažované velikosti ČOV (EO 2 000, EO 5 000 a EO 10 000) nejnižší náklady má klasická pneumatická aerace vzduchem. Pro uvažované velikosti ČOV jsou náklady pro zavážení kyslíkem od 5 do 50 % nákladů na aeraci vzduchem dle velikosti ČOV. V případě výroby kyslíku pomocí PSA jsou náklady 3,5 - 5 krát vyšší ve srovnání s aerací vzduchem dle velikosti ČOV. V případě využití kyslíku při elektrolytické výrobě vodíku se z bilance provozních nákladů ukazuje, že při prodeji vodíku za stávajících prodejních cen by náklady na kyslík byly záporné, a to od 1 do 18 mil. Kč dle velikosti ČOV.

19 Literatura

- [1] MOHAMMADPOUR, Hossein; CORD-RUWISCH, Ralf; PIVRIKAS, Almantas a HO, Goen. Utilisation of oxygen from water electrolysis – Assessment for wastewater treatment and aquaculture. Online. Chemical Engineering Science. Prosinec 2021, roč. 246, č. 117008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.117008>
- [2] OKUN, Daniel. *System of Bio-Precipitation of Organic Matter from Sewage*. Online. Sewage Works Journal. 1949, s. 763-794. Dostupné z: <https://www.jstor.org/stable/25031134>. [cit. 2023-12-18].
- [3] PETRUSEK, Adam a HEJZLAR, Jozef. *Když se ryby dusí aneb příčiny a důsledky úbytku kyslíku ve vodách*. Online. Časopis Živa, 2/2022n. 1. Dostupné z: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://ziva.avcr.cz/files/ziva/pd/pdf/kdyz-se-ryby-dusi-aneb-priciny-a-dusledky-ubytku-k.pdf>. [cit. 2023-12-18]
- [4] WANNER, Jiří. *Historie technologie čištění odpadních vod*. Online. Stavebnictví. 03/2019n. 1. Dostupné z: <https://www.casopisstavebnictvi.cz/clanky-historie-technologie-cistení-odpadních-vod.html>. [cit. 2023-12-18].
- [5] DOHÁNYOS, Michal; KOLLER, Jan a STRNADOVÁ, Nina. *Čištění odpadních vod*. 2. vydání. Praha: VŠCHT Praha, 1998 (2007 dotisk, 2011 dotisk). ISBN 978-80-7080-
- [6] RIEGER, František; NOVÁK, Václav a JIROUT, Tomáš. *Hydromechanické procesy I*. Praha: Nakladatelství ČVUT Fakulta Strojní, 2007. ISBN 978-80-01-03286-2.
- [7] MUELLER, James; C. BOYLE, William a H. POPEL, Ing. Johannes. *Aeration: Principles and Practice*. 11. vydání. Boca Raton: CRC Press, 2002. ISBN 9780429136399.
- [8] ŠULC, Radek a DITL, Pavel. A technical and economic evaluation of two different oxygen sources for a small oxy-combustion unit. Online. 2021. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127427>. [cit. 2023-12-18].
- [9] IN-ECO, SPOL. S R.O. Aerační elementy. Online. 2020. Dostupné z: https://www.in-eco.cz/docs/cz/Aeration_elements_2022_CZ.pdf?stamp=631edcfd90148.. [cit. 2023-12-18]
- [10] LINDE GAS A.S. Čistá voda. Aplikační technologie na úpravu vody pomocí technických plynů. Online. 2017. Dostupné z: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.linde-gas.cz/cs/images/Brozura%20cista%20voda_tcm79-474762.pdf. [cit. 2023-12-18].
- [11] SKOUTERIS, G.; RODRIGUEZ-GARCIA, G.; REINECKE, S.F. a HAMPEL, U. *The use of pure oxygen for aeration in aerobic wastewater treatment: A review of its potential and limitations*. Online. 2020. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852420308671>. [cit. 2023-12-18].

- [12] DORAN, Pauline M. BIOPROCESS ENGINEERING PRINCIPLES. 2nd. edition. Waltham: Elsevier, 2013. ISBN 978-0-12-220851-5.
- [13] DITL, Pavel. Difuzně separační pochody. Praha: CVUT Praha, 2008. ISBN 9788001039724.
- [14] ŠULC, Radek; ŠEDIVÝ, Vít a KOLÁŘOVÁ, Helena. Základy fyzikální chemie. Praha: CVUT Praha, 2002. ISBN 80-01-02634-5.
- [15] EUROPEAN INDUSTRIAL GASES ASSOCIATION AISBL. POSITION PAPER: Indirect CO2 emissions compensation: Benchmark proposal for Air Separation Plants. Online. Brusel, December 2010. Dostupné z: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://my.fs.cvut.cz/imp/view.php?actionID=view_attach&id=2&muid=%7B5%7DINBOX641&view_token=zKo3RS8PFzMSNYJ8U84bQOZ&uniq=1702934908984. [cit. 2023-12-18].
- [16] RŮŽIČKOVÁ, Iveta; UHER, Milan; PLOTĚNÝ, Karel a HOLBA, Marek. Zkušenosti z návrhu, realizace a provozu membránové ČOV. Online. 2023. Dostupné z: ASIO, spol. s r.o., <https://www.asio.cz/cz/news/zkusenosti-z-navrhu-realizace-a-provozu-membranove-cov.87#:~:text=Z%C3%A1v%C4%9Br%20z%20hlediska%20provozu,znateln%C3%BD%20vliv%20na%20zan%C3%A1C5%A1en%C3%AD%20membr%C3%A1ny..> [cit. 2023-12-18].
- [17] RODRÍGUEZ, Francisco A.; REBOLEIRO-RIVAS, Patricia; GONZÁLEZ-LÓPEZ, Jesús; HONTORIA, Ernesto a POYATOS, José M. Comparative study of the use of pure oxygen and air in the nitrification of a MBR system used for wastewater treatment. Online. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.06.053>. [cit. 2023-12-19].
- [18] AIR LIQUIDE ENGINEERING & CONSTRUCTION. Technology Handbook. Online. 2015, October 2023. Dostupné z: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://engineering.airliquide.com/sites/engineering/files/2022-09/technohandbook11oct.pdf. [cit. 2023-12-19].
- [19] NIKKISO. Merchant Air Separation Plants & Liquefiers. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.nikkisoceig.com/product-categories/air-separation-plants/>. [cit. 2023-12-22].
- [20] POŠTA, Josef. Čistírny odpadních vod. Praha : Vydavatelství ČZU, technická fakulta, 2005. ISBN 80-213-1366-8.
- [20] ENVI-PUR, S.R.O. Jemnobublinné, středobublinné a hrubobublinné aerační systémy ENVI-PUR. Online. Nespecifikováno. Dostupné z: https://www.envi-pur.cz/download/120/doc_17_aeracni_systemy_ep_cz.pdf. [cit. 2023-12-29].
- [21] PLOTĚNÝ, Karel. Intenzifikace čistíren odpadních vod. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2013. ISBN 9788087438411.
- [22] HLAVÍNEK, Petr a HLAVÁČEK, Jiří. Čištění odpadních vod-praktické příklady výpočtů. Praha: NOEL 2000, 1996. ISBN 80-86020-00-2.

- [23] ALBERTSON, J.G.; MCWHIRTER, J.R.; ROBINSON, E.K. a VAHLDIECK, N.P. Investigation of the Use of High Purity Oxygen Aeration in the Conventional Activated Sludge Process. 1970.
- [23] EUROSTAT. Final energy consumption. Online. December 2023. Dostupné z: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/sdg_07_11/default/table?lang=en. [cit. 2023-12-23].
- [24] Yunt, F. W. & Stenstrom, M. K. 1996 Aeration equipment evaluation - phase II: process water test results, EPA Report. 68-03-2906.
- [25] LINDE GAS A.S. Cryogenic Standard Tanks. Online. 2020. Dostupné z: <https://www.linde-engineering.com/en/plant-components/cryogenic-tanks/index.html>. [cit. 2023-12-24].
- [26] HLAVÍNEK, Petr a HLAVÁČEK, Jiří. Čištění odpadních vod: praktické příklady výpočtů. Brno: NOEL 2000, 1996. ISBN 80-86020-00-2.
- [27] SHERWOOD, Thomas K.; PIGFORD, Robert L. a WILKE, Charles R. Mass Transfer. 3rd edition. McGraw-Hill, 1975. ISBN 9780070566927.
- [28] BENSON, B.B. a KRAUSE, D.J. The Concentration and Isotopic Fractionation of Oxygen Dissolved in Freshwater and Seawater in Equilibrium with the Atmosphere. Limnology and Oceanography. 1984, č. 29, s. 620.
- [29] Wastewater Engineering: Treatment and Disposal. New York: McGraw-Hill, 1972. ISBN 978-0070416758.
- [30] LINDE GAS A.S. Solvox Cone high efficiency pressure dissolver. Online. 2023. Dostupné z: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.linde-gas.com/en/images/0000564_WT_datasheet_SOLVOX_cone_RZ_DE_PRINT_185233_tcm17-679810.pdf. [cit. 2023-12-27].
- [31] LINDE GAS A.S. Solvox Dropin high capacity oxygenation of sea water. Online. 2023. Dostupné z: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.linde-gas.com/en/images/0000570_WT_datasheet_SOLVOX_dropin_RZ_DE_PRINT_185237_tcm17-679815.pdf. [cit. 2023-12-27].
- [32] KAESER KOMPRESSOREN S.R.O. Dmyhadla Kaeser - řešení v oblasti nízkého tlaku - brožura. Online. 2023. Dostupné z: <https://cz.kaeser.com/vyroby/dmyhadla/>. [cit. 2023-12-27].
- [33] ORAMONT SYSTEM S.R.O. PONORNÁ VRTULOVÁ KALOVÁ MÍCHADLA MO2G | MON2G 7,5 - 18,5KW. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.oramont.cz/katalog/produkt/kalova-michadla-na-kejdu-digestat-mo>. [cit. 2023-12-28].

- [34] HCP PUMP MANUFACTURER CO., LTD. AL Series - Submersible Wastewater / Effluent Pumps. Online. 2023. Dostupné z: <https://cs.hcppump.com/effluent-pumps.html>. [cit. 2023-12-28].
- [35] DANFOSS. Log p-h diagram R513 a. Online. 2023. Dostupné z: <https://i1.wp.com/hvac-eng.com/wp-content/uploads/2020/04/Logp-h-diagram-R513A.png?fit=3168%2C2448&ssl=1>. [cit. 2023-12-28].
- [36] KAESER KOMPRESSOREN S.R.O. KAESER FILTER Série F350 až F3360 – Brožura. Online. 2023. Dostupné z: <https://cz.kaeser.com/vyrobky/uprava-stlaceneho-vzduchu-a-technika-kondenzatu/filtry-stlaceneho-vzduchu-a-absorbery-s-aktivnim-uhlim/prirubove-filtry-stlaceneho-vzduchu-kaeser/>. [cit. 2023-12-28].
- [37] CHART FERROX A.S. VT SERIES PERFORMER LINE VERTICAL STORAGE TANKS. Online. 2017. Dostupné z: chrome-extension://efaidnbmninnibpcajpcglclefindmkaj/https://files.chartindustries.com/VT_Series_PerformerLine_web.pdf. [cit. 2023-12-29].
- [38] NEL HYDROGEN. PEM Electrolyzers. Online. 2023. Dostupné z: <https://nelhydrogen.com/water-electrolysers-hydrogen-generators/>. [cit. 2023-12-29].
- [39] SULZER. Aerator Type ABS Venturi Jet. Online. 2019. Dostupné z: <https://www.sulzer.com/en/shared/products/aerator-type-abs-venturi-jet>. [cit. 2023-12-29].
- [40] KÖRTING HANNOVER GMBH. Water treatment with Körting ejectors - energy-efficient solutions – low maintenance and long service life. Online. Nespecifikováno. Dostupné z: <https://www.koerting.de/en/ejectors-for-adding-gaseous-oxygen.html>. [cit. 2024-01-02].
- [41] RODRÍGUEZ, Francisco A; REBOLEIRO-RIVAS, Patricia; GONZÁLEZ-LÓPEZ, Jesús; HONTORIA, Ernesto a M POYATOS, José. *Comparative study of the use of pure oxygen and air in the nitrification of a MBR system used for wastewater treatment*. Online. 2012 Jun 23., č. PMID: 22858487. Dostupné z: <https://doi.org/doi:10.1016/j.biortech.2012.06.053>. [cit. 2024-01-04].
- [42] KAESER KOMPRESSOREN S.R.O. *Za sucha stlačující šroubové kompresory*. Online. 2023. Dostupné z: <https://cz.kaeser.com/vyrobky/sroubove-kompresory/suchobezne-sroubove-kompresory/se-vzduchovym-chlazenim/>. [cit. 2024-01-07].
- [43] JELÍNEK, Jan. *Nauka o zemi*. Online. 2010. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/jelinek/tc-hydrosfera.htm>. [cit. 2024-01-11].
- [44] NIST. *NIST WebBook Chemie*. Online. NIST Standard Reference Database Number 69. 2023. Dostupné z: <https://doi.org/10.18434/T4D303>. [cit. 2024-01-11].

Seznam obrázků

- Obrázek 1 Mapa oblastí s koncentrací kyslíku nižší než 2 mg/l (převzato z [3])
- Obrázek 2 Úhyn ryb v důsledku snížené koncentrace kyslíku ve vodě (převzato z [3])
- Obrázek 3 Mapa indikující oblasti s dostatkem či naopak nedostatek vody (převzato z [3])
- Obrázek 4 Zjednodušené blokové schéma aktivace
- Obrázek 5 Modely toku nádrží
- Obrázek 6 Schéma aktivaci s ponořeným membránovým modulem (upraveno podle [16])
- Obrázek 7 Panelový difuzér převzato z [7]
- Obrázek 8 Trubkový aerační element převzato a upraveno [7]
- Obrázek 9 Typické uspořádání tryskového difuzoru převzato a upraveno Sulzer [39]
- Obrázek 10 Vlevo blok 3 loubového dmyhadla Kaeser řady OMEGA, Vpravo blok šroubového dmyhadla Kaeser řady Sigma převzato a upraveno [32]
- Obrázek 11 Kessenerův horizontální aerátor vlevo a vertikální aerační turbína vpravo převzato [4]
- Obrázek 12 Typické provedení instalovaných ejektorů převzato a upraveno [40]
- Obrázek 13 Flowchart historie vývoje HPO systémů (převzato a upraveno z [7])
- Obrázek 14 HPO systém s povrchovými aeratory Lotepro Corporatin, Vallhala (převzato a upraveno [7])
- Obrázek 15 Praxair I-SO™ patentovaný systém pro rozpouštění kyslíku (převzato a upraveno [7])
- Obrázek 16 Schéma technologie Mixflo™ (převzato a upraveno [7])
- Obrázek 17 Linde Solvox systém aerace [3]
- Obrázek 18 Fotografie instalovaného SOLVOX systému Linde v ČOV Choustník
- Obrázek 19 Solvox Cone systém převzato a upraveno [30]
- Obrázek 20 Solvox Dropin převzato [31] 1- oko na vytažení, 2- kabel s hadicí na přívod kyslíku, 4 – difuzéry pro výstup mikrobublin, 5 – mokrý senzor, 6- vstupní otvory pro vodu
- Obrázek 21 Model pro znázornění odporů přestupu kyslíku do vody (převzato a upraveno [11])
- Obrázek 22 Přestup hmoty v mezifázovém rozhraní [13]

Obrázek 23 Průběh vývoje bubliny v závislosti na různém počátečním průměru bubliny (VPRAVO $d_b = 6$ mm , VLEVO $d_b = 2$ mm) převzato [1]

Obrázek 24 Zjednodušené blokové schéma ASU jednotky

Obrázek 25 Schéma nádrže pro zkapalněný kyslík převzato z [25]

Obrázek 26 Atmosférický odpařovač Linde na ČOV Intersnacku v Choustníku

Obrázek 27 Blokové schéma PSA jednotky

Obrázek 28 Schéma procesu elektrolýzy vody

Obrázek 29 Typický membránový modul převzato a upraveno [12]

Obrázek 30 Schéma bilancované ČOV

Obrázek 31 Schématický řez dosazovací nádrže s horizontálním průtokem převzato a upraveno [26]

Obrázek 32 Flex Air jemnobublinný diskový aerační element společnosti ENVI-PUR převzato z [20]

Obrázek 33 Solvox perforovaná hadice (1000 póru na m délky) zdroj [3]

Obrázek 34 Návrh PI&D schéma varianty pneumatické aerace vzduchem

Obrázek 35 Ponorné vrtulové míchadlo Oramont převzato [33]

Obrázek 36 Návrh P&ID schéma varianty aerace kyslíkem z PSA jednotky

Obrázek 37 Bilance kondenzační sušičky

Obrázek 38 Filtr 530 KE převzato [36]

Obrázek 39 Návrh P&ID schéma varianty aerace zaváženým kapalným kyslíkem

Obrázek 40 Návrh P&ID schéma varianty aerace kyslíkem z elektrolýzy

Seznam tabulek

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabulka 1 Druhy aktivace a jejich princip | 5 |
| Tabulka 2 Vybraná data pro složení suchého vzduchu ([4], [5]) | 17 |
| Tabulka 3 Srovnání nákladů na provzdušňování vzduchem vs. kyslíkem..... | 18 |
| Tabulka 4 Srovnání hodnot součinitelů přestupu kyslíku v závislosti na průtoku převzato [1] | 31 |
| Tabulka 5 Srovnání specifických spotřeb energie ASU (zdroj [15][18][19])..... | 37 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabulka 6 Přehled elektrolyzérů s provozními parametry [21]..... | 42 |
| Tabulka 7 Normované hodnoty na jeden ekvivalent obyvatele převzato [9]..... | 44 |
| Tabulka 8 Orientační přehled návrhových parametrů pro dosazovací nádrže [26] | 49 |
| Tabulka 9 Návrhové parametry biologického stupně ČOV (pro 2000, 5000, 10 000 EO)..... | 51 |
| Tabulka 10 Množství provzdušňovacího media pro jednotlivé technologie..... | 53 |
| Tabulka 11 Technické parametry aeračních elementů Envi-Pur [20]..... | 54 |
| Tabulka 12 Technické specifikace SOLVOX aeračního systému společnosti Linde převzato z [3] | 55 |
| Tabulka 13 Vypočtené a tabulkové data pro jemný a hrubý filtr [36] | 56 |
| Tabulka 14 Technické parametry spočtené pro dmychadla | 58 |
| Tabulka 15 Parametry vybraných šroubových dmychadel z katalogu Kaeser..... | 58 |
| Tabulka 16 Technická specifikace míchadel | 59 |
| Tabulka 17 Data potřebná pro výpočet příkonu čerpadla vratného kalu | 60 |
| Tabulka 18 Výpočet parametrů čerpadel | 60 |
| Tabulka 19 Technická specifikace vybraných čerpadel vratného kalu společnosti HCP data převzata [34]..... | 60 |
| Tabulka 20 Souhrnná bilance energetické náročnosti pneumatické aerace | 61 |
| Tabulka 21 Parametry třídy kvality vzduchu 1.4.1 dle ISO 8573-1:2010 převzato z [35] | 62 |
| Tabulka 22 Technické parametry spočtené pro kompresory v PSA jednotce..... | 64 |
| Tabulka 23 Technické parametry pro vybrané kompresory v PSA jednotce převzato z [42] . | 64 |
| Tabulka 24 Data pro kondenzační sušičky společnosti Kaeser [36]..... | 67 |
| Tabulka 25 Technická specifikace a výsledné hodnoty bilance kondenzační sušičky | 67 |
| Tabulka 26 Parametry filtrů pevných částic a oleje pro PSA jednotku [36]..... | 68 |
| Tabulka 27 Souhrnná energetická náročnost PSA jednotky | 69 |
| Tabulka 28 Technické parametry LOX technologie pro různé velikosti ČOV vybrané z katalogu Chart Ferox [37] | 70 |
| Tabulka 29 Souhrnná data pro variantu zaváženého kyslíku | 71 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabulka 30 Technická specifikace vybraných elektrolyzérů pro různé velikosti ČOV převzato [38] | 72 |
| Tabulka 31 Souhrnná data pro variantu aerace kyslíkem z elektrolýzy..... | 72 |
| Tabulka 32 Cena za kg vyrobeného produktu..... | 77 |
| Tabulka 33 Souhrn celkových ročních nákladů | 78 |

Seznam příloh

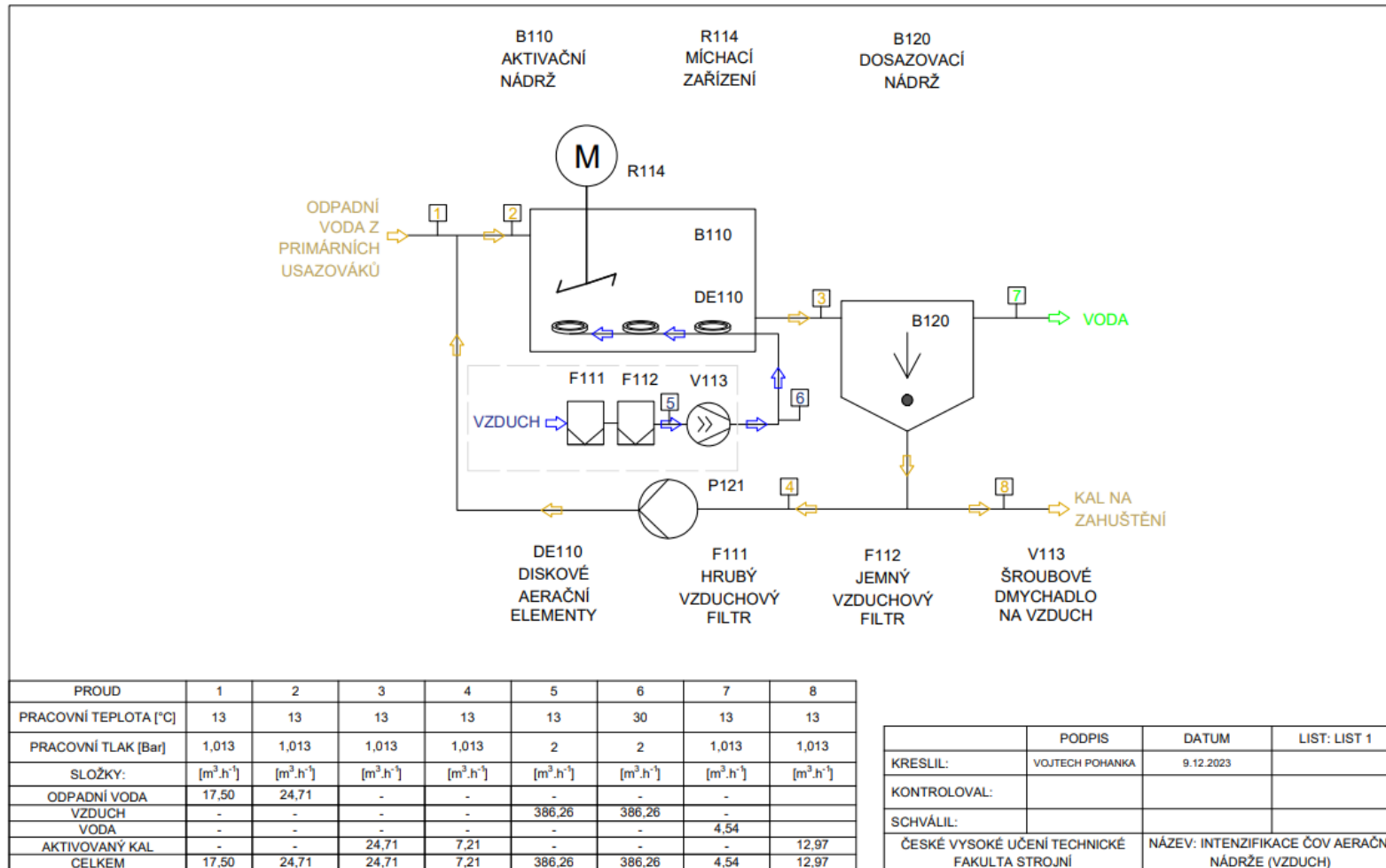
Příloha A: PFD – čistírna 2000 EO – různé zdroje kyslíku

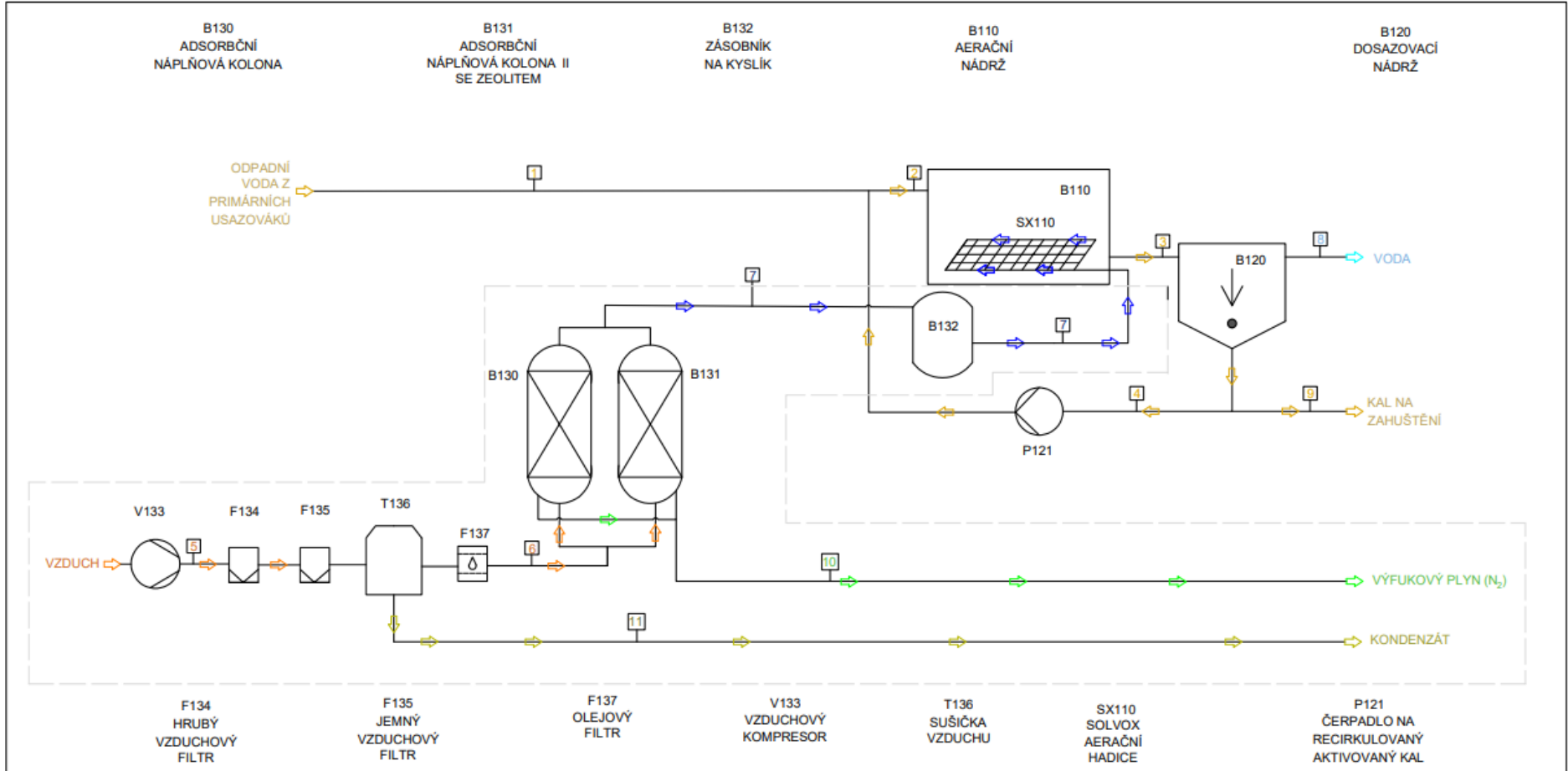
Příloha B: PFD – čistírna 5 000 EO – různé zdroje kyslíku

Příloha C: PFD – čistírna 10 000 EO – různé zdroje kyslíku

Přílohy

Příloha A: PFD – čistírna 2000 EO – různé zdroje kyslíku





| PROUD | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|-------------------------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|--------------|----------|----------|-----------|----------|
| PRACOVNÍ TEPLOTA [°C] | 13 | 13 | 13 | 13 | 30 | 3 | 3 | 13 | 13 | 13 | 3 |
| PRACOVNÍ TLAK [Bar (a)] | 1,013 | 1,013 | 1,013 | 1,013 | 8 | 7,89 | 1,013 | 1,013 | 1,013 | 1,013 | 1,013 |
| SLOŽKY: | [m³.h⁻¹] | [m³.h⁻¹] | [m³.h⁻¹] | [m³.h⁻¹] | [Nm³.h⁻¹] | [Nm³.h⁻¹] | [Nm³.O₂.h⁻¹] | [m³.h⁻¹] | [m³.h⁻¹] | [Nm³.h⁻¹] | [kg.h⁻¹] |
| ODPADNÍ VODA | 17,50 | 24,71 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| VZDUCH | - | - | - | - | 1055,43 | 1055,43 | - | - | - | - | - |
| VODA | - | - | - | - | - | - | 4,54 | - | - | - | - |
| KYSLÍK | - | - | - | - | - | - | 18,25 | - | - | - | - |
| VÝFUKOVÝ PLYN | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 551,68 | - |
| KONDENZÁT | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 28,95 |
| AKTIVOVANÝ KAL | - | - | 24,71 | 7,21 | - | - | - | - | 12,97 | - | - |
| CELKEM | 17,50 | 24,71 | 24,71 | 7,21 | 1055,43 | 1055,43 | 18,25 | 4,54 | 12,97 | 551,68 | 28,95 |

| | PODPIS | DATUM | LIST: LIST 1 |
|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------|--------------|
| KRESLIL: | VOJTECH POHANKA | 08.12.2023 | |
| KONTROLOVAL: | | | |
| SCHVÁLIL: | | | |
| ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ FAKULTA STROJNÍ | NÁZEV: INTENZIFIKACE ČOV AERAČNÍ NÁDRŽE (PSA) | | |

W141
VÝPARNÍK

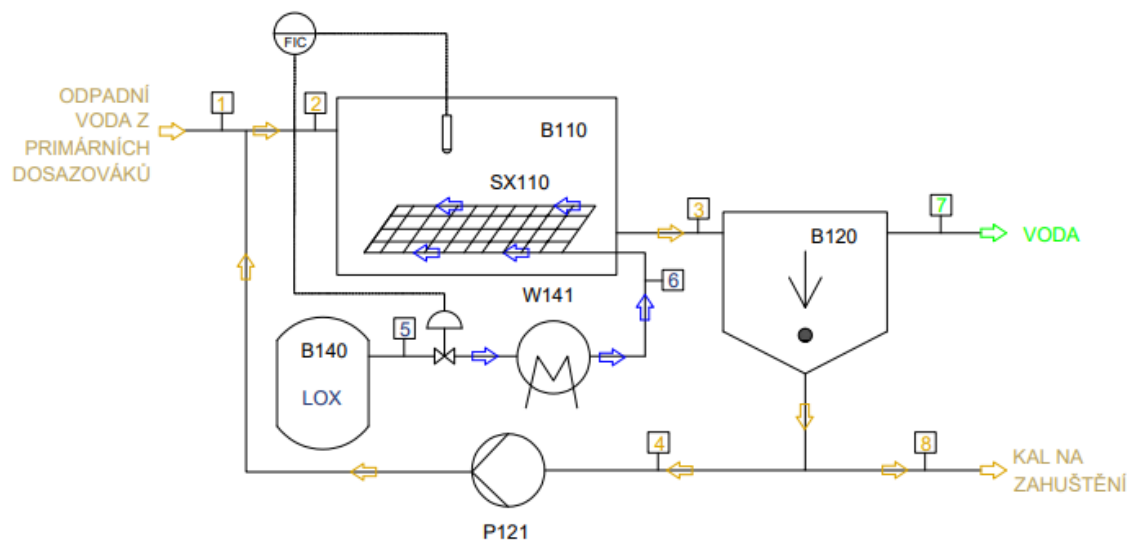
SX110
SOLVOX
AERAČNÍ
HADICE

B110
AERAČNÍ
NÁDRŽ

B120
DOSAZOVACÍ
NÁDRŽ

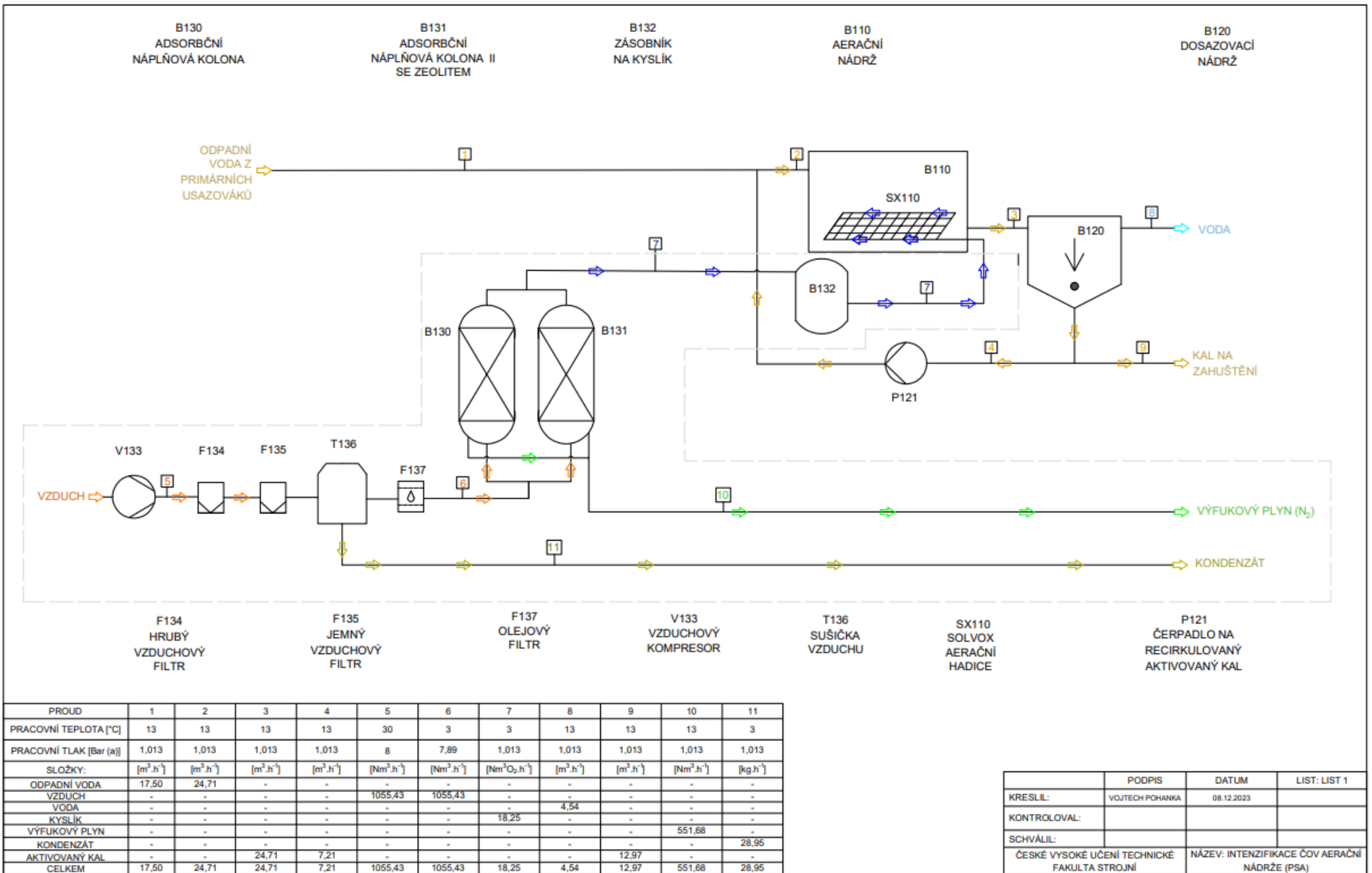
P121
ČERPADLO NA
RECIRKULOVANÝ
AKTIVOVANÝ KAL

B140
ZÁSOBNÍK
SE
ZKAPALNĚNÝM
KYSLÍKEM

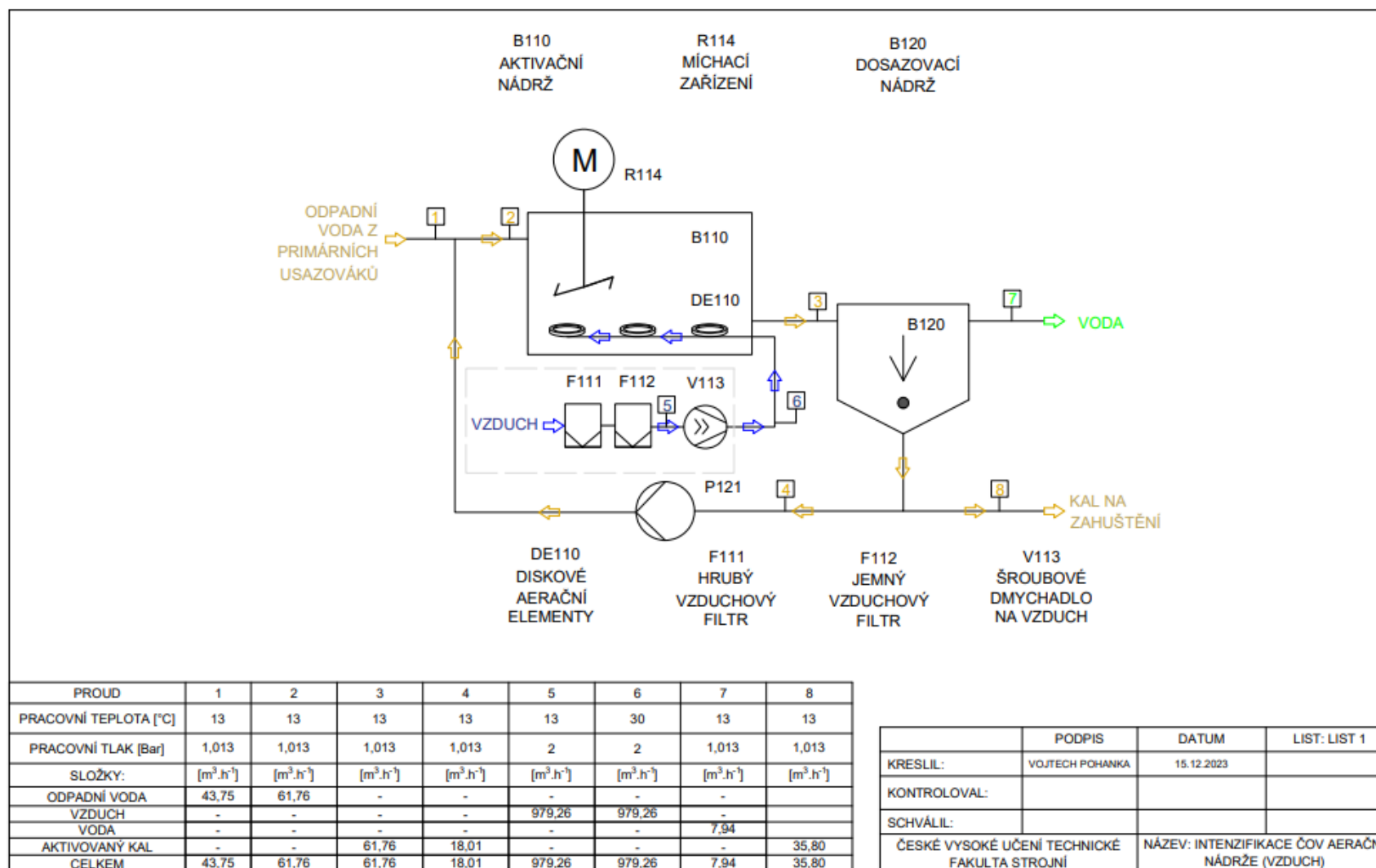


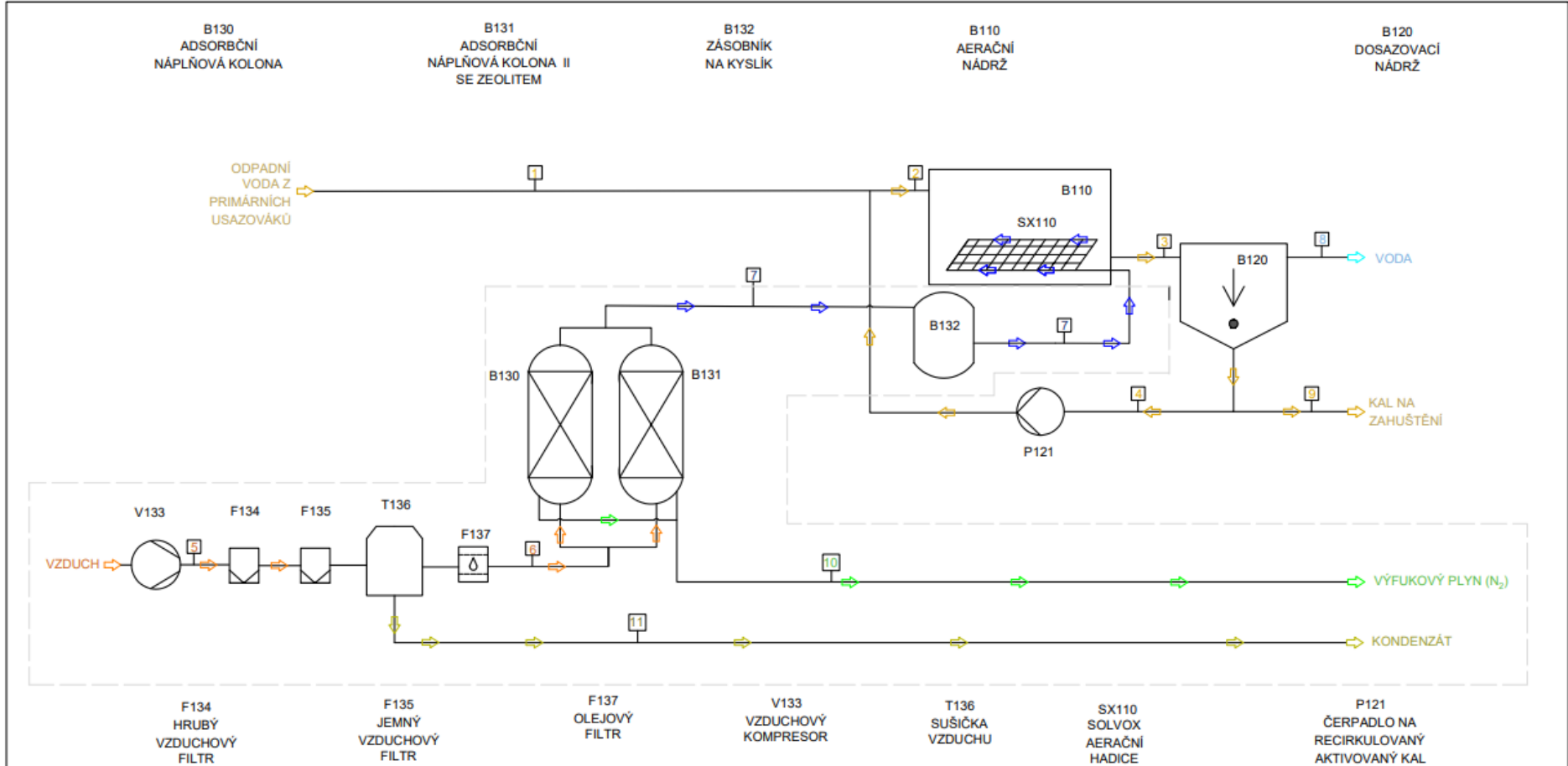
| PROUD | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| PRACOVNÍ TEPLOTA [°C] | 13 | 13 | 13 | 13 | -142,83 | 20 | 13 | 13 |
| PRACOVNÍ TLAK [Bar (a)] | 1,013 | 1,013 | 1,013 | 1,013 | 60 | 60 | 1,013 | 1,013 |
| SLOŽKY: | [m ³ .h ⁻¹] | [m ³ .h ⁻¹] | [m ³ .h ⁻¹] | [m ³ .h ⁻¹] | [kgO ₂ .h ⁻¹] | [Nm ³ O ₂ .h ⁻¹] | [m ³ .h ⁻¹] | [m ³ .h ⁻¹] |
| ODPADNÍ VODA | 17,50 | 24,71 | - | - | - | - | - | - |
| KYSLÍK | - | - | - | - | - | 24,28 | - | - |
| VODA | - | - | - | - | - | - | 4,54 | - |
| AKTIVOVANÝ KAL | - | - | 24,71 | 7,21 | - | - | - | 12,97 |
| CELKEM | 17,50 | 24,71 | 24,71 | 7,21 | - | 24,28 | 4,54 | 12,97 |

| | PODPIS | DATUM | LIST: LIST 1 |
|-------------------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------|--------------|
| KRESLIL: | VOJTECH POHANKA | 8.12.2023 | |
| KONTROLOVAL: | | | |
| SCHVÁLIL: | | | |
| ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ FAKULTA STROJNÍ | | NÁZEV: INTENZIFIKACE ČOV AERAČNÍ NÁDRŽE (KYSLÍKOVÁ NÁDRŽ) | |



Příloha B: PFD – čistírna 5 000 EO – různé zdroje kyslíku





| PROUD | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|-------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| PRACOVNÍ TEPLOTA [°C] | 13 | 13 | 13 | 13 | 30 | 3 | 3 | 13 | 13 | 13 | 3 |
| PRACOVNÍ TLAK [Bar (a)] | 1,013 | 1,013 | 1,013 | 1,013 | 8 | 7,89 | 1,013 | 1,013 | 1,013 | 1,013 | 1,013 |
| SLOŽKY: | [m ³ .h ⁻¹] | [m ³ .h ⁻¹] | [m ³ .h ⁻¹] | [m ³ .h ⁻¹] | [Nm ³ .h ⁻¹] | [Nm ³ .h ⁻¹] | [Nm ³ .h ⁻¹] | [m ³ .h ⁻¹] | [m ³ .h ⁻¹] | [Nm ³ .h ⁻¹] | [kg.h ⁻¹] |
| ODPADNÍ VODA | 43,75 | 61,76 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| VZDUCH | - | - | - | - | 2675,74 | 2675,74 | - | - | - | - | - |
| VODA | - | - | - | - | - | - | 7,94 | - | - | - | - |
| KYSLÍK | - | - | - | - | - | - | 46,26 | - | - | - | - |
| VÝFUKOVÝ PLYN | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 10 089,9 | - |
| KONDENZÁT | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 73,41 |
| AKTIVOVANÝ KAL | - | - | 61,76 | 18,01 | - | - | - | - | 35,80 | - | - |
| CELKEM | 43,75 | 61,76 | 61,76 | 18,01 | 2675,74 | 2675,74 | 46,26 | 7,94 | 35,80 | 10 089,9 | 73,41 |

| | PODPIS | DATUM | LIST: LIST 1 |
|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------|--------------|
| KRESLIL: | VOJTECH POHANKA | 15.12.2023 | |
| KONTROLOVAL: | | | |
| SCHVÁLIL: | | | |
| ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ FAKULTA STROJNÍ | NÁZEV: INTENZIFIKACE ČOV AERAČNÍ NÁDRŽE (PSA) | | |

W141
VÝPARNÍK

SX110
SOLVOX
AERAČNÍ
HADICE

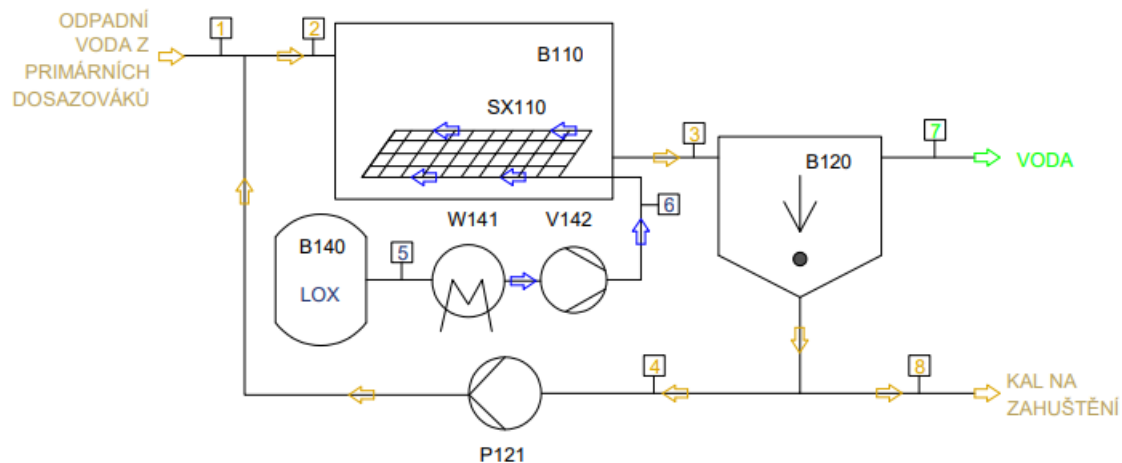
V142
KOMPRESOR

B110
AERAČNÍ
NÁDRŽ

B120
DOSAZOVACÍ
NÁDRŽ

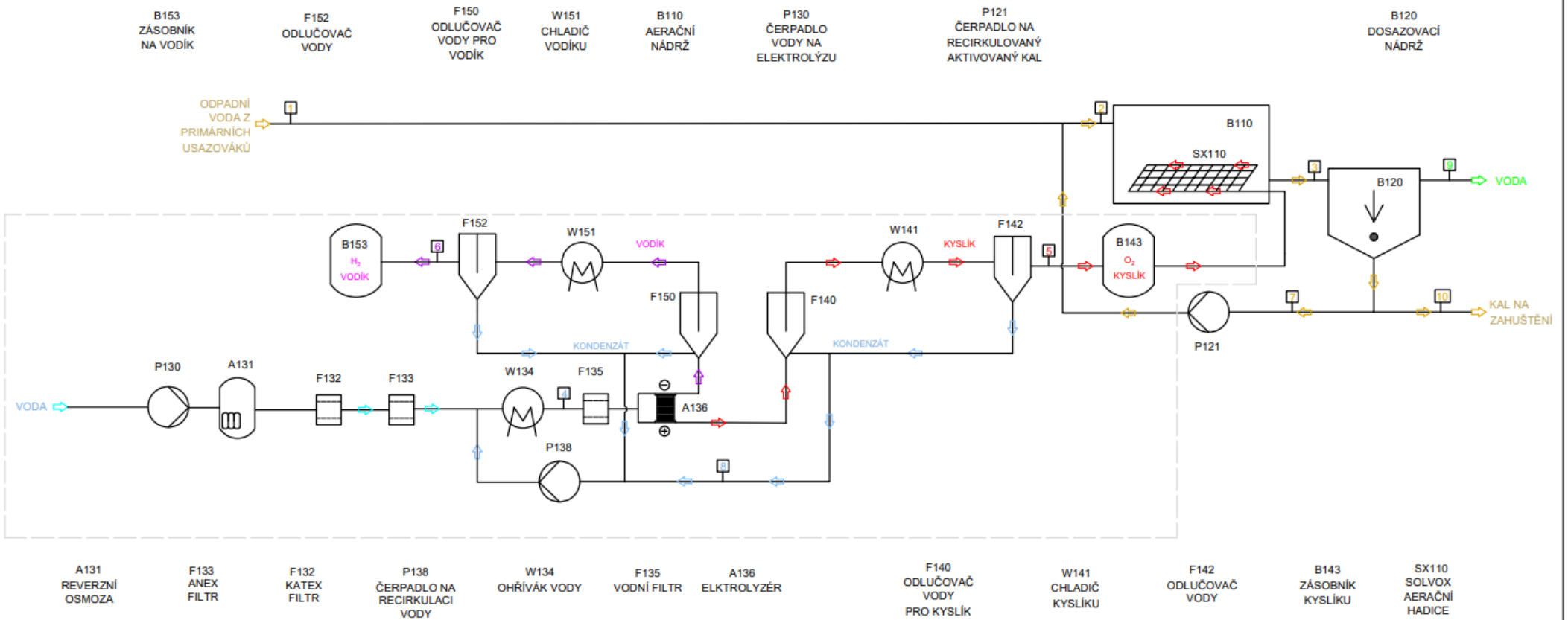
P121
ČERPADLO NA
RECIRKULOVANÝ
AKTIVOVANÝ KAL

B140
ZÁSOBNÍK
SE
ZKAPALNĚNÝM
KYSLÍKEM



| PROUD | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-------------------------|----------|----------|----------|----------|------------|-------------|----------|----------|
| PRACOVNÍ TEPLOTA [°C] | 13 | 13 | 13 | 13 | -142,83 | 20 | 13 | 13 |
| PRACOVNÍ TLAK [Bar (a)] | 1,013 | 1,013 | 1,013 | 1,013 | 60 | 60 | 1,013 | 1,013 |
| SLOŽKY: | [m³.h⁻¹] | [m³.h⁻¹] | [m³.h⁻¹] | [m³.h⁻¹] | [kgO₂.h⁻¹] | [Nm³O₂.h⁻¹] | [m³.h⁻¹] | [m³.h⁻¹] |
| ODPADNÍ VODA | 43,75 | 61,76 | - | - | - | - | - | - |
| KYSLÍK | - | - | - | - | 61,55 | 61,55 | - | - |
| VODA | - | - | - | - | - | - | 7,94 | - |
| AKTIVOVANÝ KAL | - | - | 61,76 | 18,01 | - | - | - | 35,80 |
| CELKEM | 43,75 | 61,76 | 61,76 | 18,01 | 61,55 | 61,55 | 7,94 | 35,80 |

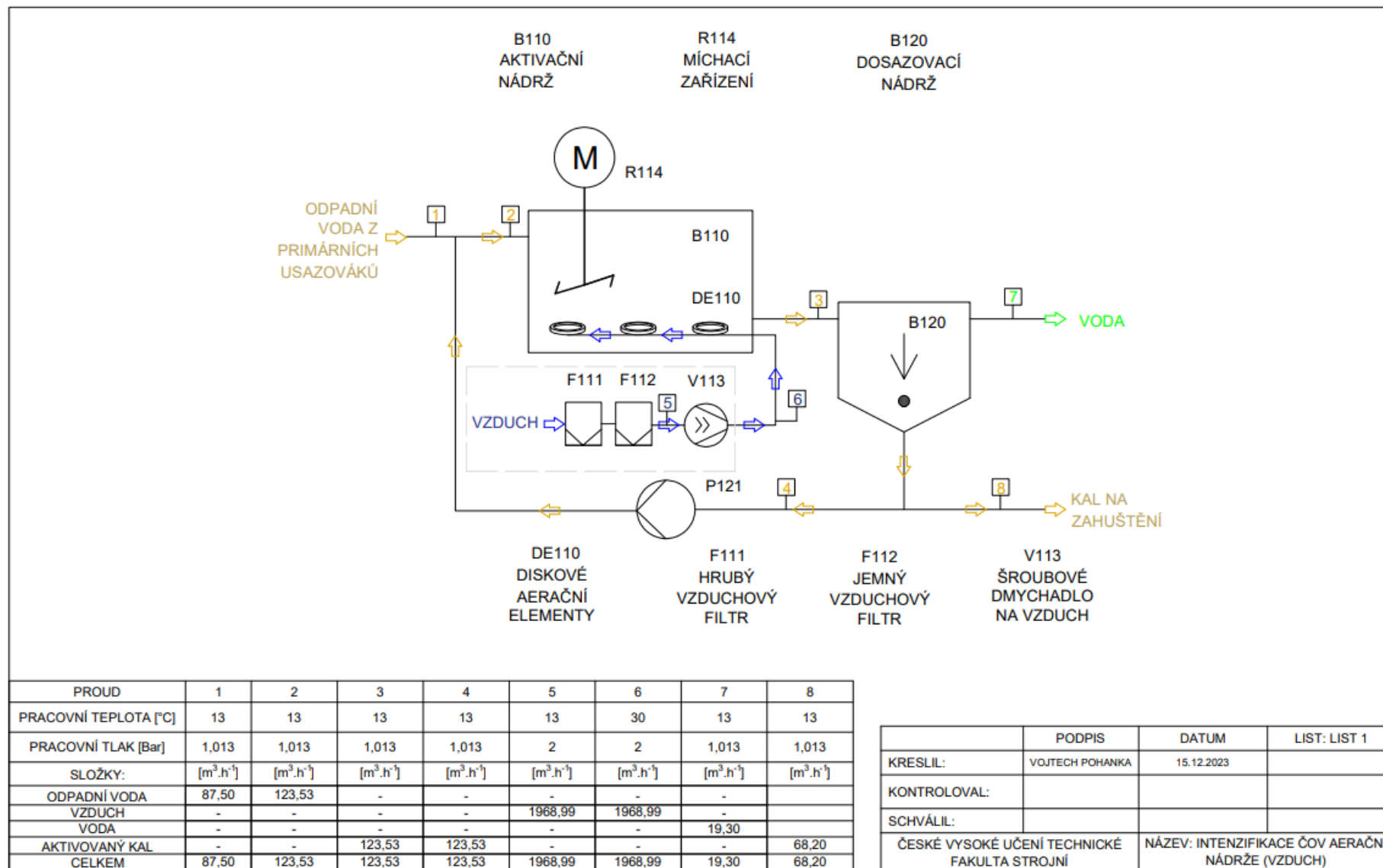
| | PODPIS | DATUM | LIST: LIST 1 |
|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------|--------------|
| KRESLIL: | VOJTECH POHANKA | 15.12.2023 | |
| KONTROLOVAL: | | | |
| SCHVÁLIL: | | | |
| ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ FAKULTA STROJNÍ | NÁZEV: INTENZIFIKACE ČOV AERAČNÍ NÁDRŽE (KYSLÍKOVÁ NÁDRŽ) | | |

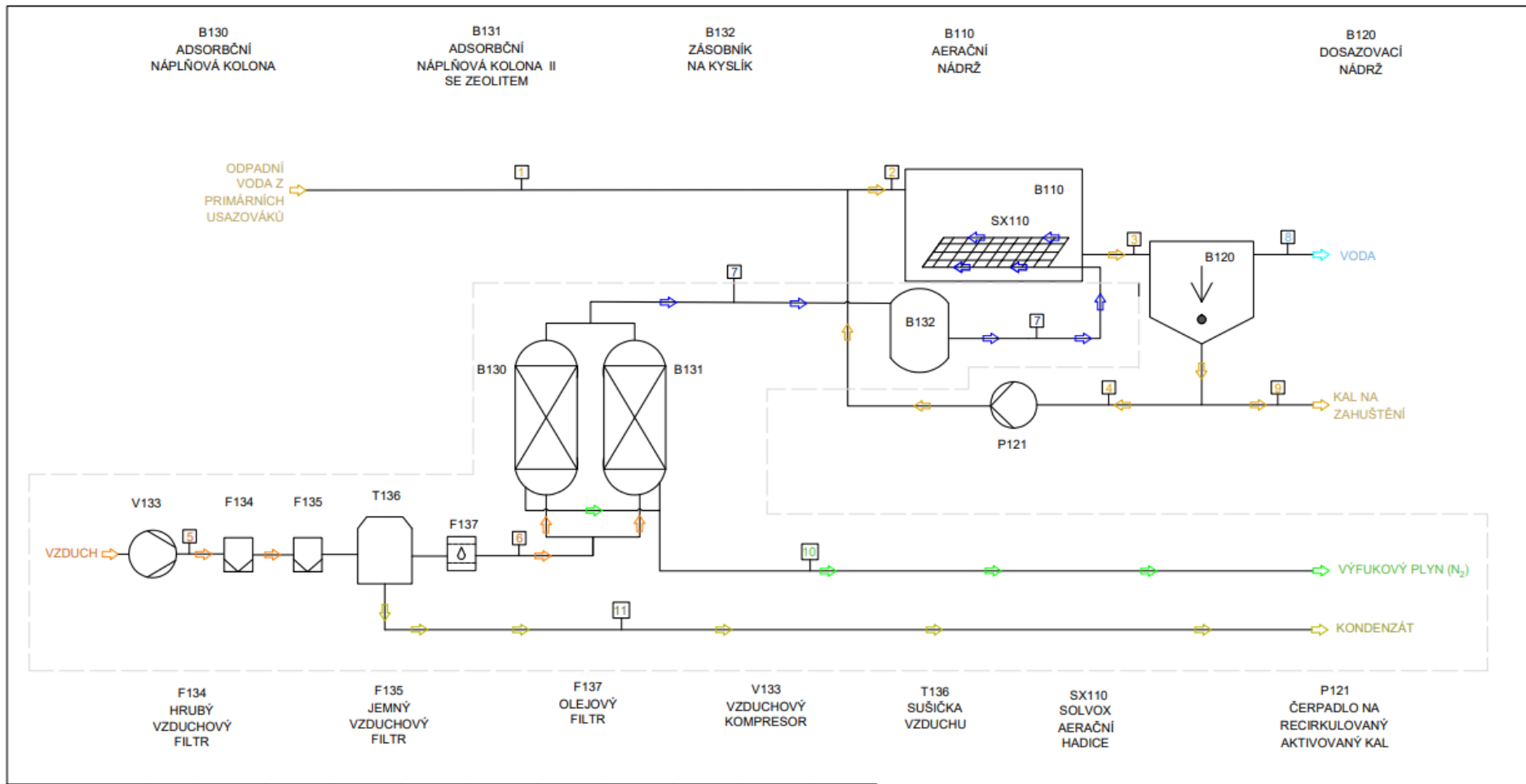


| PROUD | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| PRACOVNÍ TEPLOTA [°C] | 13 | 13 | 13 | 90 | 13 | 13 | 13 | 20 | 13 | 13 |
| PRACOVNÍ TLAK [Bar (a)] | 1,013 | 1,013 | 1,013 | 1,013 | 7 | 14,8 | 1,013 | 1,013 | 1,013 | 1,013 |
| SLOŽKY: | [m ³ .h ⁻¹] | [m ³ .h ⁻¹] | [m ³ .h ⁻¹] | [l.hod ⁻¹] | [Nm ³ O ₂ .hod ⁻¹] | [kgH ₂ .hod ⁻¹] | [m ³ .h ⁻¹] | [kg.s ⁻¹] | [m ³ .h ⁻¹] | [m ³ .h ⁻¹] |
| ODPADNÍ VODA | 43,75 | 61,76 | - | - | - | - | - | - | 52,7 | - |
| VODA | - | - | - | 52,70 | - | - | - | - | - | - |
| KYSLÍK | - | - | - | - | 45,27 | - | - | - | - | - |
| VODÍK | - | - | - | - | - | 8,125 | - | - | - | - |
| AKTIVOVANÝ KAL | - | - | 61,76 | - | - | - | 18,01 | - | - | 35,80 |
| KONDENZÁT | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| CELKEM | 43,75 | 61,76 | 61,76 | 52,70 | 45,27 | 8,125 | 18,01 | - | 52,7 | 35,80 |

| | PODPIS | DATUM | LIST: LIST 1 |
|-------------------------------------------------|-----------------|----------------------------------------------------------|--------------|
| KRESLIL: | VOJTECH POHANKA | 15.12.2023 | |
| KONTOLOVAL: | | | |
| SCHVÁLIL: | | | |
| ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ FAKULTA STROJNÍ | | NÁZEV: INTENZIFIKACE ČOV AERAČNÍ NÁDRŽE (ELEKTROLÝZA) | |

Příloha C: PFD – čistírna 10 000 EO – různé zdroje kyslíku:

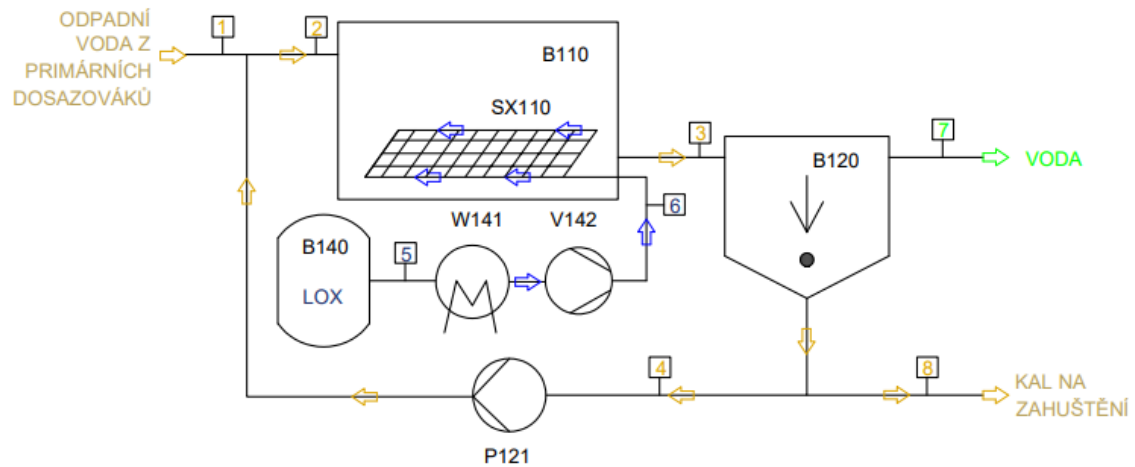




| PROUD | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|-------------------------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|----------|
| PRACOVNÍ TEPLOTA [°C] | 13 | 13 | 13 | 13 | 30 | 3 | 3 | 13 | 13 | 13 | 3 |
| PRACOVNÍ TLAK [Bar (a)] | 1,013 | 1,013 | 1,013 | 1,013 | 8 | 7,89 | 1,013 | 1,013 | 1,013 | 1,013 | 1,013 |
| SLOŽKY: | [m³.h⁻¹] | [m³.h⁻¹] | [m³.h⁻¹] | [m³.h⁻¹] | [Nm³.h⁻¹] | [Nm³.h⁻¹] | [Nm³.h⁻¹] | [m³.h⁻¹] | [m³.h⁻¹] | [Nm³.h⁻¹] | [kg.h⁻¹] |
| ODPADNÍ VODA | 87,50 | 123,53 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| VZDUCH | - | - | - | - | 5380,07 | 5380,07 | - | - | - | - | - |
| VODA | - | - | - | - | - | - | - | 19,30 | - | - | - |
| KYSLÍK | - | - | - | - | - | - | 88,628 | - | - | - | - |
| VÝFUKOVÝ PLYN | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 20287,61 | - |
| KONDENZÁT | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 147,60 |
| AKTIVOVANÝ KAL | - | - | 123,53 | 123,53 | - | - | - | - | 68,20 | - | - |
| CELKEM | 87,50 | 123,53 | 123,53 | 123,53 | 5380,07 | 5380,07 | 88,628 | 19,30 | 68,20 | 20287,61 | 147,60 |

| | PODPIS | DATUM | LIST: LIST 1 |
|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------|--------------|
| KRESLIL: | VOJTECH POHANKA | 15.12.2023 | |
| Kontroloval: | | | |
| SCHVÁLIL: | | | |
| ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ FAKULTA STROJNÍ | NÁZEV: INTENZIFIKACE ČOV AERAČNÍ NÁDRŽE (PSA) | | |

W141 VÝPARNÍK SX110 SOLVOX AERAČNÍ HADICE V142 KOMPRESOR B110 AERAČNÍ NÁDRŽ B120 DOSAZOVACÍ NÁDRŽ P121 ČERPADLO NA RECIRKULOVANÝ AKTIVOVANÝ KAL B140 ZÁSOBNÍK SE ZKAPALNĚNÝM KYSLÍKEM



| PROUD | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| PRACOVNÍ TEPLOTA [°C] | 13 | 13 | 13 | 13 | -142,83 | 20 | 13 | 13 |
| PRACOVNÍ TLAK [Bar (a)] | 1,013 | 1,013 | 1,013 | 1,013 | 60 | 60 | 1,013 | 1,013 |
| SLOŽKY: | [m ³ .h ⁻¹] | [m ³ .h ⁻¹] | [m ³ .h ⁻¹] | [m ³ .h ⁻¹] | [kgO ₂ .h ⁻¹] | [Nm ³ O ₂ .h ⁻¹] | [m ³ .h ⁻¹] | [m ³ .h ⁻¹] |
| ODPADNÍ VODA | 87,50 | 123,53 | - | - | - | - | - | - |
| KYSLÍK | - | - | - | - | - | 93,02 | - | - |
| VODA | - | - | - | - | - | - | 19,30 | - |
| AKTIVOVANÝ KAL | - | - | 123,53 | 123,53 | - | - | - | 68,20 |
| CELKEM | 87,50 | 123,53 | 123,53 | 123,53 | - | 93,02 | 19,30 | 68,20 |

| | PODPIS | DATUM | LIST: LIST 1 |
|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------|--------------|
| KRESLIL: | VOJTECH POHANKA | 15.12.2023 | |
| Kontroloval: | | | |
| Schválil: | | | |
| ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ FAKULTA STROJNÍ | NÁZEV: INTENZIFIKACE ČOV AERAČNÍ NÁDRŽE (KYSLÍKOVÁ NÁDRŽ) | | |

