

# Technologické ověření provozních funkcí zařízení fermentoru

Bc. Radek Sedlačik

---

Diplomová práce  
2006



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav inženýrství ochrany živ. prostředí  
akademický rok: 2005/2006

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Radek SEDLAČÍK**  
Studijní program: **N 2808 Chemie a technologie materiálů**  
Studijní obor: **Inženýrství ochrany životního prostředí**

Téma práce: **Technologické ověření provozních funkcí zařízení fermentoru**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární studii využití fermentoru.
2. Navrhněte technologii pro daný fermentor, potřebné fyzikálně-chemické parametry měření a realizujte.
3. Ověřte funkce okruhů měření (podle druhu - teplota, vodivost, pH, obsah O<sub>2</sub>, ORP, turbidita), podle parametrů přesnosti a provozní spolehlivosti s pomocí analytických metod a přístrojů
4. V případě možnosti proveďte ověření okruhů dálkového měření fyzikálně-chemických parametrů fermentoru, vyhodnocení naměřených dat prověřovaných procesů a technologické funkce.

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

**Dle pokynů vedoucího diplomové práce**

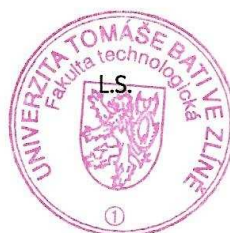
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Marie Dvořáčková, Ph.D.**  
Ústav inženýrství ochrany živ. prostředí

Datum zadání diplomové práce: **20. února 2006**

Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2006**

Ve Zlíně dne 20. února 2006

  
prof. Ing. Ignác Hoza, CSc.  
děkan



  
doc. Ing. Jaromír Hoffmann, CSc.  
ředitel ústavu

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce je zaměřena na technologické zprovoznění laboratorního fermentoru středních rozměrů s využitím průmyslových sond pro měření významných provozních veličin. V úvodní teoretické části je rozpracován popis jednotlivých typů bioreaktorů (fermentorů) a měřených veličin včetně sond a metod pro jejich měření. V praktické části je rozpracováno ověření reálných měřících snímačů a okruhů s využitím možností dálkového sledování a řízení fermentačních procesů pomocí sítě internet. Využívá se přitom projektu „Laboratoře integrované automatizace“. Fermentor je v tomto projektu označen jako „Úloha DE5 – Biochemické procesy“. V závěru práce jsou uvedeny souhrnné výsledky ověřování.

Klíčová slova: fermentor, bioreaktor, aerobní fermentace, biotechnologie, LDO, měření kvality/parametrů vodných roztoků

## **ABSTRACT**

This diploma work is intent on technological launching of middle size laboratory fermenter with utilization industrial sensors for measurement of important operational quantity. In introductory theoretical part is elaborated description of single type bioreactors (fermenters) and measured quantity inclusive sensors and methods for their measurement. In practical part is elaborated the attestation of real measuring sensors and circuit with using the potentiality of long-distance monitoring and driving of fermentative processes per the Internet. Fermenter is part of the project "Laboratories of integrated automatization" and is marked as "Experiment DE5 - Biochemical processes". In conclusion the work are stated summary results of checkout.

Keywords: fermenter, bioreactor, aerobical fermentation, biotechnology, LDO, water solutions quality/parameters measurement

Na tomto místě bych chtěl poděkovat svému vedoucímu Ing. Marii Dvořáčkové, Ph.D. a konzultantovi Doc. Ing. Františku Hruškovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky, které mi pomohly k vypracování této práce. Také děkuji Ing. Jiřímu Neckářovi za pomoc při sestavování fermentoru. Dále patří mé poděkování celému kolektivu Ústavu inženýrství ochrany životního prostředí za vytvoření výborných pracovních podmínek, rodině a přátelům za všestrannou pomoc při studiu.

Prohlašuji, že jsem na celé diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

Ve Zlíně, 24.5.2006

.....

jméno diplomanta

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>8</b>
<b>TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>9</b>
<b>1 FERMENTORY</b> .....	<b>10</b>
1.1 BIOTECHNOLOGIE A BIOREAKTORY .....	10
1.2 DĚLENÍ BIOREAKTORŮ .....	11
1.2.1 Vsádkové (batch) bioreaktory .....	11
1.2.2 Kontinuální fermentace .....	13
1.2.3 Fermentace s řízeným nástřikem (fed-batch) .....	13
1.3 FERMENTOR POUŽITÝ V TĚTO DIPLOMOVÉ PRÁCI .....	14
1.4 POPIS DEMONSTRAČNÍHO PROCESU .....	15
<b>2 REŠERŠE PROSTŘEDKŮ MĚŘENÍ</b> .....	<b>16</b>
2.1 SONDA PRO MĚŘENÍ ROZPUŠTĚNÉHO KYSLÍKU .....	16
2.2 SONDA PRO MĚŘENÍ VODIVOSTI.....	19
2.3 SONDA PRO MĚŘENÍ ZÁKALU .....	23
2.4 SONDA PRO MĚŘENÍ PH .....	26
2.5 SONDA PRO MĚŘENÍ ORP .....	29
2.6 VYHODNOCOVACÍ JEDNOTKA MĚŘENÝCH PARAMETRŮ .....	30
<b>3 FERMENTOR V PROJEKTU LABI A CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE</b> .....	<b>31</b>
3.1 POSTAVENÍ ÚLOHY DE5 (FERMENTORU) V PROJEKTU LABI .....	31
3.2 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE .....	32
<b>PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>33</b>
<b>4 PŘÍPRAVA A SESTAVOVÁNÍ FERMENTORU</b> .....	<b>34</b>
4.1 POUŽITÉ CHEMIKÁLIE.....	34
4.1.1 Roztoky použité pro kalibraci sond.....	34
4.1.2 Roztoky potřebné pro přípravu 1 l biomédia .....	35
4.2 POUŽITÉ PŘÍSTROJE .....	35
4.3 TESTOVÁNÍ PERISTALTICKÝCH ČERPADEL A KALIBRACE ČIDEL.....	36
4.3.1 Testování peristaltických čerpadel.....	36
4.3.2 Kalibrace sondy pH <sub>Dsc</sub> pro měření pH .....	39
4.3.3 Kalibrace sondy pH <sub>D sc</sub> pro měření ORP .....	39
4.3.4 Kalibrace indukčního vodivostního senzoru 3700 sc.....	39
4.3.5 Kalibrace zákalové sondy SOLITAX sc .....	39
4.3.6 Kalibrace sondy pro měření rozpuštěného kyslíku LDO .....	39
4.3.7 Kalibrace kapacitního hladinoměru CLM – 36 od firmy Dinel® (ČR).....	40
4.4 SESTAVOVÁNÍ FERMENTORU .....	41
4.4.1 Výběr vhodných sond a jejich instalace.....	41
4.4.2 Ověření zapojení sond a fermentoru pomocí pitné vody .....	43
4.4.3 Problémy s mícháním.....	44
4.4.4 Práce na softwarovém vybavení.....	45
<b>5 VÝSLEDKY DEMONSTRAČNÍHO POKUSU A JEJICH DISKUSE</b> .....	<b>46</b>
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>56</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	<b>57</b>

<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>58</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>59</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>60</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>61</b>

## ÚVOD

Kvasné procesy (fermentace) jsou starší než lidstvo samo. Přirozeně se vyskytují ve vodách nebo trávicích trakttech některých zvířat. Člověk je začal objevovat a využívat po rozšíření zemědělství, kdy potřeboval zajistit delší trvanlivost potravin popřípadě využít zbytků ze zemědělské produkce. Začal se vyrábět alkohol (pivo, víno, medovina, destiláty), ocet, sýry a jiné potraviny, které bez fermentace neměly potřebné vlastnosti (požitelnost, chuť, trvanlivost). Techniky fermentace se postupně vyvíjely od prostého zahrabání hrnce se zelím a přísadami do země (praktikováno dodnes především v Koreji) po složité procedury při výrobě speciálních sýrů a vín.

V devatenáctém století se s rozvojem biologie a mikrobiologie (Louis Pasteur) v kombinaci s nastupující průmyslovou výrobou stává z fermentace důležitý prostředek získávání velkých kvant potravin i surovin pro průmysl. Zároveň se začíná ve velké míře využívat kvasných procesů při zpracování biologického odpadu.

Ve století dvacátém se objevují nové kvasné procesy využitelné v průmyslu (výroba léků a biopolymerů) a zároveň se intenzifikují již známé procesy. Ke slovu se dostává automatizace, díky které se ušetří prostředky (pracovní síla a energie), ale zároveň se zvýší účinnost a lepší kontrolovatelnost kvasných procesů. Díky rozvoji výpočetní techniky a informačních sítí se úroveň automatizace ještě více zvyšuje.

Kvasné procesy však nejsou bez problémů. Naopak, co funguje ve zkumavkách a baňkách většinou nefunguje v provozních podmínkách. Proto se při výzkumu postupuje od „zkumavek“ a malých fermentorů (objem max. 2 l) přes střední fermentory (10-30 l viz. fermentor použitý v této diplomové práci) až po velké fermentory (objem nad 50 l) a poloprovozní zařízení. Teprve pak se dá zkoumaný proces s jistotou zavést do provozu. Průmyslové fermentory a jejich provoz jsou nákladné a případné problémy by znamenaly ztráty v řádech milionů.



## **TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 FERMENTORY

## 1.1 Biotechnologie a bioreaktory

Biotechnologie jsou procesy využívající živé organismy (živočichy, rostliny, mikroorganismy) nebo jejich části (tkáňové kultury, buňky, enzymy) k výrobě nebo modifikaci produktů. Oproti klasickým (chemickým) procesům mají několik výhod. Umožňují získávat produkty, které klasickými technologiemi nelze vyrobit (složité organické sloučeniny, léky, antibiotika,...), u jiných produktů zase poskytují biotechnologie vyšší výtěžnost nebo méně škodlivých vedlejších produktů. Pracují také za příznivějších podmínek jako je normální atmosférický tlak a teplota 0-40°C, čímž se snižují nároky na energii. Díky těmto výhodám dnes patří biotechnologický průmysl mezi nejrychleji se rozvíjející průmyslová odvětví.

Biotechnologie však mají i své nevýhody, mezi které patří možná infekčnost provozu a citlivost na kontaminaci z vnějšího prostředí. Při práci s mikroorganismy je zároveň nutné dodržovat dané optimální podmínky což klade zvýšené nároky na jejich řízení. Vzniklé produkty se pak musí složitě izolovat, neboť jsou často v nízkých koncentracích nebo ve velmi složitých směsích.

Aby bylo možné využívat biotechnologie v průmyslovém měřítku, musela být vyvinuta zařízení umožňující kontrolu biochemických procesů a zároveň jejich ochranu před vnějším prostředím (a naopak) – bioreaktory. Bioreaktory (fermentory) mají různé tvary a velikosti. Od malých laboratorních fermentorů (0,1-10 l) určených pro výzkum, přes středně velké (10-50 l) poloprovozní až po obrovské průmyslové fermentory (desítky m<sup>3</sup>). Všechny však mají tři společné oblasti, jejichž zvládnutí má klíčový vliv na využívané biochemické procesy, jsou to:

- a) *Sterilizace* – u většiny procesů je naprosto nezbytná. Využívá se tepelné sterilizace pomocí přehřáté vodní páry nebo chemické sterilizace. U fermentoru použitého v této diplomové práci je vhodnější chemická sterilizace, protože opakované použití páry by poškodilo měřicí sondy popř. těsnění mezi skleněnými a nerezovými částmi fermentoru. Je také nutná sterilizace všech vstupů do bioreaktoru (vzduch na aeraci, substrát, minerální média,...), která se provádí pomocí hustých filtrů (vstup vzduchu) nebo tepelně. Jsou však známy fermentace, kterým kontaminace nevádí, např. kultivace SCP na sulfidových výluzích, jež jsou spontánně chráněny přítomností rozpuštěného SO<sub>2</sub>, nebo je-li možno využít

způsobu vnitřní tepelné ochrany aplikací termofilních organismů při vyšší teplotě, při níž jsou kontaminující organismy dezaktivovány [3].

- b) *Regulace a řízení biochemické reakce* – je velmi komplikované, protože biochemické reakce většinou probíhají uvnitř živých buněk, ale dá se ovlivňovat jen jejich vnější prostředí (teplota, tlak, pH,...). Tato oblast souvisí se zadáním diplomové práce a proto se jí budu věnovat.
- c) *Izolace produktů* – patří sem izolace, čištění popř. stabilizování získaných produktů. Je to významná oblast, která často způsobuje komplikace. Produkty jsou až na výjimky v nízkých koncentracích jako část složitých směsí. Bývají také nestabilní, což komplikuje vlastní izolaci a další zacházení s nimi. V diplomové práci se použije jednoduchý proces aerobního čištění odpadní vody  $\Rightarrow$  nebudou získávány konečné produkty a proto odpadá jejich izolace.

## 1.2 Dělení bioreaktorů

Bioreaktory lze dělit podle velikosti na malé, střední a velké (viz. výše). Velké (průmyslové) poskytují vysokou produkci, malé se zase využívají k výzkumu a k rozvoji biotechnologických procesů. Zvětšování měřítka (scale-up) se používá při zavádění nových procesů a bioreaktorů (laboratoř-poloprovoz-provoz), naopak zmenšování měřítka (scale-down) se většinou používá při optimalizaci stávajících procesů (využívá se zmenšená kopie průmyslového reaktoru). Významným kritériem pro dělení bioreaktorů je i druh biochemického procesu – rozlišujeme bioreaktory aerobní a anaerobní. Dále se bioreaktory dělí podle uložení „biokatalyzátoru“ (živé/mrtvé buňky nebo enzymy) na klasické (1.generace) a na bioreaktory s imobilizovaným biokatalyzátorem (2.generace), které v mnoha ohledech přibližují bioreaktory klasickým chemickým reaktorům (podobné matematické modely, enzym je obdobou klasického katalyzátoru,...). Podle způsobu provozu rozlišujeme bioreaktory vsádkové (batch), kontinuální a fed-batch reaktory.

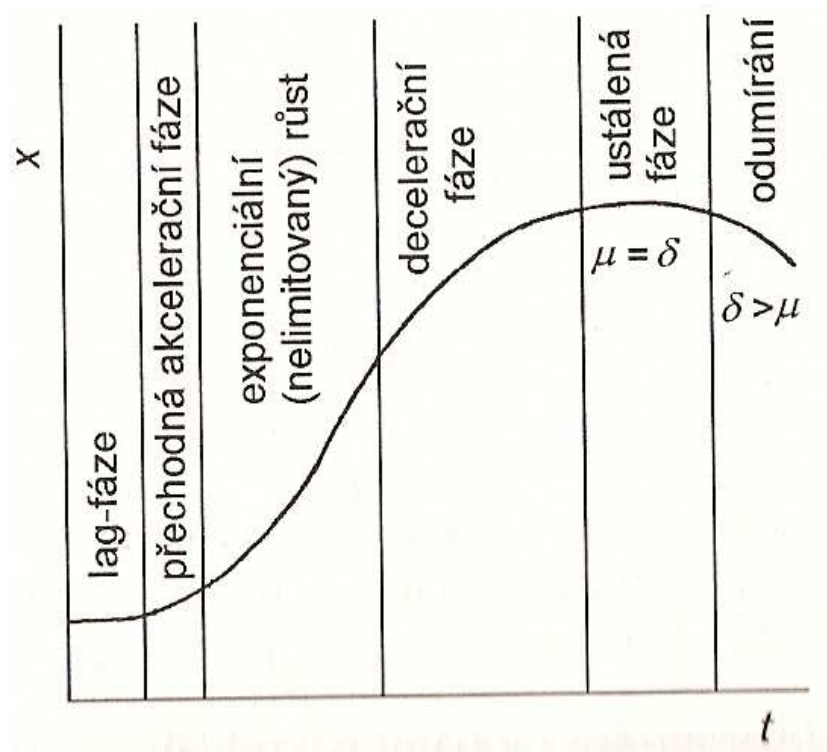
### 1.2.1 Vsádkové (batch) bioreaktory

Vsádkový fermentor představuje nejběžnější uspořádání fermentorů. Do reaktoru se vloží fermentační médium a inokulum a při zvolených reakčních podmínkách zde roste biomasa, případně dochází k produkci žádaných metabolitů. Po dosažení určených parametrů nebo

spotřeba substrátu se proces přerušuje, reaktor se vyprázdní a připraví pro novou vsádku [3].

Výhody vsádkového uspořádání spočívají v tom, že médium je snadno sterilizovatelné (při omezeném trvání vsádkového pokusu je omezeno riziko kontaminace a mutací), lze snadno měnit reakční podmínky jednotlivých vsádek. Také se spotřebuje relativně málo drahého média nebo inokula (zejména při výzkumu) a lze navíc řízeně oddělit fázi růstu mikroorganismů od fáze produkční např. při výrobě sekundárních metabolitů [3].

Nevýhodou je, že při provozu reaktoru vznikají časové ztráty, neboť fermentor se musí vyprazdňovat, čistit a znovu napouštět a vsádka se musí sterilizovat. Opakovaně se musí počítat s dalšími časovými ztrátami v důsledku lag-fáze (doba, kdy v organismech vložených do prostředí začínají složité metabolické procesy a růst je potlačen (Obr. 1) [3].



Obr. 1. Schéma průběhu křivky růstu mikroorganismů ve vsádkovém fermentoru.  $x$  – koncentrace živých mikroorganismů,  $t$  – doba růstu,  $\mu$  – měrná rychlost růstu,  $\delta$  – rychlost zániku biomasy [3].

### 1.2.2 Kontinuální fermentace

Při kontinuální fermentaci do reaktoru nepřetržitě přivádíme substráty a živiny a z reaktoru nepřetržitě odvádíme výstupní kapalinu s biomasou, nespotřebované substráty a živiny, případně metabolické produkty. Výhody kontinuálních fermentací spočívají zejména v tom, že odpadají ztrátové časy na opakované plnění a vyprazdňování reaktoru, jeho čištění a sterilizaci. Pokud dodržíme dobu prodlení v reaktoru na zvolené hodnotě, má odcházející produkt konstantní složení. Použití kontinuální fermentace je tedy vhodné tam, kde technologie nevyžaduje změny reakčních podmínek během fermentačního procesu, jako jsou výroby biomasy a primárních metabolitů [3].

Kontinuální fermentace je nevhodná pro procesy, kde tvorba žádaného produktu probíhá odděleně a za jiných podmínek než které jsou vhodné pro růstovou fázi, jako je tomu například u výroby některých sekundárních metabolitů. Navíc hrozí nebezpečí, že mikroorganismy zůstanou v reaktoru (díky ideálnímu míchání) několikanásobně déle než je střední doba prodlení a dojde tedy k růstu patogenních druhů nebo k nežádoucím mutacím.

### 1.2.3 Fermentace s řízeným nástřikem (fed-batch)

Při fed-batch fermentaci je jedna nebo více složek živin dávkována do fermentoru během kultivace, přičemž produkt zůstává v reaktoru až do ukončení fermentace. Dávkování může být kontinuální, přerušované nebo řízené podle zadaných parametrů. Koncentrace substrátu (živin) může být udržována na konstantní úrovni nebo se může měnit podle optimálního algoritmu.

Toto uspořádání má oproti vsádkovému tu výhodu, že se může lépe ovlivňovat výtěžek požadovaného produktu. Fed-batch je zároveň vhodná pro následující případy [3]:

- a) *Substrátová inhibice* – některé živiny (alkoholy, organické kyseliny) inhibují růst mikroorganismů. Vhodným dávkováním může být zkrácena lag-fáze a výrazně redukována inhibice růstu buněk.
- b) *Vysoká koncentrace buněk* – pro dosažení vysoké koncentrace buněk je potřeba vysoká koncentrace živin, která však za těchto podmínek působí inhibičně.
- c) *Glukosový efekt* – při výrobě droždí se za přebytku cukrů tvoří etanol (působí inhibičně) i za aerobních podmínek. Pro potlačení efektu se používá řízený nástřik.

- d) *Katalytická represe* – při nadbytku snadno metabolizovatelného zdroje (např. glukosa) vzrůstá v mikroorganismu koncentrace ATP, čímž se potlačí enzymatické biosyntézy  $\Rightarrow$  zpomalí se metabolismus energetického zdroje (=nežádoucí).
- e) *Optimalizace tvorby metabolitu* – pro růst buněk je vhodná vyšší koncentrace substrátu, ale pro produkci žádaného metabolitu bývá výhodnější nízká koncentrace živin. Řízeného nástřiku se využívá např. při výrobě aminokyselin.
- f) *Prodloužení doby produkční periody* – některé mikroorganismy nejprve spotřebovávají substrát pro růst a teprve po dosažení stacionární fáze syntetizují žádaný sekundární metabolit (např. antibiotika). U vsádkové fermentace je však již koncentrace substrátu nízká a proto je produkční (stacionární) doba krátká. U fed-batch kultivace se však dá koncentrace substrátu nastavit na optimální úroveň a tak se prodlouží produkční fáze.
- g) *Snižování viskozity média* – při produkci mikrobiálních polymerů může být udržována nízká viskozita média kontinuálním nástřikem živin.
- h) *Nahrazení ztrátové vody* – při delších aerobních fermentacích je s procházejícím plynem odnášeno velké množství vody (výpar). To je kompenzováno nástřikem **vodného** roztoku substrátu (minerálů, prekurzorů,...).

### 1.3 Fermentor použitý v této diplomové práci

V této diplomové práci bude použit Laboratorní fermentor LF20 (používaný v biozávodě JZD Slušovice). Je to válcová nádoba z nerez oceli se skleněným pláštěm o objemu cca 15 l. Pracovní objem suspenze je cca 10 l, protože se musí počítat s rezervou na možnou tvorbu pěny a pro sondy. Vytápění je zajištěno elektricky, chlazení studenou vodou. Těsnost hřídele míchadla je řešena magnetickou spojkou (Obr. 21).

Odpěnění je zajištěno odpěňovacím kotoučem v horní části. Úroveň pěny je snímána kapacitním čidlem. Dále je snímána teplota (čidlo Pt100), průtok plynné fáze a přetlak. Zbylé parametry (pH, vodivost, rozpuštěný kyslík, zákal, ORP) zaznamenávají nové sondy od firmy Hach Lange, kterým se budu věnovat v druhé části teorie.

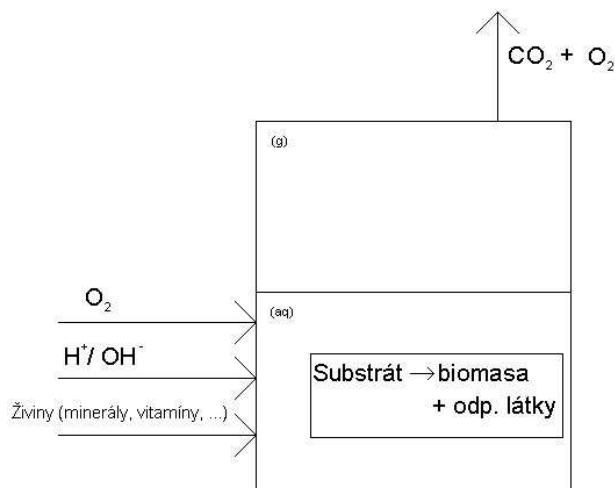
Aerace bude ovládána pomocí nového ventilu a průtokoměru. Odběr vzorků se bude provádět pomocí přetlaku ve zvolených intervalech. Fermentor byl doplněn vstupem pro dávkování kapalné fáze. Jedním otvorem ve víku fermentoru je možné dávkovat až čtyři různé kapaliny. Bude se dávkovat zásada/kyselina pro udržení pH na zvolené hodnotě, dále

je možno dávkovat antipěnicí činidlo a čtvrtý vstup je rezervován pro dávkování biomédia popř. substrátu. Laboratorní fermentor LF20 tedy lze použít pro batch i pro fed-batch fermentaci.

Původní řídicí skříň SLF20 byla nahrazena moderním systémem automatizace a informatiky. Fermentor je doplněn prostředky měření všech parametrů pro sledování bioproců a centrální jednotkou na bázi průmyslového personálního počítače (IPC). Systém je průmyslovým počítačem napojený na LAN umožňující dálkovou kontrolu a ovládání. Nově vzniklou sestavu lze ovládat také pomocí sítě internet přes webové rozhraní. V příštím akademickém roce je plánováno přidání senzorů pro měření  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$  případně  $NH_3$  v plynné fázi, takže tento fermentor bude použitelný i pro anaerobní biochemické procesy.

#### 1.4 Popis demonstračního procesu

Ke splnění zadání diplomové práce bude použit jednoduchý aerobní proces (Obr. 2). Fermentor se naplní směsí cca 10 l aktivovaného kalu s biomédiem. Suspenze se bude neustále míchat, aby bylo dosaženo koncentrační a teplotní homogenity vsádky. Míchadlem se zároveň budou rozbíjet bubliny dodávaného vzduchu, čímž se zlepší aerace.



Obr. 2. Schéma aerobních procesů ve fermentoru.

Mikroorganismy při svém růstu spotřebovávají rozpuštěný kyslík, který musí být dodáván v dostatečném množství. Dále bude udržována zvolená teplota a pH, aby byly dodrženy optimální podmínky pro růst mikroorganismů (biomasy). Koncentrace biomasy bude stanovována pomocí zákalu suspenze a získané hodnoty se porovnají s výsledky analýzy DOC ve vzorcích odebraných ve stanovených intervalech.

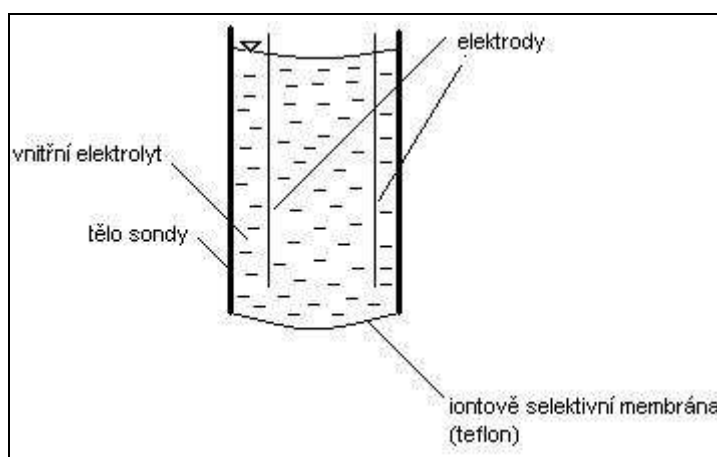
## 2 REŠERŠE PROSTŘEDKŮ MĚŘENÍ

V další části je rozpracována rešerše pro prostředky měření parametrů vodných roztoků. V rámci projektu LABI byl proveden výběr technických prostředků dálkového měření veličin elektrické vodivosti, pH, redoxního potenciálu (ORP), obsahu rozpuštěného kyslíku a zákalu. Závěrečná volba potvrdila použití snímačů firmy HACH LANGE. Tato firma je globálním partnerem koncernu SIEMENS v oblasti měření a regulace výroby pitné vody a čištění odpadních vod. Prostředky pro měření dalších parametrů na zařízení DE5 (teplota, přetlak, výška hladiny, průtok) byly součástí řešení projektu LABI a nejsou v této práci analyzovány.

### 2.1 Sonda pro měření rozpuštěného kyslíku

Koncentrace kyslíku rozpuštěného ve vodě je jedním z hlavních ukazatelů kvality vody. Je významným indikátorem biologického znečištění povrchových vod a důležitý parametr, který určuje rozhodujícím způsobem efektivitu aktivačního, nitrifikačního i denitrifikačního procesu v biologických ČOV. Udržování optimální úrovně koncentrace kyslíku umožňuje optimalizovat chod čistírenské technologie - dosáhnout vysoké kvality vyčištěné vody při minimálních nákladech na elektrickou energii potřebnou pro aerační zařízení. V potravinářském průmyslu ovlivňuje koncentrace kyslíku průběh kvasných procesů při výrobě potravin i při jejich skladování.

Pro měření kyslíku se využívá různých elektrod založených na elektrochemických procesech. Uvedu pouze základní schéma (Obr. 3) typické kyslíkové elektrody.



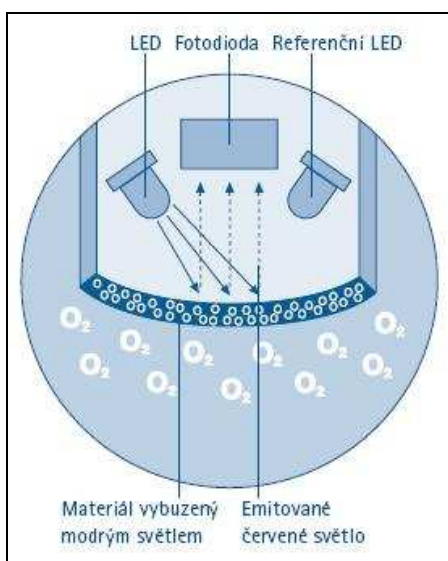
Obr. 3. Nákres klasické sondy založené na elektrochemickém principu.



Kyslík zde přechází z měřené kapaliny přes iontově selektivní membránu z teflonu do vnitřního elektrolytu. Zde se nacházejí dvě malé elektrody. Anoda je ze stříbra, zatímco katoda může být ze zlata, stříbra či platiny. Na katodě vznikají z kyslíku ionty  $2O^{2-}$ , ty pak reagují se stříbrem na anodě za vzniku  $Ag_2O$ :



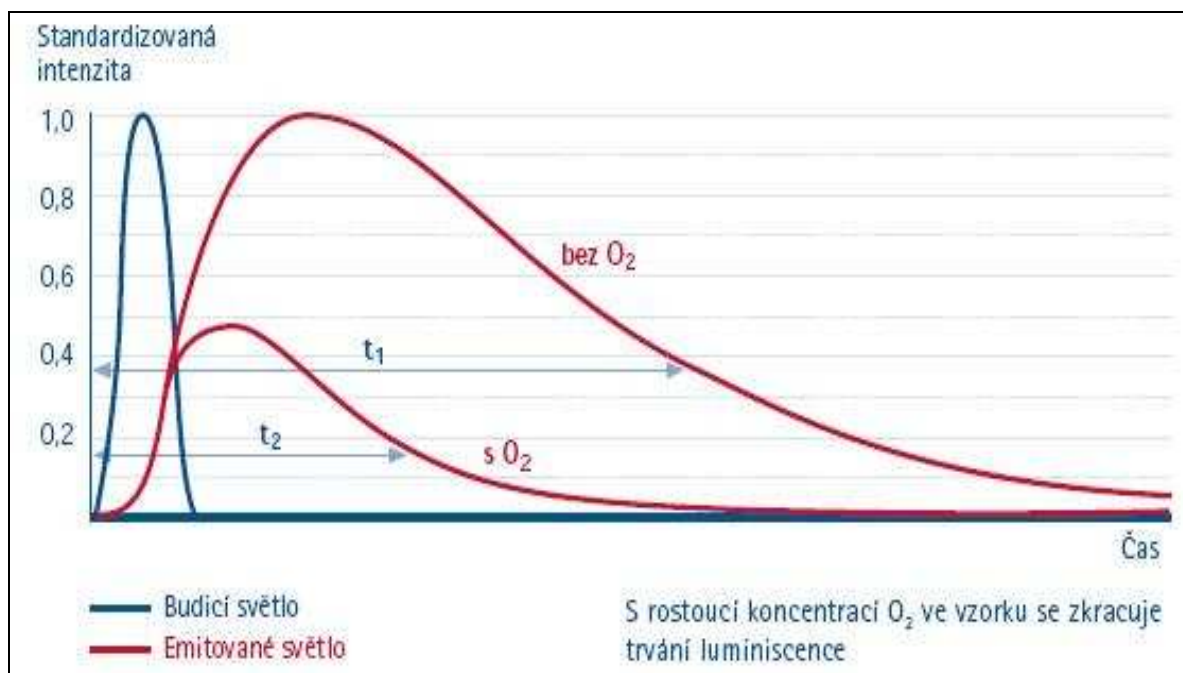
Tato metoda a jí podobné však mají řadu nevýhod. Kvůli malým elektrodám je zapotřebí určitý polarizační čas. Anoda a vnitřní elektrolyt se musí čas od času vyměnit. Dále je prostup kyslíku přes membránu ovlivněn teplotou (elektrody jsou vybaveny čidly teploty pro dodatečnou korekci), rychlostí proudění měřené kapaliny (nutný minimální průtok), znečištěním membrány (její čištění případně výměna). Elektroda se musí pravidelně kalibrovat, navíc je měření výrazně ovlivněno možnou přítomností  $H_2S$ . I přes nutnost pravidelné údržby a kalibrace jsou dnes klasické elektrochemické metody měření kyslíku zcela jistě nejrozšířenější (tradice + nízká cena).



Obr. 4. Princip funkce LDO [6].

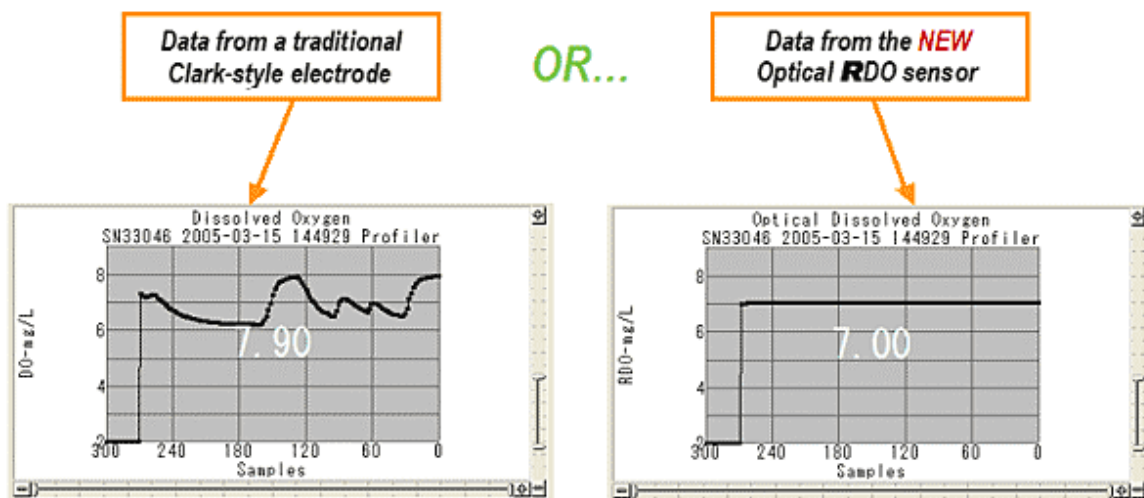
V současnosti nastupuje nová generace kyslíkových sond založená na optické metodě, která se označuje zkratkou LDO. Zkratka LDO (Luminescent Dissolved Oxygen) znamená luminiscenční rozpuštěný kyslík. Metoda využívá schopnosti kyslíku zhaset luminiscenci, která vzniká po ozáření modrým světlem na povrchu senzoru opatřeného luminiscenční vrstvou. Při přechodu molekul z vybuzeného do základního stavu se emituje červené světlo (Obr. 4). Časový interval od okamžiku osvětlení modrým světlem do okamžiku vyzáření červeného světla je úměrný koncentraci kyslíku ve vodě (Obr. 5) (Pozn. neměří se intenzita vyzářeného červeného světla, ale trvání luminiscence, protože je měření času mnohem

přesnější!). Sonda je opatřena červenou LED diodou zajišťující průběžnou kalibraci měřícího systému [6].



Obr. 5. Závislost intenzity luminiscence na čase podle koncentrace kyslíku [6].

Optická metoda má proti elektrochemickým řadu výhod. Měření je stabilní (Obr. 6), není rušeno interferencemi s  $\text{H}_2\text{S}$ , těžkými kovy ani změnami pH. Se sondou se snadno manipuluje, nevyžaduje výměnu anody ani vnitřního elektrolytu a díky zabudované červené LED diodě (interní standard) není nutno provádět kalibraci (kalibrace provedena již ve výrobě). Pouze se jednou ročně vymění víčko senzoru. Navíc má vysokou rychlost odezvy (90% odezvy do 30s) protože zde není žádný polarizační čas [6].



Obr. 6. Srovnání stability měření rozpuštěného kyslíku tradičními elektrodami (vlevo) a senzorem RDO ( $\approx$  LDO) (vpravo) [12].

LDO sondy vyvíjí a prodává firma *Hach Lange* (parametry viz. Tab. 1). Obdobný systém si již v roce 1997 patentovala firma *Environmental Instruments, LLC* [14]. Další firmou prodávající senzory na stejném principu je *In-Situ Inc.* [12], která nabízí svůj senzor pod značkou **RDO (Rugged Dissolved Oxygen)**. O kvalitě této metody svědčí fakt, že ji agentura EPA (Environmental Protection Agency) uznala jako třetí metodu (EPA Method 360.3) uznávanou vedle Winklerovy titrace (EPA Method 360.2) a elektrochemických-membránových metod (EPA Method 360.1) [13] při stanovování rozpuštěného kyslíku ve vodě.

Tab. 1. Technické parametry sondy LDO firmy *Hach Lange* [6].

Model	LXV416
Princip měření	Luminiscenční
Rozsah měření	0,05-20,00 mg.l <sup>-1</sup> O <sub>2</sub>
	0,5-200% nasycení
Nejistota měření	0,05 mg.l <sup>-1</sup> O <sub>2</sub> (<1 mg.l <sup>-1</sup> )
Časová odezva	30 sec
Provozní teplota	0-50°C
Min. průtok	0 m.s <sup>-1</sup>
Interval kalibrace	Není zapotřebí
Doba polarizace	Žádná

## 2.2 Sonda pro měření vodivosti

Vodivost (konduktance)  $G$  vyjadřuje schopnost elektrolytu vést elektrický proud. Je to v podstatě převrácená hodnota odporu  $R$  a její jednotkou je siemens  $S$ .

$$G = \frac{1}{R} = \frac{I}{U} \quad (3)$$

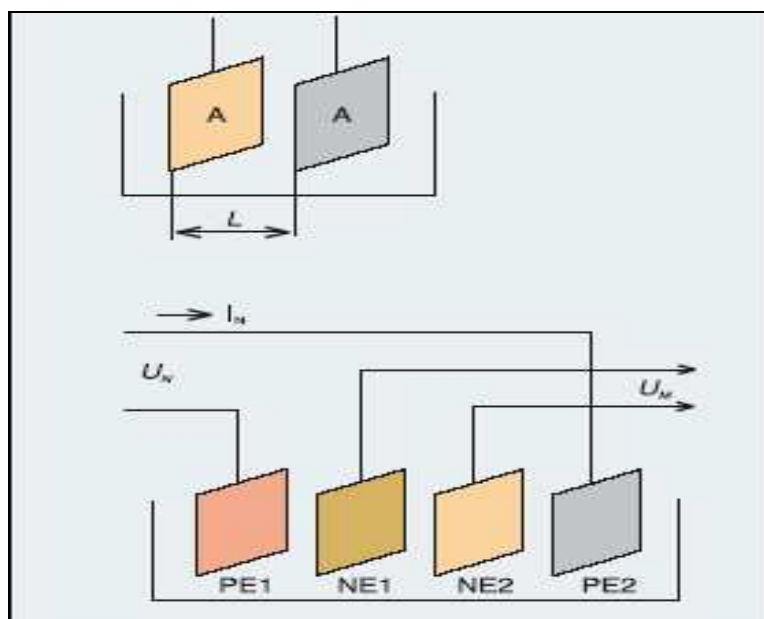
Vodivost je závislá na geometrických vlastnostech vodiče (ploše elektrod  $S$  a jejich vzdálenosti  $l$ ), proto byla zavedena tzv. měrná vodivost (konduktivita)  $\kappa$ .

$$\kappa = G \frac{l}{S} \quad (4)$$

Měrná vodivost má jednotku  $S.m^{-1}$ , která je však příliš velká, proto se v praxi používá  $mS.cm^{-1}$  nebo  $\mu S.cm^{-1}$ .

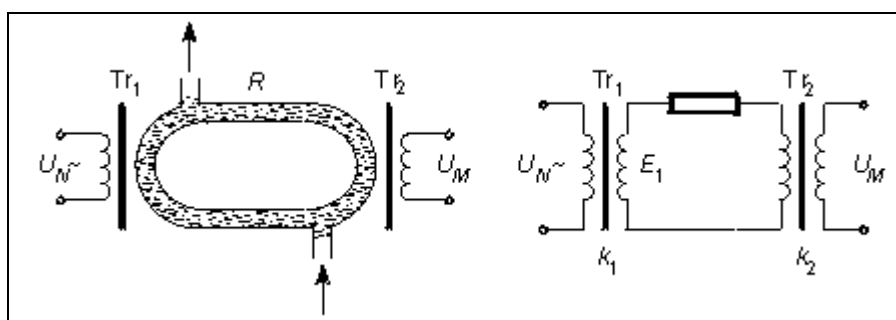
Hodnota konduktivity nás informuje o celkové koncentraci iontů (solí, disociovaných kyselin a zásad) v měřeném roztoku, proto se jí využívá při kontrole čistoty kyselin, zásad (čpavku) a hlavně vody. U demineralizované vody by měla být konduktivita co nejnižší (rovna nule). Pitná voda má mít určitý obsah rozpuštěných solí, takže hodnota její konduktivity je větší než nula. U znečištěné vody se konduktivita pohybuje v širokém rozsahu hodnot v závislosti na typu a koncentraci znečišťujících látek.

Sondy měřící konduktivitu jsou buď kontaktní nebo bezkontaktní. Kontaktní měřící sondy mají dvě nebo čtyři elektrody zasahující přímo do měřeného roztoku (Obr. 7). Protože jsou elektrody často smáčeny agresivním roztokem, musí být vyrobeny z materiálu vysoce odolného vůči korozi. Důležitou charakteristikou měřící sondy je tzv. elektrická odporová konstanta měřící cely  $K$ , daná poměrem vzdálenosti elektrod a jejich smáčené plochy, která definuje objem „cely“, ve kterém se vodivost média měří. Konstanta  $K$  je určena konstrukcí sondy a prakticky se pohybuje od hodnoty 0,01 do 10, výjimečně i do  $100 \text{ cm}^{-1}$  a pro konkrétní aplikaci se volí podle očekávaného rozsahu měrné vodivosti. K měření vodivosti se používá pro potlačení vlivu polarizace střídavý proud o kmitočtu 50 až 5 000 Hz s malou amplitudou, aby nedocházelo k elektrolyze roztoku [1].



Obr. 7. Kontaktní sonda pro měření elektrolytické vodivosti s deskovými elektrodami: a) dvouelektrodová, b) čtyřelektrodová; PE1, PE2 – proudové elektrody, NE1, NE2 – měřící napěťové elektrody,  $U_N$  – napájecí napětí,  $I_N$  – proud protékající roztokem,  $U_M$  – napětí úměrné vodivosti [1].

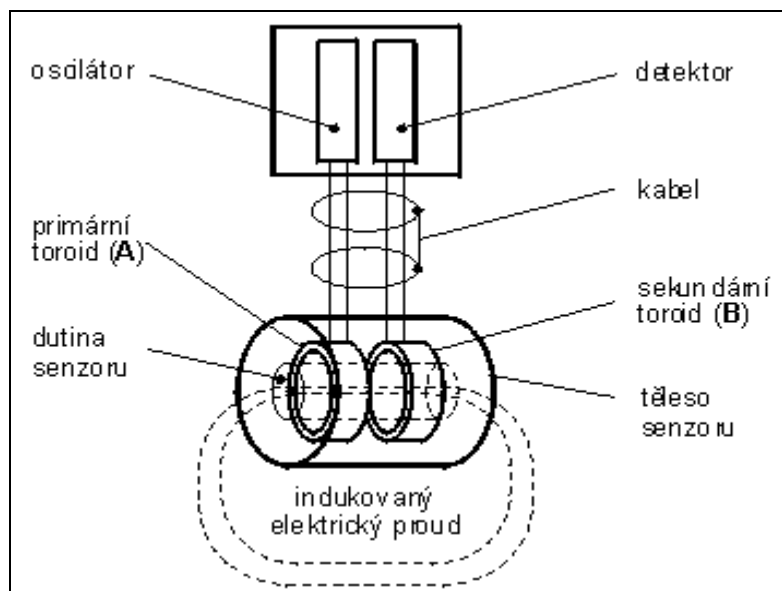
Dvouelektrodové měřicí sondy s deskovými, soustřednými nebo kolíkovými elektrodami (Obr. 7a) se používají pro měření elektrické vodivosti čisté vody nebo silně zředěných vodných roztoků s měrnou vodivostí od  $0,04 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  do  $25 \text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Při vodivostech nad  $5 \text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$  však dochází u dvouelektrodových soustav často k polarizačním jevům a tím i k možným chybám měření. Pro měření roztoků se středně velkou měrnou vodivostí asi od  $0,01 \text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$  do  $500 \text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$  se proto používají čtyřelektrodové měřicí sondy (Obr. 7b). Zde prochází napájecí proud  $I_N$  roztokem přes dvě proudové elektrody a potenciálový úbytek na roztoku se snímá dvěma měřicími napěťovými elektrodami. Napětí na měřicích elektrodách  $U_M$ , úměrné vodivosti, se vyhodnocuje obvodem s vysokou vstupní impedancí, aby byl minimalizován procházející proud a tím i polarizace měřicích elektrod. Polarizace, která vzniká na proudových elektrodách, výsledek měření neovlivňuje. Společným nedostatkem kontaktních měřicích sond je možnost znečištění elektrod vyloučenými či usazenými látkami z roztoku a nutnost přizpůsobení snímače vodivosti pro daný měřený roztok [1].



Obr. 8. Princip bezkontaktního měření vodivosti [10].

Uvedené nedostatky nemají induktivní měřicí sondy (Tab. 2), které jsou bezelektrodové (bezkontaktní) a jejich princip je patrný z obrázků (Obr. 8 a Obr. 9). Do trubice z elektricky nevodivého materiálu je přivedena měřená vodivá kapalina tvořící uzavřený proudový okruh. Trubice je provlečena jádrem dvou toroidních transformátorů TR1 a TR2, takže vodivá kapalina v trubici vlastně představuje jednozávitové sekundární vinutí buďcího transformátoru TR1 a současně jednozávitové primární vinutí měřicího transformátoru TR2. Jestliže se primární vinutí transformátoru TR1 napájí konstantním nízko-frekvenčním napětím  $U_N$ , indukuje se v kapalném okruhu měřené kapaliny proud úměrný její vodivosti. Jeho působením se v sekundárním vinutí měřicího transformátoru TR2 indukuje napětí  $U_M$ , které je úměrné proudu procházejícího měřenou kapalinou, a tedy její měrné vodivosti. Snadno lze dokázat, že napětí  $U_M$  je nezávislé na frekvenci buďcího napětí  $U_N$ , která ovlivňuje pouze velikost obou transformátorů. Aktivní části induktivní

měřicí sondy nepřicházejí do přímého styku s měřeným médiem, a sondy jsou proto vhodné zejména pro měření korozivních roztoků s velkou vodivostí. Jedinou sondou lze měřit vodivost v rozpětí větším než 6 dekad, např. od  $0,5 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  přibližně do  $2\,500 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ , přičemž ani nevadí, jestliže jsou v médiu obsaženy nečistoty, které u kontaktních systémů způsobují pokrytí elektrod nevodivým povlakem [1].



Obr. 9. Náčres bezelektrodového vodivostního senzoru [10].

Elektrická vodivost roztoků je teplotně velmi závislá, zejména při nízkých hodnotách vodivosti. Teplotní koeficient měrné vodivosti se pohybuje mezi 2 až 6 %  $^{\circ}\text{C}$  a může výrazně ovlivnit přesnost měření. Proto je součástí měřicích sond standardně teplotní čidlo (odporový teploměr, termistor), jehož signál se využívá v měřicím převodníku k automatické kompenzaci vlivu teploty na přesnost měření. Měřicí sondy se vyrábějí s velkou mechanickou a korozivní odolností pro průtočné nebo ponorné použití s různou formou připojení k technologickému procesu (příruba, šroubení, závit s převlečnou maticí aj.) [1].

Tab. 2. Technické parametry indukční vodivostní sondy firmy Hach Lange [6].

Model	3700 sc
Princip měření	Bezkontaktní indukční
Rozsah měření	$0,2 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1} - 2,0 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$
Interval kalibrace	Není třeba
Přenos signálu	Digitální
Materiál sondy	PFA Teflon, PP, PEEK, PVDF

### 2.3 Sonda pro měření zákalu

Zákal (turbidita) je definován jako snížení průhlednosti kapaliny způsobené přítomnými nerozpuštěnými látkami. Zákal se měří v relativních jednotkách (Tab. 3) a aby se dosáhlo prakticky porovnatelných výsledků, zákaloměry jsou kalibrovány standardní suspenzí formazinu. Zákal měřené látky je pak definován pomocí koncentrace kalibračního roztoku. Hodnota zákalu ovlivňuje pohlcování a rozptyl stejného množství elektromagnetického záření zpravidla v neviditelné infračervené oblasti. Velikost absorpce a nebo rozptylu je určována koncentrací pevných částic standardního roztoku [8].

Tab. 3. Nejvíce používané jednotky zákalu [8].

Jednotka	Popis
EBC	European Brewery Convention – jednotka používaná v pivovarnictví 1 EBC = 4 FTU = 4 FNU = 4 NTU
FTU	Formazine Turbidity Unit 1 FTU = 1 FNU = 1 NTU = 0,25 EBC
FNU	Formazine Nephelometric Unit – v Německu <b>TE/F</b> (Trübungseinheit/Formazin)
FAU	Formazine Attenuation Unit
NTU	Nephelometric Turbidity Unit
ZF <sub>n</sub> *	zákal formazinem nefelometricky (metoda měření rozptýleného záření) = FNU
ZF <sub>t</sub> *	zákal formazinem turbidimetricky, transmisní zákal (metoda měření útlumu záření) = FAU
Poznámka: * jednotky podle ČSN EN ISO 7027	

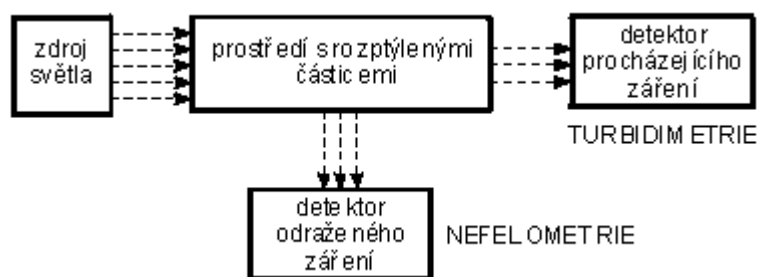
Měření zákalu se uplatňuje při výrobě nápojů (pivo, víno, ovocné šťávy), v úpravách vody (kontrola funkce pískových filtrů a odstředivek, sledování kvality zdrojů pitné vody, sedimentující látky v odpadních vodách), při měření koncentrace suspenzí (např. koncentrace biomasy ve fermentačním médiu – využito v této diplomové práci) apod..

Koncentraci suspendovaných částic lze zjišťovat dvojím způsobem (Obr. 10):

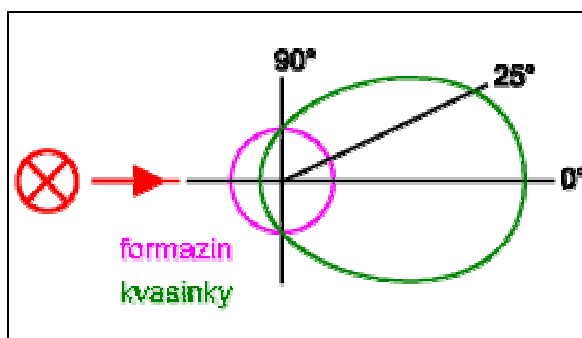
- a) měřením světelného toku po průchodu prostředím ve směru dopadajícího světelného toku ze zdroje, a pak hovoříme o **turbidimetrii**.
- b) měřením světelného toku, který je částicemi odražen kolmo nebo pod určitým úhlem na směr dopadajícího paprsku. Tento způsob měření se označuje jako **nefelometrie** [10].

Moderní přístroje kombinují obě tyto metody a měřicí čidlo zákaloměru pracuje na principu poměrového vyhodnocení paprsků světla v rovině zdroje záření – absorpce paprsku přímého a paprsku rozptýleného, vzniklého odrazem od nerozpuštěných částic, udávajících zákal, v měřené kapalině. Tento způsob měření do značné míry kompenzuje

znečištění měřicí komory, barvu média i stáří optosoučástek. Poměrové vyhodnocení signálu v rovině referenčního paprsku je obvykle v úhlu  $90^\circ$ , ale optika přístroje může být konstruována i pro jiný úhel vyhodnocení. Pravoúhlý zákaloměr umožňuje zákal stanovit komplexněji (množství bílkovin i kvasinek, koloidní částice). **Dopředný úhel měření  $25^\circ$**  je vhodný pro stanovení množství větších částic nad cca  $1 \mu\text{m}$  (kvasinky, křemelina), **zpětný úhel měření  $135^\circ$**  se používá např. pro odstředěné mléko. Při porovnání obou naměřených hodnot je možné zjistit podíl bílkovin a kvasinek na zákalu, proto přístroje s dvojitým úhlem měření umožňují stanovit podíl částic různé velikosti v měřené kapalině a vypovídají lépe o kvalitě a efektivitě filtrace, popřípadě pomohou předpovědět stabilitu a tím i trvanlivost nápoje. Pro pochopení tohoto principu ukazuje obrázek (Obr. 11) v polárních souřadnicích intenzitu vyzařování rozptýleného světla od částic různé velikosti [8].



Obr. 10. Dva způsoby měření zákalu [10].



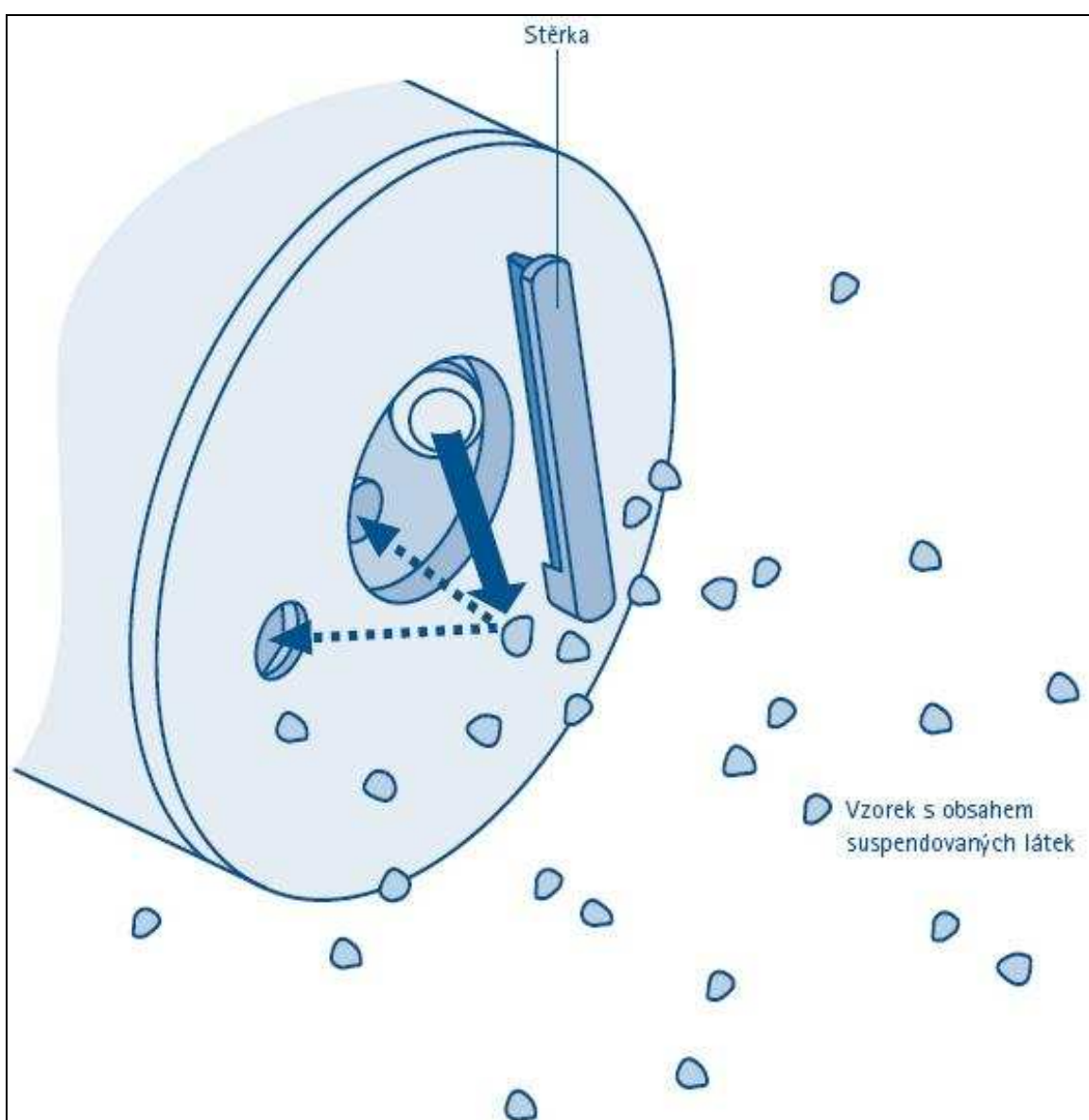
Obr. 11. Intenzita vyzařování rozptýleného světla v polárních souřadnicích [8].

Rozdíly mezi přístroji pro měření zákalu jsou dány i zdrojem světla. Pro měření podle standardních metod US EPA je požadována wolframová lampa (typ přístroje „T“). Normy ISO 7027/DIN 27027 předepisují měření při vlnové délce  $860 \text{ nm}$  (světelný zdroj IR lampa, přístroj typu „IR“). Výsledky získané těmito dvěma typy přístrojů nejsou srovnatelné [9]. Výsledky měření zákalu mohou být zaneseny také zanesením měřicí



kyvety, proto bývají moderní snímače vybaveny mechanickými stěrky, které umožňují automatické čištění okének měřících kyvet.

Turbidimetrie (popř. v kombinaci s nefelometrií) se uplatňuje u průtočných měřících systémů (potrubí). V mé diplomové práci se však použije ponorná sonda SOLITAX sc od firmy Hach Lange, která využívá nefelometrie. Tato sonda je kromě nezbytné stěrky na automatické čištění vybavena patentovaným systémem dvojitého měření odraženého světla (Obr. 12), který dokonale eliminuje interferenci barvy [6]. Další technické parametry této sondy jsou uvedeny v tabulce (Tab. 4).



Obr. 12. Detail ponorné zákalové sondy SOLITAX sc od firmy Hach Lange [6].

Tab. 4. Technické parametry použité ponorné zákalové sondy firmy Hach Lange [6].

Model	SOLITAX sc t-line
Parametr	Zákal
Rozsah měření zákalu	0,001-4000 FNU
Rozměry (P x D)	60mm x 200mm
Kryt	Plast
Čištění	Se stěrkou
Typ	Ponorná sonda

## 2.4 Sonda pro měření pH

Hodnota pH udává míru kyselosti/zásaditosti měřeného roztoku. Je definována jako záporný dekadický logaritmus aktivity vodíkových iontů v roztoku (pro zředěné roztoky: koncentrace vodíkových iontů resp.  $H_3O^+$  v roztoku).

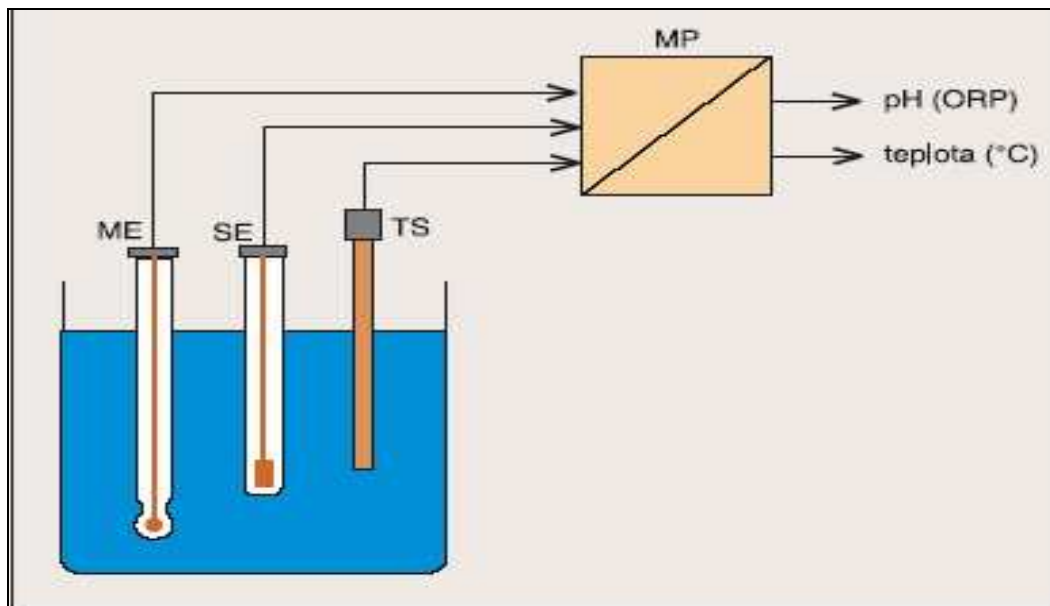
$$pH = -\log a_{H^+} \quad (5)$$

pH je bezrozměrná veličina nabývající hodnot od 0 do 14. Hodnota  $pH = 7$  odpovídá neutrálnímu roztoku,  $pH < 7$  kyselému roztoku a  $pH > 7$  zásaditému (bazickému) roztoku. Tato veličina má velký význam v průmyslu (produkty, technologické postupy, odpadní lázně,...), ochraně životního prostředí, čistírnách odpadních vod atd..

Hodnota pH se stanoví potenciometricky měřením napětí galvanického článku tvořeného měřeným roztokem, do kterého jsou ponořeny dvě elektrody – měřicí a srovnávací (Obr. 13) . Měřené napětí je přibližně v rozmezí  $-500$  mV až  $+500$  mV. Aktivní část měřicí elektrody je standardně vyrobena ze speciálního skla a její potenciál je úměrný hodnotě pH. V poslední době se používají i neskleněné elektrody, vyrobené např. technologií ISFET (Ion Sensitiv Field Efect Transistor), které mají rychlejší odezvu a hlavně nižší impedanci. Potenciál srovnávací elektrody je naproti tomu konstantní a nezávislý na hodnotě pH měřeného média [2]. Jako srovnávací elektroda se nejčastěji používá elektroda chloridostříbrná (Ag/AgCl), od dříve hojně používané elektrody kalomelové (Hg/Hg<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>) se dnes z ekologických důvodů ustupuje.

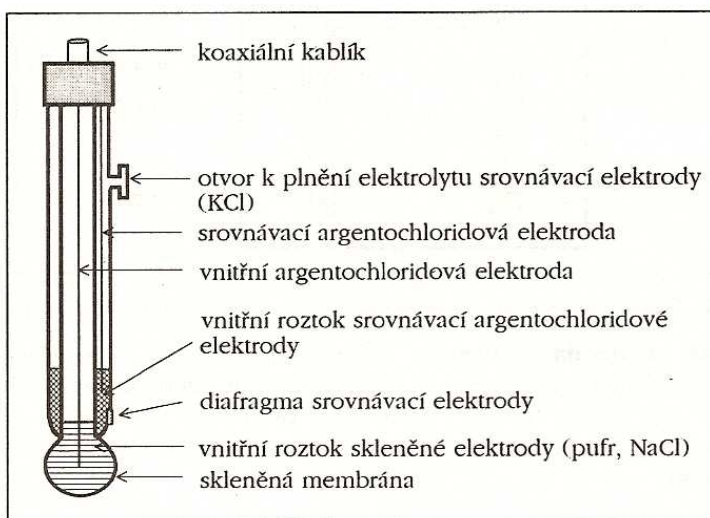
Pokud nejsou elektrody zatíženy proudem, je napětí mezi nimi podle Nernstova zákona lineární funkcí koncentrace vodíkových iontů, a tedy hodnoty pH. Strmost lineární charakteristiky je ovšem značně závislá na teplotě, a proto se musí měřený údaj pH v

měřicím převodníku vždy teplotně kompenzovat, a to buď ručně zadáním teploty měřeného roztoku nebo častěji automaticky podle vloženého algoritmu a aktuální teploty měřené teplotním čidlem vestavěným v měřicí sondě [2].



Obr. 13. Princip potenciometrického měření hodnoty pH a redoxního potenciálu. ME – měřicí elektroda, SE – srovnávací elektroda, TS – teplotní čidlo, MP – měřicí převodník s vyhodnocovací jednotkou [2].

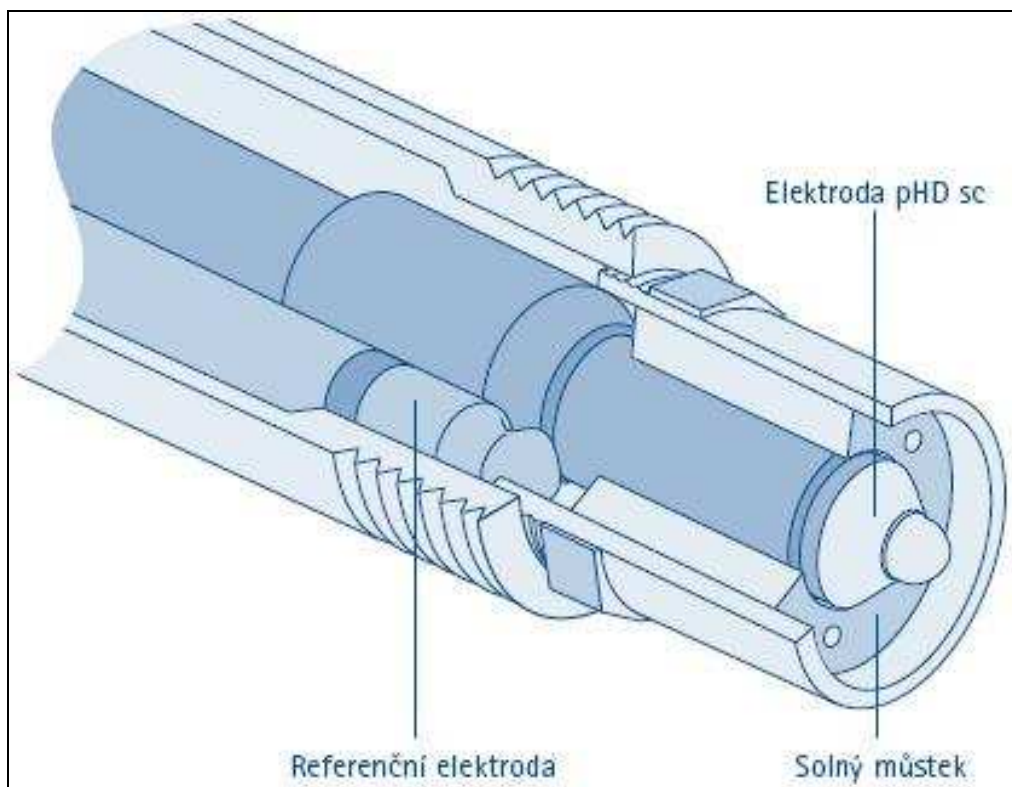
Moderním trendem je umístění obou elektrod do jedné – kombinované (Obr. 14) . Navíc jsou nové sondy vybaveny teplotním čidlem pro kompenzaci vlivu teploty při měření pH. Některé pH sondy jsou navíc kombinované s ORP elektrodou, protože obě mají jako srovnávací elektrodu chloridostříbrnou a u obou se měří potenciál (u pH se jen místo mV zobrazují hodnoty v pH stupnici).



Obr. 14. Schéma kombinované skleněné elektrody [4].

Dominantním typem dnes používaných pH sond je skleněná elektroda kombinovaná se srovnávací chloridostříbrnou elektrodou. V přítomnosti fluoridových iontů by byla skleněná elektroda naleptávána, proto se místo ní použije elektroda antimonová. Další nevýhodou skleněných elektrod byla jejich malá mechanická odolnost. Tento nedostatek je dnes kompenzován vhodnou konstrukcí sondy („nožky“ na konci sondy chránící citlivou skleněnou membránu) nebo odolnějšími typy použitého skla.

Další alternativou jsou gelové elektrody. Gel zajišťuje nulový potenciál bez driftu pro mnohem delší časové období. Mechanická pevnost gelu dovoluje použití můstku s mnohem větší pórovitostí než u jiných typů elektrod. Dále je eliminován paměťový efekt, získána velice rychlá odezva, dlouhá životnost elektrody a velká stabilita měření. Tyto elektrody není nutné tak často kalibrovat. To jsou hlavní výhody gelů oproti obyčejným srovnávacím elektrodám ponořeným do roztoku KCl. Nová elektroda pH D sc od firmy Hach Lange (bude použita v této diplomové práci) nechrání referenční elektrodu membránou, ale solným můstkem (Obr. 15), což zvyšuje její životnost a značně snižuje požadavky na údržbu.



Obr. 15. Detail měřící části elektrody pH D sc od firmy Hach Lange [6].

Kromě gelu a roztoku může referenční elektrolyt tvořit i polymer vhodný pro vpichové pH sondy v potravinářství. Posledním významným prvkem, kterým se od sebe pH sondy liší je

tvar membrány. Membrány mohou být cylindrické, ploché (pro kontaktní povrchová měření), kónické, nebo tvaru kopí (vpichové sondy).

## 2.5 Sonda pro měření ORP

Oxidačně-redukční potenciál (ORP), zkráceně redoxní potenciál, umožňuje kvantifikovat oxidační a redukční sílu vodného roztoku. Oxidací a redukcí rozumíme jevy, pro které je charakteristická vzájemná výměna elektrických nábojů mezi oxidujícími a redukujícími látkami. Při tomto fyzikálně chemickém pochodu probíhá rovnovážná reakce, při níž redukující látka odevzdává elektrony a sama se oxiduje, zatímco oxidující látka elektrony přijímá a sama se redukuje. Ponoříme-li do takového roztoku elektrodu z indiferentního kovu, vytvoří se na ní redoxní potenciál, jehož velikost závisí na poměru koncentrací oxidujících a redukujících látek v roztoku [2].

Hodnota ORP má orientační význam v čistírnách odpadních vod a ve fermentorech. Tato veličina totiž charakterizuje prostředí v němž probíhají biologické procesy. Kladné hodnoty znamenají aerobní (oxické) prostředí, záporné anaerobní prostředí. Hodnoty přibližně  $-50\text{mV}$  až  $+50\text{mV}$  odpovídají prostředí anoxickému, kdy úlohu akceptoru elektronu v enzymatických systémech mikroorganismů zastupují dusičnany a dusitany (denitrifikační stupeň v čistírnách odpadních vod) popř. jiné látky s kyslíkem v molekule (síraný atd.). V analýze pitných vod má ORP význam jen při kontrole chlorace (chlor je oxidační činidlo) vody u umělých koupališť.

Redoxní potenciál se stanoví opět měřením napětí galvanického článku tvořeného měřeným roztokem, do kterého jsou ponořeny dvě elektrody – měřicí a srovnávací (Obr. 13). Na rozdíl od měření pH je měřicí elektroda v tomto případě z ušlechtilého kovu (platiny, zlata či stříbra), ale srovnávací elektroda může být stejná, tedy např. chloridostříbrná. Měřené napětí je v rozmezí asi  $-1\ 500\ \text{mV}$  až  $+1\ 500\ \text{mV}$ . Kladná hodnota napětí ukazuje, že roztok působí oxidačně, záporná hodnota znamená, že roztok působí redukčně. Velikost redoxního potenciálu závisí na teplotě, ale při jeho měření se obvykle teplotní kompenzace neprovádí, protože každé médium má jinou teplotní závislost. Jestliže se musí hodnoty redoxního potenciálu porovnávat, musí se vždy měřit při stejné hodnotě pH, při stejné teplotě a se stejným typem srovnávací elektrody [2].

Ve výsledcích by se měl udávat *oxidačně-redukční potenciál proti standardní vodíkové elektrodě* ( $ORP_H$ ). Je to ORP měřený nebo vypočtený proti standardní vodíkové elektrodě

a má přesný fyzikálně-chemický význam [7]. Často se však udávají hodnoty ORP měřené proti referentní elektrodě ( $ORP_M$ ). Referentní elektrodou může být elektroda chloridostříbrná (ta může být ponořena do referentních elektrolytů různých koncentrací) nebo elektroda kalomelová (obecně tedy elektrody II. druhu), proto se musí udat její druh a koncentrace jejího elektrolytu.  $ORP_M$  tedy nemá přesný fyzikálně-chemický význam.

Tab. 5. Technické parametry sond pH sc a 1200 sc firmy Hach Lange [6].

Model	pHD sc	1200 sc
Rozsah měření	0-14 pH	-1500 ÷ +1500 mV
Citlivost	±0,01 pH	±0,5 mV
Provozní teplota	-5 ÷ +70 °C	-5 ÷ +70 °C
Přenos signálu	Digitální	Digitální

## 2.6 Vyhodnocovací jednotka měřených parametrů

Vyhodnocovací jednotkou měřených parametrů je v úloze DE5 převodník sc 1000 od firmy Hach Lange (příloha P IV). Tento převodník má modulární architekturu, díky které se dá upravit pro konkrétní potřebu. Může sloužit k prostému sběru dat až od osmi sond, nebo přes síť předávat (přijímat) získaná data dalším převodníkům popřípadě přímo do velína. Díky snadno odpojitelnému a přenosnému displejovému modulu (5,5“ barevný dotykový LCD) lze získaná data číst přímo na místě, nebo je pomocí volitelného GSM modulu bezdrátově poslat do řídicího střediska [6]. Vstupní/výstupní moduly umožňují zvolit si analogové/digitální vstupy/výstupy. V úloze DE5 je použit analogový výstupní modul pro Iout v rozsahu 0-20 mA, který je nutný pro použitou sběrnici DATALABu. Převodník sc 1000 poskytuje řídicí a matematické funkce (časovač, PID, logaritmické funkce,...) pro regulaci sledovaných procesů (řízení dávkování činidel, průtoků, topení/chlazení,...). V úloze DE5 však plní pouze funkci sběru a předávání dat od sond Hach Lange sc, s kterými komunikuje digitálně. Data z připojených sond jsou zobrazována na displejovém modulu v režimech – 1 veličina – 2 veličiny – 4 veličiny – seznam všech měřených veličin. Veškerá získaná data (nejen od sond Hach Lange) zpracovává IPC, který provádí vlastní regulaci na požadované hodnoty a posílá naměřená data přes LAN na server projektu LABI. Na serveru se data archivují a pokud to není zakázané tak jsou dostupná z internetu.

### 3 FERMENTOR V PROJEKTU LABI A CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

#### 3.1 Postavení úlohy DE5 (fermentor) v projektu LABI

Úloha DE5 – *Biochemické procesy* má v projektu LABI zvláštní postavení. Oproti ostatním úlohám má totiž několik důležitých odlišností. Doba trvání experimentu úlohy DE5 je plně řízena její obsluhou a může dosáhnout délky i několika týdnů. Naproti tomu je délka experimentů ostatních úloh relativně pevně daná a dosahuje maximálně několika desítek minut. Ostatní úlohy projektu LABI mají jen dva režimy obsluhy. Pro fermentor (úloha DE5) jsou vytvořeny tři režimy obsluhy:

- 1.) režim (uživatel) Obsluha\_DE5 – má neomezené administrátorské pravomoci; může povolit/omezit přístup uživateli Student; může určit, který experiment bude veřejně přístupný a který ne
- 2.) režim (uživatel) Student – může ovládat fermentor lokálně i přes www rozhraní jako Obsluha\_DE5, pokud mu Obsluha\_DE5 nezamezí přístup (změnou jeho přístupového hesla)
- 3.) režim (uživatel) Klient – jakýkoliv návštěvník webové stránky projektu LABI ([www.labi.fai.utb.cz](http://www.labi.fai.utb.cz)), který si může stahovat data z veřejně přístupných experimentů a sledovat probíhající experimenty (pokud jsou veřejné); tento uživatel z bezpečnostních důvodů nemůže ovládat fermentor

Tyto tři režimy umožňují provádět ve fermentoru různé (i neveřejné) výzkumné projekty, zároveň je však fermentor plně využitelný pro možnosti výuky.

Provoz laboratorního zařízení DE5 je ve třech cyklech (příprava-provoz-ukončení). V cyklu příprava obsluha zadá název experimentu, naplní fermentor vhodnou suspenzí a nastaví parametry regulace. V cyklu provoz probíhá vlastní experiment, obsluha má možnost kdykoliv podle potřeby změnit některé parametry regulace (změna se zaznamená do archívu dat). V posledním cyklu provede obsluha ukončení experimentu, vyprázdnění fermentoru a jeho přípravu na další experiment.

Úloha DE5 se oproti ostatním úlohám projektu LABI liší ještě svým rozsahem a komplexností. Zároveň musí být regulováno několik veličin (obsah O<sub>2</sub>, pH, teplota,...), jejichž regulace může být komplikovaná. Například obsah O<sub>2</sub> se měří sondou LDO, reguluje vstupním a výstupním ventilem aerace (ta se navíc může řízeně vypínat/zapínat). Obsah O<sub>2</sub> je ovlivněn tlakem (ten je zpětně ovlivňován ventily aerace), mícháním,

aktivitou mikroorganismů, teplotou (další regulovaná veličina ovlivněná vnějšími vlivy a činností mikroorganismů).

### **3.2 Cíle diplomové práce**

Cílem diplomové práce je zprovoznění a ověření fermentoru spolu s možným otestováním dálkového měření a ovládání. Laboratorní fermentor LF20 nebyl dlouhou dobu využíván. Po jeho zařazení do projektu LABI musel být fermentor modernizován, aby vyhověl požadavkům moderní koncepce projektu. Stará řídicí skříň SLF20 byla nahrazena novou se systémem DATALAB a IPC, která umožňuje dálkové měření a regulaci napojením na LAN. Byly zakoupeny nové sondy pro měření důležitých parametrů biochemických procesů. Tyto sondy musí být nakalibrovány a instalovány na fermentor. Celek se pak musí zprovoznit a otestovat pomocí vhodného demonstračního procesu (kapitola 1.4). Kromě vlastního sestavení fermentoru je také nutné vytvořit uživatelské rozhraní pro ovládání fermentoru přes LAN a Internet. Ověřování (doladování) uživatelského rozhraní proběhne během testování modernizovaného fermentoru.



## **PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 PŘÍPRAVA A SESTAVOVÁNÍ FERMENTORU

### 4.1 Použité chemikálie

Při laboratorních pokusech byly použity chemikálie od firmy Lachema a.s. Česká republika, pokud není uvedeno jinak.

#### 4.1.1 Roztoky použité pro kalibraci sond

pH puřry DURACAL™ od firmy Hamilton  $pH = 4,01 \pm 0,01$ ;  $pH = 7,00 \pm 0,01$

Roztok standardu ORP o objemu 1 l má složení:

5,28 g	$K_4Fe(CN)_6 \cdot 3H_2O$
4,11 g	$K_3Fe(CN)_6$
1,8 g	$KH_2PO_4$
3,9 g	$Na_2HPO_4 \cdot 2H_2O$

Tab. 6. Oxidačně-redukční potenciál roztoku standardu proti chloridostříbrné elektrodě s různou koncentrací roztoku KCl (ORP) a potenciál proti standardní vodíkové elektrodě ( $ORP_H$ ) a hodnoty pH při různých teplotách [7].

T [°C]	$ORP_H$ [mV]	ORP $c(KCl)=1\text{mol.l}^{-1}$ [mV]	ORP $c(KCl)=3\text{mol.l}^{-1}$ [mV]	ORP Nasycený roztok KCl [mV]	pH [1]
10	462	218	245	251	7,08
15	450	208	236	243	7,04
20	439	199	228	236	7,02
25	427	191	220	230	7,00
30	415	182	212	224	6,98
35	403	174	204	217	6,96
40	391	164	195	210	6,95
45	379	155	187	203	6,95
50	366	146	178	196	6,95

Roztok standardu KCl o známé vodivosti:

$$c(KCl) = 0,7456 \text{ g.l}^{-1} = 0,01 \text{ mol.l}^{-1} \rightarrow \kappa_{20} = 1278 \text{ } \mu\text{S.cm}^{-1}$$

„Nulový roztok“ neobsahující rozpuštěný kyslík: 3% roztok NaSO<sub>3</sub>.

#### 4.1.2 Roztoky potřebné pro přípravu 1 l biomédia

Tab. 7. Složení 1 l biomédia.

V složky [ml]	Složka (roztok)	Koncentrace použitého roztoku [g.l <sup>-1</sup> ]
1	MgSO <sub>4</sub> . 7H <sub>2</sub> O	22,5
1	CaCl <sub>2</sub>	27,5
1	FeCl <sub>3</sub> . 6H <sub>2</sub> O	0,25
5	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	10 *
20	fosforečnanový pufr	**
1	„stopové prvky“	***

\* obsah N = 2,1 mg.ml<sup>-1</sup>

\*\* 1 l fosforečnanového pufru (koncentrace P = 9,7 mg.ml<sup>-1</sup>) obsahuje:

8,5 g            KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>  
 21,75 g        K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>  
 44,7 g        NaHPO<sub>4</sub> . 12H<sub>2</sub>O

\*\*\* 1 l roztoku stopových prvků obsahuje:

0,75 g        H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>  
 3 g            FeSO<sub>4</sub> . 7H<sub>2</sub>O  
 0,1 g        ZnSO<sub>4</sub> . 7H<sub>2</sub>O  
 0,5 g        MnSO<sub>4</sub> . 4H<sub>2</sub>O  
 0,05 g       CuSO<sub>4</sub> . 5H<sub>2</sub>O  
 0,1813 g     CoSO<sub>4</sub> . 7H<sub>2</sub>O  
 0,05 g       (NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub> . 4H<sub>2</sub>O

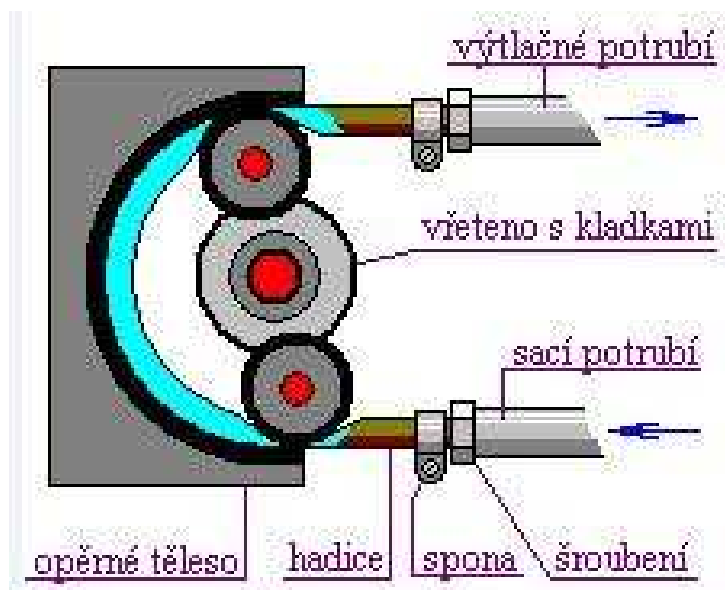
#### 4.2 Použité přístroje

1. přístroj pro měření pH/ORP: SERIES-ionoLab pH/ION 735, WTW, SRN
2. sonda pro měření ORP: Blue Line 31Rx, SCHOTT instruments GmGH, SRN
3. oximetr: MICROPROCESSOR OXIMETER Oxi 539, WTW, SRN
4. kyslíková elektroda: TRIOxMATIC<sup>®</sup> 300, WTW, SRN
5. digitální multimetr (voltmetr): Metex M-4640A, METEX, S. Korea

### 4.3 Testování peristaltických čerpadel a kalibrace čidel

#### 4.3.1 Testování peristaltických čerpadel

Pro fermentor jsou využita peristaltická čerpadla DOMET S-31 (5 W; 50 Hz; 220 V; Domet, Poland) s nastavitelnou šířkou použité hadice (ovlivňuje objem čerpané kapaliny). Princip funkce peristaltického čerpadla je uveden na obrázku (Obr. 16).



Obr. 16. Princip činnosti peristaltického čerpadla [11].

Uvádím krátký návod pro snadnější obsluhu daného peristaltického čerpadla:

Kruh označený „pull-out turn“ (Obr. 17) slouží pro nastavení průměru hadičky (min.  $\phi$  1 mm, max.  $\phi$  4 mm). Abychom mohli nastavit průměr, musíme středním kruhem pootočit proti směru hodinových ručiček. Provedeme nastavení průměru hadičky a zajistíme ho otočením středního kruhu ve směru hodinových ručiček.

„Vytahovatelným kolíkem“ se nastavuje rozsah rychlosti otáček. Má tři polohy:

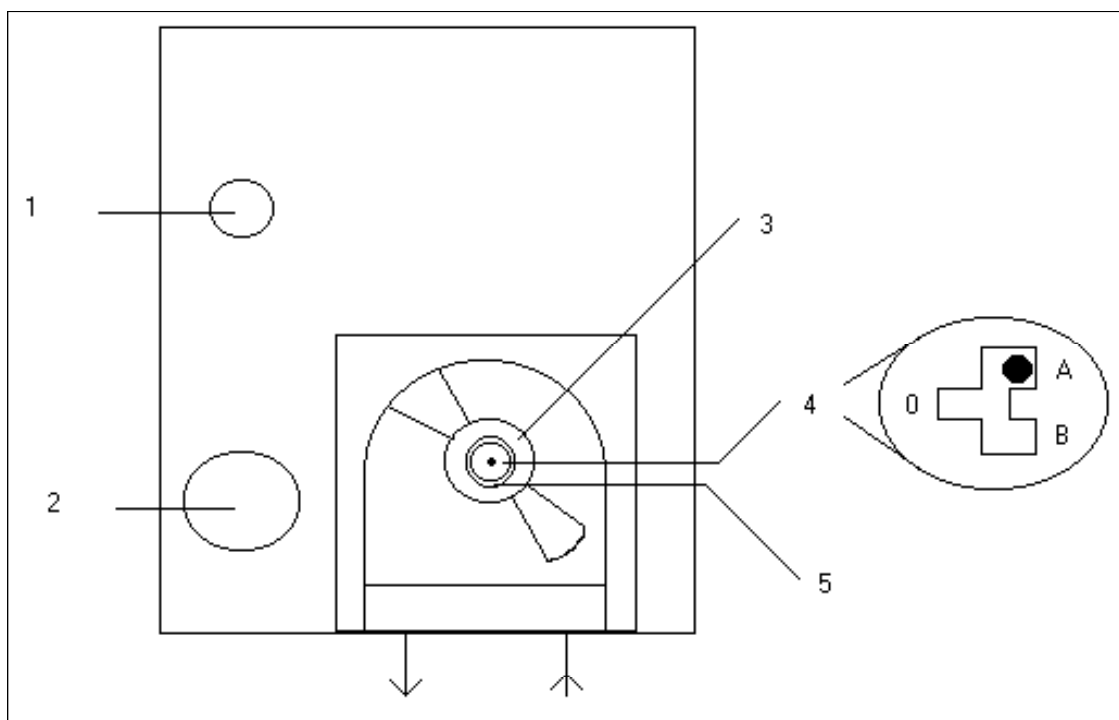
Zaražený kolík (šroubek v poloze A) znamená pomalé otáčky (stupnice regulátoru otáček x1).

Střední poloha (šroubek v poloze 0) je „neutrál“ – kruhovou částí čerpadla lze volně otáčet (použít při zavádění hadičky!).

Vytažený kolík (šroubek v poloze B) znamená rychlé otáčky (stupnice regulátoru x10).

Veškeré nastavování peristaltického čerpadla je mechanické, proto se vždy před uvedením do provozu nastaví optimální hodnoty pro danou hadičku. Vlastní regulace chodu čerpadla

pak spočívá v zapínání a vypínání příslušné zásuvky na hlavní skříni fermentoru pomocí relé.



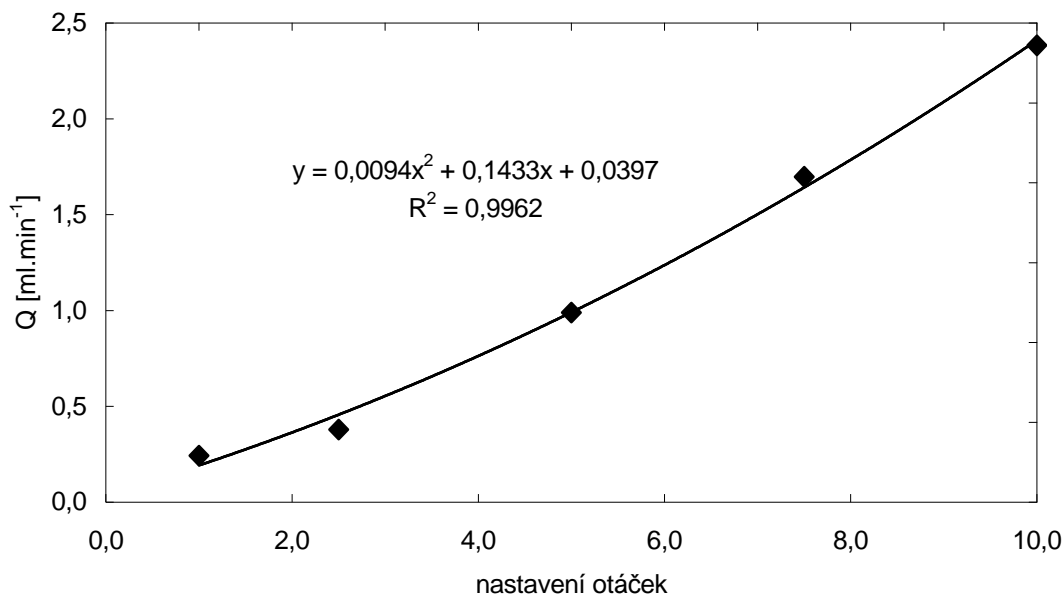
Obr. 17. Nákres peristaltického čerpadla. 1 - vypínač; 2 - regulace otáček čerpadla; 3 - kruh označený „pull-out turn“; 4 - „vytahovatelný kolík“ (3 polohy viz. detail); 5 - střední kruh (nahore černý).

Z několika testovaných hadiček jsem vybral průhlednou silikonovou, díky její mechanické odolnosti. Peristaltické čerpadlo bylo nastaveno na  $\phi$  hadičky 2 mm.

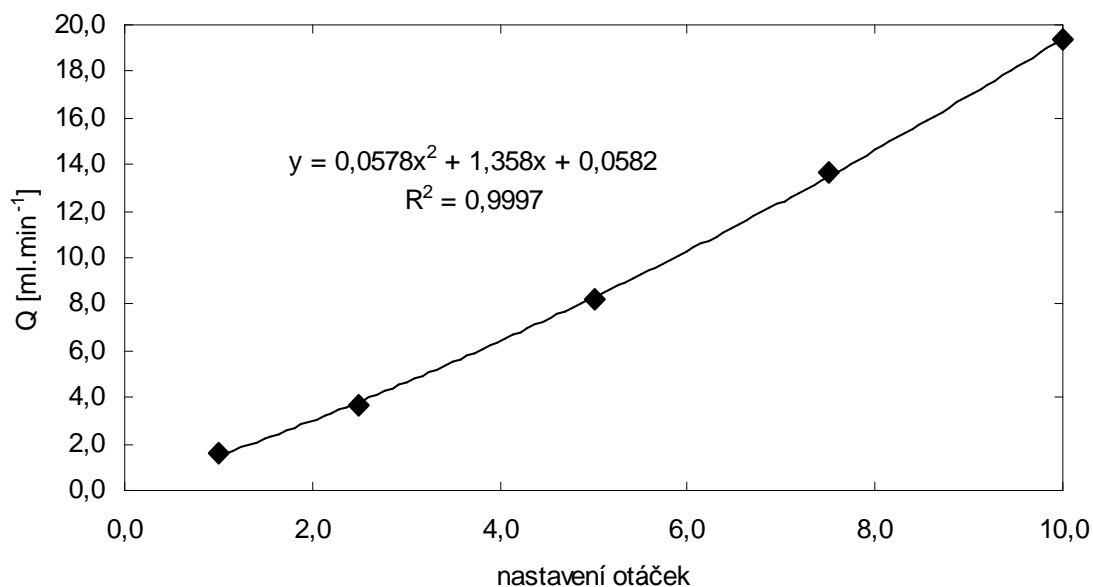
Tab. 8. Charakteristika peristaltického čerpadla při použití silikonové hadičky

rozsah	nastavení otáček	V	$\tau$			$\phi \tau$	Q
		[ml]	[s]			[s]	[ml.min <sup>-1</sup> ]
A	10,0	2,0	50	51	50	50,3	2,384
	7,5	2,0	69	72	71	70,7	1,698
	5,0	2,0	124	119	121	121,3	0,989
	2,5	1,0	165	150	160	158,3	0,379
	1,0	0,5	127	124	120	123,7	0,243
B	10,0	10,0	30	32	31	31,0	19,355
	7,5	5,0	23	20	23	22,0	13,636
	5,0	5,0	37	36	36	36,3	8,257
	2,5	5,0	83	80	82	81,7	3,673
	1,0	2,0	78	80	71	76,3	1,572

kde  $V$  protečený objem;  $\tau$  doba průtoku měřeného množství kapaliny;  $Q$  průtok kapaliny. Pozor, při nastavení otáček  $>7$  u rozsahu B se v některých polohách čerpadlo nerozjelo, což by při automatické regulaci způsobilo komplikace!!!



Obr. 18. Charakteristika peristaltického čerpadla při použití silikonové hadičky a převodovém stupni (rozsahu) A.



Obr. 19. Charakteristika peristaltického čerpadla při použití silikonové hadičky a převodovém stupni (rozsahu) B.

#### 4.3.2 Kalibrace sondy pH<sub>Dsc</sub> pro měření pH

Dne 2.12.2005 byla provedena dvoubodová kalibrace na pufrů pH = 4 a pH = 7. Na aktuální teplotu (24°C) byly hodnoty korigovány pomocí tabulky přiložené k pufrům.

#### 4.3.3 Kalibrace sondy pH<sub>D sc</sub> pro měření ORP

Tato jednobodová kalibrace byla provedena 6.12.2005 pomocí roztoku standardu ORP. Roztok byl proměřen také sondou SCHOTT, jejíž srovnávací chloridostříbrná elektroda je sycena 3M KCl. Protože se naměřené hodnoty u obou sond příliš nelišily, dá se usuzovat, že kalibrovaná sonda má stejnou srovnávací elektrodu. V tabulce (Tab. 6) byla nalezena správná hodnota ORP použitého roztoku odpovídající změřené teplotě (23°C) a použité srovnávací elektrodě. Sonda pH<sub>D sc</sub> tedy byla v daném roztoku nakalibrována na hodnotu ORP = 223,2 mV při 23°C (lineární interpolací).

#### 4.3.4 Kalibrace indukčního vodivostního senzoru 3700 sc

Byla provedena 6.12.2005 pomocí 0,01M roztoku standardu KCl. Tento roztok má při aktuální teplotě kalibrace (23,4°C) měrnou vodivost  $\kappa_{23,4^{\circ}\text{C}} = 1377,15 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , na kterou byla sonda nakalibrována.

#### 4.3.5 Kalibrace zákalové sondy SOLITAX sc

Kalibrace zatím nebyla provedena, protože nebyl k dispozici vhodný roztok o standardním známém zákalu.

#### 4.3.6 Kalibrace sondy pro měření rozpuštěného kyslíku LDO

Tuto sondu není nutno (podle výrobce) kalibrovat, pokud to není zvlášť vyžadováno (např. podle normy daného stanovení). Byla provedena (7.12.2005) vzduchová kalibrace podle návodu k sondě. Tato kalibrace spočívá v nalití malého množství vody do dodaného sáčku, umístění sondy do tohoto sáčku a zvolení příslušné kalibrace. Kalibrace je pak provedena automaticky. Bylo pouze nutné zvolit jednotky koncentrace ( $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ) a zadat aktuální tlak ( $97,75 \text{ kPa} = 733,186 \text{ mm Hg}$ ).

Následující den (8.12.2005) bylo provedeno ověření LDO sondy pomocí klasické elektrody (TRIOxMATIC<sup>®</sup> 300). Proměřily se vzorky do laboratorních cvičení nejprve klasickou elektrodou (elektrochemická metoda) a poté LDO sondou, výsledky jsou uvedeny v tabulce (Tab. 9). Měření LDO sondou bylo provedeno až po delší době (cca 45

minut), protože se nejdříve ověřila na „nulový roztok“ neobsahující kyslík. V nulovém roztoku dávala sonda LDO po ustálení hodnotu 0,01 mg.l<sup>-1</sup>.

Tab. 9. Naměřené koncentrace rozpuštěného kyslíku při ověřování LDO.

vzorek	ředění	c O <sub>2</sub> [mg.l <sup>-1</sup> ]		T [°C]
		TRIOxMATIC <sup>®</sup> 300	LDO	
biomedium	-	7,90	8,23	23,5
Dřevnice	-	8,19	8,29	23,0
Dřevnice	2x	8,33	8,39	22,7
Dřevnice	10x	8,19	8,33	22,7
Kalová voda	10x	7,96	8,24	22,7
Kalová voda	20x	8,19	8,30	22,6
Kalová voda	50x	8,24	8,33	22,5

Hodnoty rozpuštěného kyslíku naměřené klasickou elektrodou a LDO se liší. Rozdíl se dá vysvětlit tím, že použitá elektrochemická sonda automaticky nekoriguje aktuální teplotu a tlak na rozdíl od LDO. Navíc klasická sonda změřila koncentraci rozpuštěného kyslíku a udala „stabilní hodnotu“, kdežto LDO sonda stále ukazovala aktuální koncentraci kyslíku, takže byla brána hodnota po určité době (2 minuty). Pro korektní srovnání těchto sond by muselo být provedeno synchronní měření (obě sondy by byly zároveň ponořeny vedle sebe do stejného roztoku) rozpuštěného kyslíku v uzavřené nádobě, která však vzhledem k rozměrům LDO sondy není k dispozici.

#### 4.3.7 Kalibrace kapacitního hladinoměru CLM – 36 od firmy Dinel<sup>®</sup> (ČR)

Kapacitní hladinoměr CLM – 36 byl okalibrován během vlastního sestavování fermentoru (16.2.2006). Postupovali jsme podle návodu přiloženého výrobcem [5]. Nejprve jsme v prázdné PET láhvi (jediná dostatečně vysoká nádoba jež byla k dispozici) nastavili hodnotu výstupního proudu ze snímače I<sub>out</sub> = 4 mA pro nulovou hladinu. Po naplnění PET láhve až po okraj (32,5 cm) jsme nastavili hodnotu I<sub>out</sub> = 20 mA pro maximální hladinu.

Po zasunutí do fermentoru ukazoval snímač nesmyslné hodnoty. To bylo způsobeno odlišnou geometrií nádoby fermentoru a také jeho kovovými součástmi. Nulová hodnota výstupního proudu byla nastavena na I<sub>out</sub> = 4 mA. Tyčová elektroda hladinoměru však byla ponořena jen do hloubky 17 cm (zcela naplnit a vyprázdnit fermentor bylo v této fázi sestavování obtížné), proto jsme museli vypočítat I<sub>out</sub> pro dané ponoření elektrody ze vztahu uvedeného v návodu:

$$I_{out} = 4 + (0,16 \times \text{výška hladiny v \%}) \text{ [mA]} \quad (6)$$



Po dosažení výšky hladiny (17 cm = 52,3 % maximální výšky hladiny) jsme získali hodnotu výstupního proudu  $I_{out} = 12,36$  mA na kterou byl snímač nastaven.

## 4.4 Sestavování fermentoru

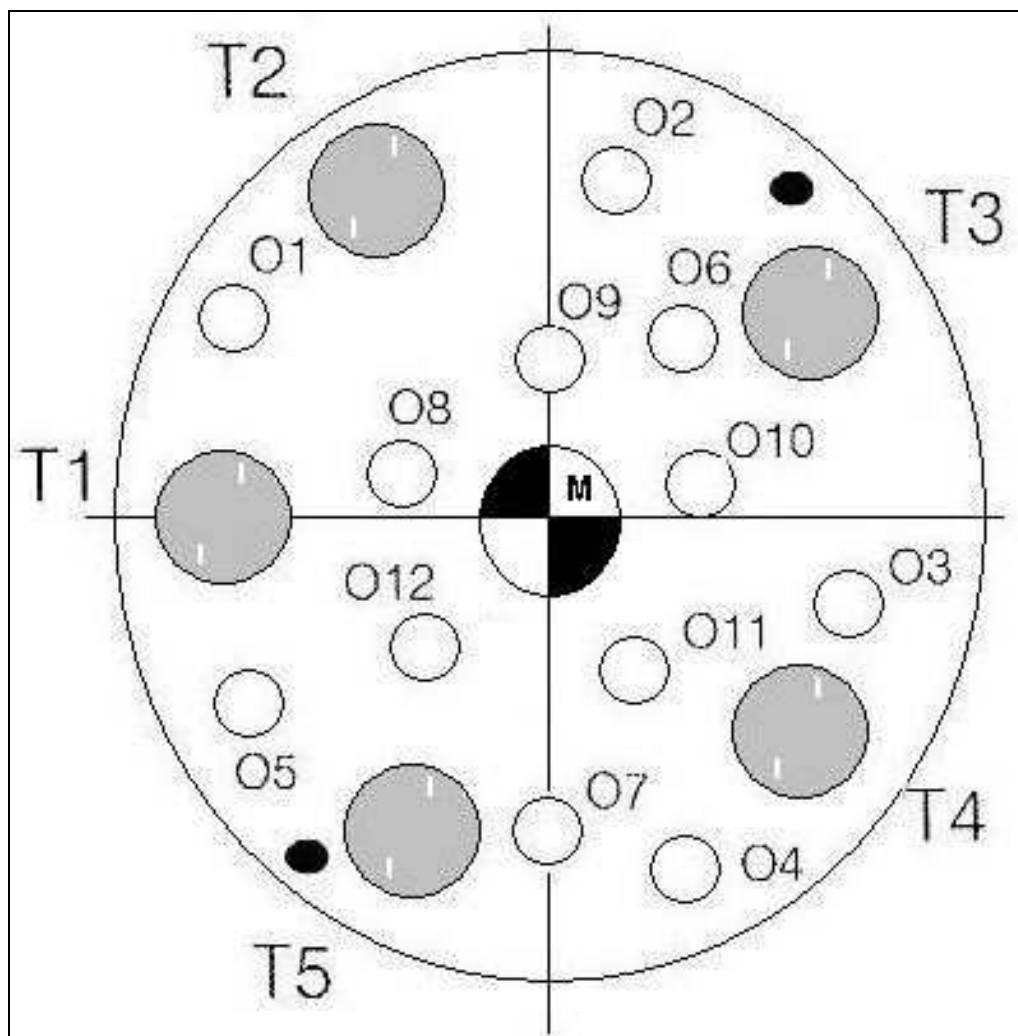
### 4.4.1 Výběr vhodných sond a jejich instalace

Laboratorní fermentor LF20 byl dlouhou dobu mimo provoz. Původní sondy byly nepoužitelné (kromě Pt100), proto byl systém sond úplně přestavěn a modernizován. Pro monitorování a řízení biochemických procesů probíhajících ve fermentoru bylo vybráno pět základních sond:

- sonda pro měření rozpuštěného kyslíku (O<sub>2</sub>)
- sonda pro měření oxidačně redoxního potenciálu (ORP)
- sonda pro měření pH (pH)
- sonda pro měření vodivosti (G)
- sonda pro měření turbidity (TRB)

Tyto sondy doplňuje snímač tlaku, teploty a hladiny. Všechny tyto sondy jsou umístěny na víku fermentoru, které kromě toho obsahuje otvory pro vstupy (aerace, dávkování peristaltickými čerpadly, vlastní plnění fermentoru, vstup chlazení) a výstupy (odběry kapalně a plynné fáze, vyprázdnění fermentoru, výstup chlazení). Náskres konečného řešení víka fermentoru je uveden na obrázku (Obr. 20) a skutečné provedení je na fotografii v příloze P III. Jako „T“ jsou označeny trubky tvořící vlastní konstrukci nádoby fermentoru. Jedna z nich ústí do fermentoru (využita k aeraci) a dvě jsou navzájem propojené (tvoří okruh chlazení fermentoru). Písmenem „O“ jsou označeny otvory pro umístění sond a odběry vzorků fází. Otvory O1 až O5 mají průměr 220 mm, O6 a O7 průměr 170 mm a otvory O8 až O12 mají průměr 110 mm.

Pro pět hlavních sond byly vyrobeny plastové nástavce (materiál ETACETAL C) umožňující plynotěsné uchycení sond na víko. Díky těmto nástavcům mají navíc sondy své měřicí části ve stejné výšce čímž je zajištěna regulérnost měření. Po instalaci sond na víko fermentoru byla ověřena plynotěsnost jejich uchycení. Kvůli netěsnostem byly závitové plastových nástavců utěsněny teflonovou páskou a po opětovném ověření těsnosti byla přidána ještě koudel. Díky tomu je nyní fermentor plynotěsný a použitelný i pro anaerobní procesy.



Obr. 20. Schéma horního víka fermentoru. M - míchání; T1 - vstup kyslíku/vzduchu pro aeraci; T2 - elektrické topné těleso; T3 - rezerva; T4 - vstup chladicího média; T5 - výstup chladicího média; O1 - snímač teploty; O2 - odběr plynné fáze přes ventil a průtokoměr; O3 - odběr kapalné fáze přes ventil; O4 - snímač výšky hladiny; O5 - snímač přetlaku; O6 - vstupy od peristaltických čerpadel; O7 - plnění fermentoru/septum/vyprázdnění fermentoru; O8 - sonda měření G; O9 - sonda měření ORP; O10 - sonda měření O<sub>2</sub>; O11 - sonda měření TRB; O12 - sonda měření pH.

Po sestavení byl fermentor osazen měřicí a automatizační technikou včetně ovládacích prvků (regulační ventily). Fotografie sestavy zařízení DE5 (bez skleněného pláště) je v příloze P III. Na obrázku jsou vidět hlavní elektrody s plastovými nástavci (měření pH, ORP, G, O<sub>2</sub>, TRB), modul sond HACH LANGE s dotykovým displejem, regulační ventily a průtokoměr. V odvrácené části je rozvaděč s další elektronikou a sestavou IPC.

#### 4.4.2 Ověření zapojení sond a fermentoru pomocí pitné vody

Pro ověření zapojení a správné funkce jednotlivých sond byl fermentor naplněn cca 7 litry pitné vody z vodovodu a několik dní jsem pak zaznamenával vybrané veličiny (Tab. 10). Nejprve jsem zaznamenával jen hodnoty z převodníku HACH LANGE sc1000, poté jsem pro porovnání zapisoval i hodnoty z obrazovky DATALABu.

Tab. 10. Hodnoty naměřené při ověřování fermentoru pitnou vodou.

Datum	8.2.2006	9.2.2006	14.2.2006		16.2.2006		20.2.2006	
Veličina	HACH	HACH	HACH	DATALAB	HACH	DATALAB	HACH	DATALAB
G [ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ]	320,0	324,0	319,0	317,0	326,0	324,0	324,8	326,0
pH [1]	7,05	7,02	7,06	6,90	7,05	6,90	7,19	7,10
TRB [FNU]	2,29	1,60	2,53	0,00	1,74	0,00	1,55	2,00
O <sub>2</sub> [mg/l]	3,76	3,02	6,45	5,30	6,15	5,10	7,02	5,80
ORP [mV]	167	150	172	169	165	173	161	205
T [°C]	---	---	23,3	23,4	21,6	29,3	20,1	99,2

Poznámky : Teplota u HACH (LANGE) je průměrem teplot, které ukázaly jednotlivé sondy.  
 Po promíchání se hodnoty HACH a DATALABu sblížily.  
 Hodnoty TRB, O<sub>2</sub> a ORP byly výrazně ovlivněny promícháním.  
 Vysoké hodnoty teploty u DATALABu byly způsobeny nesprávným připojením teploměru (čidlo Pt 100 nezávislé na sondách HACH LANGE).

Pro určení jaký vliv má na získané hodnoty promíchání fermentoru a jaký jeho zapojení, jsme při testování fermentoru s pitnou vodou změřili napětí na výstupu převodníku HACH LANGE (U<sub>out</sub>) a napětí na sběrnici DATALABu (Tab. 11). Rozdíly u hodnot TRB a ORP byly pravděpodobně způsobeny použitými rezistory ( $\pm 500 \Omega$ ). Tyto rezistory byly přidány proto, aby výstupní proud z HACH LANGE byl v rozmezí 0-20 mA. Rozdíly mezi hodnotami HACH LANGE a DATALABu se nyní kompenzují softwarově. Tabulka se zapojením signálů na sběrnici DATALABu je uvedena v příloze P I.

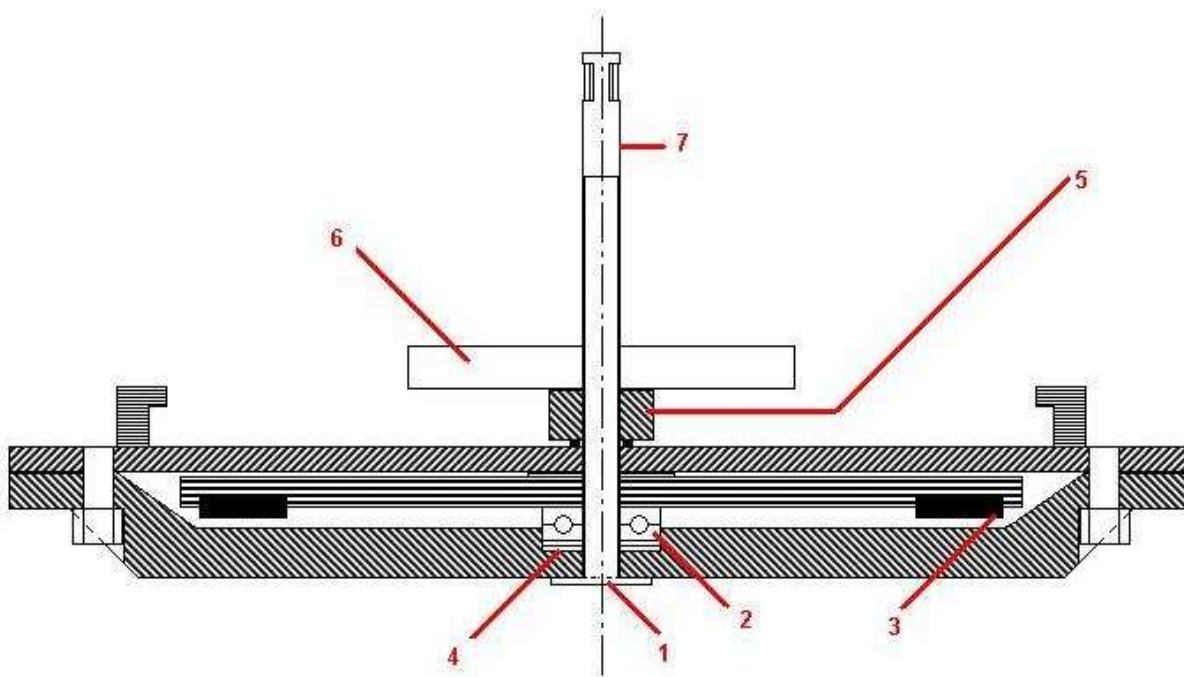
Tab. 11. Ověření zapojení fermentoru.

Veličina	HACH LANGE U <sub>out</sub>	DATALAB
G [ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ]	3,11 V	1,56 V
pH [1]	4,90 V	2,45 V
TRB [FNU]	1,40 mV	14,70 mV
O <sub>2</sub> [mg/l]	3,14 V	1,57 V
ORP [mV]	5,43 V	0,41 V

Poznámka : Hodnoty u DATALABu se musí násobit dvěma, protože je signál před vstupem na sběrnici dělen dvěma!

#### 4.4.3 Problémy s mícháním

Plynotěsnost nebyla jediným problémem při sestavování fermentoru. Při dotahování matic víka praskl skleněný plášť, takže se muselo čekat na náhradní. Při testování fermentoru s pitnou vodou z vodovodu se objevily problémy s mícháním. Míchání ve fermentoru LF20 je prováděno pomocí magnetické spojky (Obr. 21). S prázdným fermentorem bylo míchání bez problému. Jakmile se však fermentor naplnil vodou, začalo se míchadlo zadržávat až se zastavilo.



Obr. 21. Náčrtes magnetické spojky míchání fermentoru. 1 - hřídel; 2 - ložisko; 3 - magnety; 4 - podložky; 5 - těsnění; 6 - upravená vrtule míchadla; 7 - náboj.

Řešení tohoto problému zabralo dlouhou dobu. Nakonec pomohlo umístění podložek (viz. Obr. 21), které nadzvedly rotující magnety o 0,8 mm. V použitém fermentoru totiž udržovalo náboj a s ním spojené magnety v patřičné vzdálenosti od spodní stěny dolního víka jen těsnění. Pod tlakem vody náboj s magnety klesnul ke spodní stěně víka a začal o ni drhnout. Navíc se přes povolené těsnění v minulosti dostávala suspenze kalu do prostoru magnetů a svými částicemi přispívala k zadrhnutí míchadla.

Kvůli pěti hlavním sondám musela být odstraněna původní vrtule míchadla (nedostatek prostoru). Provizorní vrtule (umístěná co nejnižší) však byla až příliš účinná a obsah fermentoru doslova napěnila, proto musela být zastřižena.

Při testování fermentoru se suspenzí aktivovaného kalu se znovu objevily problémy s mícháním. Motor se příliš zatěžoval a přehříval nejen sebe, ale i nádobu fermentoru nad sebou (Tab. 12). Nakonec jsme museli míchání zespolu starým motorem úplně zavrhnout.

Bylo upraveno horní víko pro míchání z vrchu (příloha P X) a koupen nový krokový motor (MICROCON<sup>®</sup>, MODEL: SX34-2740). Ze spodního víka fermentoru byl odstraněn náboj s provizorní upravenou vrtulí, hřídel, těsnění, magnety i ložisko. Díra ve dně fermentoru byla utěsněna speciálně vyrobenou zátkou (příloha P X). Do této zátky se navíc z vrchu zasune nově vyrobená hřídel míchadla, která se tak zajistí proti případnému rozkmitání (nebezpečí poškození sond a skleněného pláště). Na novou hřídel míchadla je nasazena stará (původní) vrtule míchadla (v novém uspořádání je níže než sondy, takže s nimi nepřichází do přímého kontaktu).

Nový způsob míchání má několik výhod. Krokový motor umožňuje jednoduché řízení a snímání otáček míchadla. Díky umístění na horním víku je k motoru míchání snadný přístup  $\Rightarrow$  snadná a rychlá oprava v případě poruchy. Je možné použít původní vrtuli míchadla, která je pro míchání ve fermentoru LF20 optimální. Bohužel změna způsobu míchání prodražila modernizaci fermentoru (nákup nového motoru, výroba hřídele a zátky) a způsobila časové ztráty. Další nepříjemností je zrušení mechanického odpěňování. To by se mohlo obnovit speciální vrtulkou na hřídeli míchadla, ale této úprava bude již součástí budoucího vylepšování fermentoru.

#### 4.4.4 Práce na softwarovém vybavení

Během testování fermentoru s aktivovaným kalem se řešilo i softwarové vybavení bioreaktoru. Nejprve byla nastavena kompenzace odchylek mezi modulem sond HACH LANGE a DATALABem. Poté byl fermentor připojen na internet. Bylo tvořeno uživatelské prostředí založené na systému Control Web společnosti Moravské přístroje a.s.. Díky tomuto systému se dá fermentor snadno ovládat lokálně i dálkově přes www rozhraní (viz. přílohy P V – IX).

Při komunikaci s tvůrci softwaru bohužel docházelo k nedorozuměním a různým komplikacím, které výrazně zpomalily veškeré práce na fermentoru. Nedostatky (označení rozpuštěného kyslíku jako redox, chybné jednotky, problémy s archivací dat, nepřesná softwarová kompenzace, ...) se postupně podařilo vyřešit.

## 5 VÝSLEDKY DEMONSTRAČNÍHO POKUSU A JEJICH DISKUSE

Prázdný fermentor jsme naplnili 7 l biomédia a 1,6 l aktivovaného kalu o sušině 7,2 g.l<sup>-1</sup>. Počáteční sušina použitého kalu tedy byla 1,3 g.l<sup>-1</sup>. Suspenze byla po celou dobu (23.3.-1.5.2006) aerována pomocí akvaristického motorku (vyjma krátké doby poruchy). Zpočátku jsme směs ve fermentoru i míchali, bohužel se motor začal přehřívat. Omezili jsme se tedy na promíchání jednou za den dva. Motor nakonec úplně zkolaboval a musel se řešit přechod na míchání přes horní víko pomocí nově zakoupeného krokového motoru.

Tab. 12. Hodnoty naměřené během prvního experimentu s aktivovaným kalem.

průběžný čas	teplota	otáčky	G	pH	ORP	O2	TRB	přetlak	hladina	průtok
[h]	[°C]	[ot.min <sup>-1</sup> ]	[μS/cm]	[1]	[mV]	[mg.l <sup>-1</sup> ]	[FNU]	[kPa]	[cm]	[l.h <sup>-1</sup> ]
0,00	27,7	10	957,5	7,35	161,2	8,57	607,47	14,0	8,0	1,79
0,86	29,1	18	956,7	7,24	165,0	0,44	321,19	16,0	8,0	1,85
2,08	29,3	18	957,2	7,16	167,5	0,27	472,23	15,0	9,0	1,89
4,83	27,9	18	956,5	7,09	151,1	0,26	293,03	16,0	8,0	1,87
15,41	25,8	11	957,5	7,19	223,4	8,86	604,36	15,0	8,0	1,84
17,91	30,3	11	957,5	7,13	142,3	8,55	571,65	15,0	18,0	1,88
24,91	35,0	11	956,9	7,10	139,2	8,16	569,47	14,0	6,0	2,12
26,75	35,3	10	956,5	7,10	138,6	8,15	562,86	16,0	7,0	2,19
29,30	35,6	11	955,8	7,09	138,6	8,15	556,78	13,0	38,0	2,31
31,55	36,0	10	955,4	7,08	137,3	8,05	514,36	13,0	33,0	2,36
39,50	36,0	10	955,4	7,08	137,3	8,05	514,36	13,0	33,0	2,36
39,88	36,0	10	955,4	7,08	137,3	8,05	514,36	13,0	33,0	2,36
42,98	24,9	13	956,0	7,18	127,3	9,16	206,54	11,0	46,0	6,00
45,50	24,5	10	955,7	7,19	119,7	9,38	87,79	12,0	52,0	6,00
46,68	24,2	9	955,7	7,20	119,1	9,41	66,27	12,0	51,0	6,00
47,40	24,1	11	955,6	7,20	118,5	9,36	69,56	11,0	53,0	6,00
49,00	23,8	10	955,5	7,20	117,2	9,46	31,39	12,0	50,0	6,00
50,00	23,6	10	955,5	7,21	116,6	9,45	25,91	13,0	48,0	6,00
50,83	23,4	8	955,5	7,21	116,0	9,32	21,75	13,0	53,0	6,00
51,96	23,3	10	955,4	7,21	114,1	9,45	16,31	12,0	51,0	6,00
52,95	23,2	10	955,5	7,21	113,4	9,37	14,21	11,0	53,0	6,00
55,50	23,1	10	955,5	7,20	110,9	9,51	10,14	13,0	51,0	6,00
64,16	23,1	11	955,5	7,19	105,9	9,31	5,21	14,0	53,0	6,00
65,50	23,1	11	955,4	7,19	105,9	9,19	4,64	13,0	54,0	6,00
66,75	23,2	11	955,4	7,19	104,6	9,17	4,16	14,0	53,0	6,00
68,33	23,3	11	955,4	7,18	105,3	9,10	3,62	12,0	51,0	6,00
70,03	23,3	10	955,4	7,18	104,6	9,06	3,08	11,0	53,0	6,00
73,51	23,0	9	955,4	7,17	102,1	9,02	2,24	13,0	51,0	6,00
75,06	22,9	12	955,4	7,17	100,9	9,03	2,15	12,0	52,0	6,00
76,68	22,7	11	955,4	7,17	100,9	9,07	2,03	12,0	52,0	6,00
78,60	22,6	10	955,4	7,17	99,0	9,06	1,71	14,0	53,0	6,00
88,30	22,4	11	956,6	7,13	186,3	8,40	357,10	12,0	15,0	1,95
89,08	22,3	11	956,1	7,11	136,7	7,72	263,81	12,0	17,0	2,07
90,25	22,2	12	956,0	7,10	117,2	6,47	195,92	13,0	16,0	2,03
96,40	23,0	18	955,7	7,08	98,4	0,24	123,87	12,0	14,0	2,08
97,43	23,1	17	955,5	7,08	98,4	0,20	57,33	14,0	12,0	2,07

průběžný čas	teplota	otáčky	G	pH	ORP	O2	TRB	přetlak	hladina	průtok
[h]	[°C]	[ot.min <sup>-1</sup> ]	[μS/cm]	[1]	[mV]	[mg.l <sup>-1</sup> ]	[FNU]	[kPa]	[cm]	[l.h <sup>-1</sup> ]
98,36	23,2	19	955,5	7,08	100,9	0,21	59,54	15,0	13,0	2,07
99,76	23,2	19	955,6	7,08	104,6	0,21	85,15	10,0	14,0	2,04
100,66	23,1	19	955,7	7,09	107,8	0,21	113,58	13,0	13,0	2,06
101,41	23,0	17	955,4	7,09	110,9	0,22	21,30	10,0	12,0	2,08
112,75	22,0	19	955,3	7,12	116,6	0,22	2,96	13,0	13,0	1,98
114,58	22,0	10	956,4	7,13	149,9	8,97	361,11	13,0	14,0	1,97
116,11	22,0	10	956,1	7,12	100,9	8,12	242,02	13,0	13,0	2,02
138,80	21,1	10	956,6	7,10	134,8	9,00	433,90	13,0	7,0	2,00
148,75	20,6	14	955,6	7,10	75,1	4,40	101,80	11,0	7,0	2,10
160,75	21,0	16	955,3	7,10	73,9	2,30	4,80	15,0	6,0	2,10
160,83	21,0	9	956,7	7,10	118,5	9,30	444,10	12,0	7,0	2,10
165,00	21,6	12	955,7	7,10	75,1	7,20	119,70	12,0	9,0	2,00
169,61	21,9	13	955,4	7,10	72,6	4,90	50,80	12,0	7,0	2,10
184,70	21,3	14	955,3	7,10	68,8	4,20	3,30	13,0	6,0	2,10
188,33	21,4	15	955,3	7,10	68,8	4,10	3,30	12,0	7,0	2,10
188,41	21,5	10	956,6	7,10	123,5	8,80	934,80	13,0	6,0	2,10
304,35	22,4	10	954,6	7,20	51,9	9,10	2,00	11,0	10,0	1,80
306,83	22,7	10	954,6	7,10	51,2	9,10	2,00	13,0	12,0	1,80
307,83	22,9	11	954,6	7,10	52,5	9,00	2,20	12,0	12,0	1,80
308,85	23,1	11	954,6	7,10	52,5	9,00	1,80	13,0	12,0	1,80
309,81	23,2	9	954,6	7,10	52,5	9,20	1,70	14,0	12,0	1,80
311,15	23,4	10	954,6	7,10	53,7	9,20	1,70	12,0	12,0	1,70
312,78	23,5	9	954,7	7,10	53,1	9,20	2,30	13,0	12,0	1,70
328,40	24,3	11	954,6	7,20	56,9	9,10	1,50	14,0	11,0	1,60
330,35	24,4	11	954,6	7,20	57,5	9,10	1,80	11,0	11,0	1,60
331,31	24,5	10	954,5	7,20	56,9	9,10	1,30	13,0	12,0	1,60
332,28	24,6	11	955,2	7,20	56,9	9,10	1,30	12,0	13,0	1,60
332,33	24,7	11	956,6	7,10	122,9	9,00	449,90	13,0	12,0	1,60
337,23	25,3	12	955,2	7,20	58,1	8,50	51,10	12,0	12,0	1,50
340,10	25,2	11	955,2	7,20	56,9	8,70	23,80	11,0	12,0	2,60
353,23	24,9	10	955,1	7,20	53,1	9,00	3,50	13,0	11,0	1,30
354,96	25,0	11	955,2	7,20	52,5	9,00	3,20	13,0	11,0	1,20
356,86	25,0	11	955,2	7,20	51,9	9,00	2,90	12,0	12,0	1,30
358,38	25,0	9	955,1	7,20	53,1	9,00	2,90	12,0	12,0	1,20
359,16	25,1	12	955,2	7,20	51,9	9,00	2,60	12,0	11,0	1,30
360,13	25,1	12	955,2	7,20	53,1	9,00	2,60	11,0	12,0	1,30
361,80	25,1	10	955,2	7,20	53,7	9,00	2,40	12,0	13,0	1,30
364,61	25,0	11	955,2	7,20	52,5	9,00	1,90	15,0	12,0	1,20
376,03	24,9	11	955,1	7,20	52,5	9,00	1,00	13,0	10,0	1,10
386,35	25,0	10	955,1	7,20	51,2	8,90	0,70	16,0	11,0	1,10
389,91	24,8	10	955,1	7,20	51,2	9,00	0,60	13,0	11,0	1,00
391,96	24,7	10	955,1	7,20	51,9	9,00	0,60	11,0	12,0	1,00
401,25	24,4	10	955,1	7,20	50,0	9,00	0,50	13,0	14,0	0,90
404,05	24,4	11	955,1	7,20	50,0	9,00	0,50	11,0	13,0	1,00
405,10	24,5	10	955,1	7,20	50,6	9,00	0,60	12,0	13,0	1,00
407,71	24,7	10	955,2	7,20	50,0	9,00	0,50	12,0	13,0	1,10
410,53	24,8	10	955,1	7,20	50,0	9,00	0,60	13,0	11,0	1,10
411,95	24,8	10	955,1	7,20	50,0	9,00	0,50	12,0	10,0	1,00
424,06	24,5	10	955,2	7,20	49,3	9,00	0,50	11,0	12,0	1,00
425,25	24,6	11	954,3	7,20	49,3	9,00	0,50	13,0	12,0	1,00

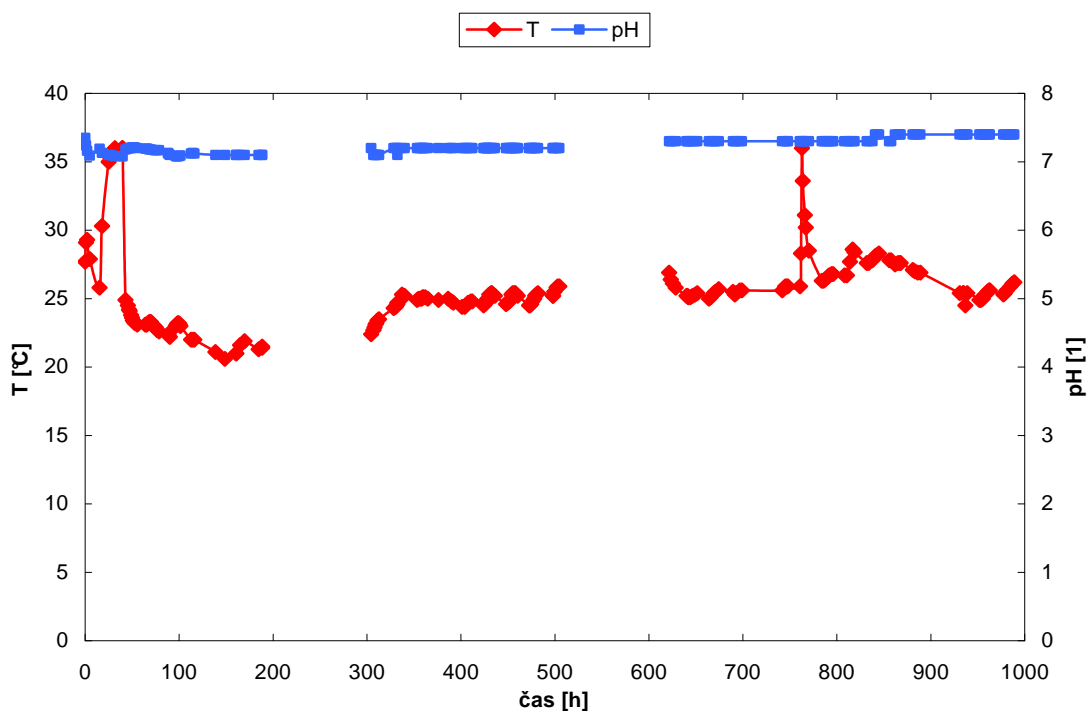
průběžný čas	teplota	otáčky	G	pH	ORP	O2	TRB	přetlak	hladina	průtok
[h]	[°C]	[ot.min <sup>-1</sup> ]	[μS/cm]	[1]	[mV]	[mg.l <sup>-1</sup> ]	[FNU]	[kPa]	[cm]	[l.h <sup>-1</sup> ]
426,75	24,7	11	954,3	7,20	49,3	8,90	0,50	11,0	13,0	0,90
427,50	24,8	10	954,3	7,20	48,1	8,90	0,60	13,0	11,0	0,90
427,58	24,9	10	955,7	7,20	117,8	8,80	423,40	12,0	12,0	0,90
428,25	25,0	11	955,2	7,20	82,6	8,70	159,90	13,0	13,0	0,90
430,03	25,3	11	954,8	7,20	64,4	8,80	59,50	11,0	13,0	0,90
432,18	25,4	10	954,8	7,20	58,8	8,80	25,40	11,0	12,0	0,80
432,81	25,4	12	954,7	7,20	56,9	8,80	20,90	12,0	12,0	0,80
434,45	25,3	10	954,6	7,20	55,0	8,80	13,10	13,0	12,0	0,70
435,90	25,2	11	954,6	7,20	53,1	8,80	9,80	13,0	13,0	0,70
448,01	24,6	10	954,6	7,20	52,5	9,10	4,90	14,0	11,0	1,80
449,78	24,7	10	954,6	7,20	51,9	9,10	4,00	13,0	13,0	1,80
451,56	24,8	10	954,6	7,20	52,5	9,10	3,70	12,0	14,0	1,70
451,61	24,9	11	955,6	7,20	91,4	8,90	449,00	12,0	14,0	1,70
453,75	25,3	11	954,9	7,20	63,2	8,80	90,00	12,0	14,0	1,50
455,11	25,4	11	954,7	7,20	56,9	8,80	57,20	15,0	4,0	1,50
456,75	25,4	11	954,6	7,20	54,4	8,80	34,40	12,0	12,0	1,50
457,75	25,4	11	954,8	7,20	52,5	8,80	26,10	10,0	12,0	1,50
458,70	25,3	11	954,7	7,20	51,9	8,80	20,90	13,0	14,0	1,40
460,50	25,2	9	954,7	7,20	51,2	8,90	14,20	12,0	12,0	1,50
472,45	24,5	11	954,6	7,20	43,7	9,10	3,80	13,0	13,0	1,50
473,56	24,5	10	954,7	7,20	43,7	9,10	3,40	11,0	13,0	1,50
474,83	24,6	11	954,7	7,20	43,1	9,10	3,10	14,0	13,0	1,40
475,81	24,8	10	954,5	7,20	44,3	9,00	2,90	11,0	12,0	1,40
477,95	25,0	12	954,6	7,20	43,1	9,00	2,90	13,0	12,0	1,40
479,03	25,2	12	954,4	7,20	43,7	8,90	2,80	12,0	12,0	1,40
480,23	25,3	11	954,5	7,20	44,3	8,90	2,60	11,0	25,0	1,40
481,85	25,4	11	954,5	7,20	43,7	9,00	2,10	13,0	0,0	2,10
497,83	25,2	11	954,6	7,20	41,8	9,00	0,70	13,0	8,0	1,90
497,91	25,2	11	953,4	7,20	103,4	8,90	438,70	13,0	0,0	1,90
499,16	25,5	10	955,7	7,20	62,5	8,90	105,20	14,0	28,0	1,90
501,78	25,8	11	955,4	7,20	52,5	8,80	35,20	11,0	27,0	1,90
502,93	25,9	11	955,4	7,20	50,0	8,80	24,90	14,0	26,0	1,80
504,61	25,9	10	955,3	7,20	48,7	8,80	15,90	12,0	27,0	1,60
506,20	25,9	10	955,2	7,20	48,1	8,80	12,80	12,0	34,0	1,60
506,88	25,9	10	955,2	7,20	48,1	8,80	12,80	12,0	34,0	1,60
507,98	25,9	10	955,2	7,20	48,1	8,80	12,80	12,0	34,0	1,60
509,10	25,9	10	955,2	7,20	48,1	8,80	12,80	12,0	34,0	1,60
519,91	25,9	10	955,2	7,20	48,1	8,80	12,80	12,0	34,0	1,60
521,71	25,9	10	955,2	7,20	48,1	8,80	12,80	12,0	34,0	1,60
523,83	0,0	0	20,0	0,40	1000,0	1,10	0,00	0,0	0,0	0,00
621,58	26,9	10	954,1	7,30	43,7	9,10	1,00	13,0	40,0	2,20
623,31	26,4	11	955,3	7,30	39,9	8,90	1,30	16,0	42,0	2,20
625,38	26,1	11	955,3	7,30	39,3	9,00	1,20	15,0	40,0	2,10
628,58	25,8	12	955,2	7,30	39,9	9,10	3,60	10,0	1,0	2,20
640,08	25,2	11	955,3	7,30	41,2	9,20	2,80	10,0	2,0	2,20
641,16	25,2	11	955,3	7,30	41,2	9,20	2,80	10,0	2,0	2,20
641,88	25,1	12	955,2	7,30	39,3	9,20	3,40	13,0	1,0	2,20
643,83	25,1	10	955,3	7,30	38,0	9,20	5,50	13,0	2,0	2,20
646,46	25,2	11	955,3	7,30	38,0	9,20	6,00	13,0	2,0	2,20
649,25	25,3	11	955,3	7,30	38,7	9,10	3,10	14,0	2,0	2,20



průběžný čas	teplota	otáčky	G	pH	ORP	O2	TRB	přetlak	hladina	průtok
[h]	[°C]	[ot.min <sup>-1</sup> ]	[μS/cm]	[1]	[mV]	[mg.l <sup>-1</sup> ]	[FNU]	[kPa]	[cm]	[l.h <sup>-1</sup> ]
651,48	25,4	12	955,3	7,30	38,0	9,10	4,70	13,0	3,0	2,20
664,01	25,0	10	955,3	7,30	38,7	9,20	2,20	11,0	3,0	2,20
665,76	25,1	10	955,2	7,30	38,0	9,20	0,80	13,0	3,0	2,10
669,20	25,4	12	955,2	7,30	36,8	9,20	0,60	13,0	3,0	2,10
670,83	25,5	12	955,2	7,30	38,0	9,20	1,00	11,0	5,0	2,20
674,33	25,7	10	955,2	7,30	38,0	9,10	0,80	10,0	4,0	2,20
689,53	25,5	11	954,9	7,30	38,0	9,20	0,80	13,0	0,0	2,00
691,40	25,3	12	955,3	7,30	37,4	9,10	1,50	12,0	0,0	0,60
692,83	25,4	11	955,1	7,30	36,2	9,10	1,30	14,0	7,0	2,10
696,83	25,6	11	955,1	7,30	37,4	9,10	1,10	11,0	6,0	2,10
698,88	25,6	12	955,2	7,30	36,8	9,10	1,00	11,0	8,0	2,10
741,86	25,6	10	955,0	7,30	38,0	9,10	0,70	12,0	7,0	2,00
745,08	25,9	11	955,2	7,30	36,8	9,00	0,50	15,0	7,0	2,00
746,83	25,9	11	955,0	7,30	38,0	9,00	2,20	11,0	9,0	2,00
747,90	25,9	12	955,1	7,30	37,4	9,00	1,50	13,0	6,0	2,00
760,75	25,9	11	955,1	7,30	39,3	9,10	1,10	13,0	2,0	2,00
761,83	28,3	13	955,1	7,30	39,9	8,90	0,70	11,0	1,0	2,00
762,83	36,0	12	955,3	7,30	63,2	8,10	4,40	12,0	1,0	2,10
763,83	33,6	13	955,3	7,30	60,7	8,30	3,30	14,0	0,0	2,30
765,83	31,1	12	955,4	7,30	56,9	8,50	0,80	13,0	0,0	2,20
766,83	30,2	12	955,2	7,30	56,3	8,60	1,20	13,0	0,0	2,30
770,20	28,5	12	955,3	7,30	50,6	8,80	0,60	11,0	14,0	2,10
784,08	26,3	11	955,3	7,30	41,2	9,00	0,50	14,0	0,0	2,20
785,83	26,3	11	955,4	7,30	41,8	9,00	0,60	13,0	2,0	2,20
787,58	26,4	11	955,4	7,30	41,2	9,00	0,80	14,0	2,0	2,10
790,75	26,6	12	955,6	7,30	40,6	9,00	0,50	10,0	0,0	2,20
791,83	26,7	12	955,4	7,30	40,6	9,00	0,70	13,0	0,0	2,30
794,33	26,8	12	955,3	7,30	40,6	9,00	0,50	12,0	4,0	2,10
796,08	26,8	11	955,3	7,30	39,9	9,00	0,60	15,0	11,0	2,20
808,08	26,7	11	955,2	7,30	39,3	9,00	0,50	12,0	0,0	2,20
810,83	26,7	11	955,2	7,30	39,3	9,00	0,50	12,0	0,0	2,20
813,83	27,7	11	955,3	7,30	38,7	8,80	0,50	1,8	18,7	32,30
816,83	28,6	11	955,3	7,30	38,7	8,40	0,50	1,4	19,0	13,20
818,83	28,4	14	955,3	7,30	37,4	8,10	0,50	1,1	19,1	0,00
831,83	27,6	15	955,3	7,30	39,3	6,60	0,50	0,2	19,1	0,00
833,83	27,6	13	955,2	7,30	38,7	6,40	0,50	0,3	19,1	0,00
837,83	27,8	11	955,3	7,30	42,4	8,80	0,50	2,1	19,4	125,60
840,83	28,1	0	1269,9	7,40	0,0	8,70	1,20	1,6	19,3	40,80
842,83	28,2	0	1269,1	7,40	353,0	8,30	1,10	1,4	19,3	102,10
844,83	28,3	0	1269,2	7,40	353,6	8,00	1,10	1,1	19,2	0,00
855,83	27,8	0	1267,4	7,30	353,5	6,80	1,20	0,4	19,0	0,00
857,83	27,8	0	1267,1	7,30	355,2	6,60	1,20	0,4	19,0	0,00
862,00	27,5	0	1270,0	7,40	351,3	9,00	1,20	2,0	19,4	122,10
865,08	27,6	0	1271,8	7,40	352,2	9,00	1,10	1,9	19,4	122,10
866,83	27,6	0	1270,9	7,40	353,5	9,00	1,20	1,9	19,4	122,10
867,83	27,6	0	1263,6	7,40	352,9	9,00	1,10	1,8	19,3	122,10
880,83	27,1	0	1270,7	7,40	357,7	8,90	1,10	0,6	19,2	122,00
883,08	27,0	0	1270,4	7,40	358,1	9,00	1,30	1,3	19,2	122,00
886,08	26,9	0	1270,9	7,40	356,8	9,10	1,20	1,9	19,1	72,00
888,83	26,9	0	1271,3	7,40	354,9	9,00	1,30	1,4	19,0	53,30

průběžný čas	teplota	otáčky	G	pH	ORP	O2	TRB	přetlak	hladina	průtok
[h]	[°C]	[ot.min <sup>-1</sup> ]	[μS/cm]	[1]	[mV]	[mg.l <sup>-1</sup> ]	[FNU]	[kPa]	[cm]	[l.h <sup>-1</sup> ]
930,83	25,4	0	1270,2	7,40	360,8	9,10	1,20	1,5	19,0	100,50
934,33	25,4	0	1266,1	7,40	362,3	9,10	1,20	1,5	19,0	102,30
934,83	25,4	0	1269,4	7,40	362,5	9,10	1,10	1,5	19,0	102,30
936,83	24,5	0	1268,8	7,40	363,1	9,00	1,10	1,4	19,0	102,10
938,83	25,4	0	1241,6	7,40	363,6	9,00	1,20	1,4	19,0	101,90
951,83	24,9	0	1235,1	7,40	368,3	9,10	1,20	1,4	19,1	101,80
953,41	24,9	0	1268,1	7,40	368,5	9,00	1,10	1,3	19,0	102,00
955,33	25,0	0	1261,1	7,40	367,9	9,00	1,20	1,3	19,0	102,00
957,83	25,3	0	1264,7	7,40	367,0	9,00	1,20	1,4	19,0	101,70
960,33	25,5	0	1259,7	7,40	367,3	8,90	1,20	1,3	19,0	100,70
961,83	25,6	0	1247,9	7,40	367,2	8,90	1,20	1,3	18,9	100,60
962,83	25,6	0	1252,0	7,40	367,8	8,90	1,20	1,3	18,9	100,60
977,33	25,3	0	1133,2	7,40	370,2	8,80	1,00	1,3	19,1	105,60
978,83	25,4	0	1134,6	7,40	369,8	8,80	1,20	1,5	19,0	93,50
980,83	25,6	0	1136,5	7,40	369,7	8,80	1,10	1,8	19,0	0,00
984,83	25,9	0	1138,2	7,40	371,3	8,70	1,10	1,2	19,0	106,10
987,00	26,1	0	1137,3	7,40	373,9	8,50	1,20	1,0	19,0	0,00
988,83	26,2	0	1135,2	7,40	374,0	8,40	1,10	0,8	18,8	0,00

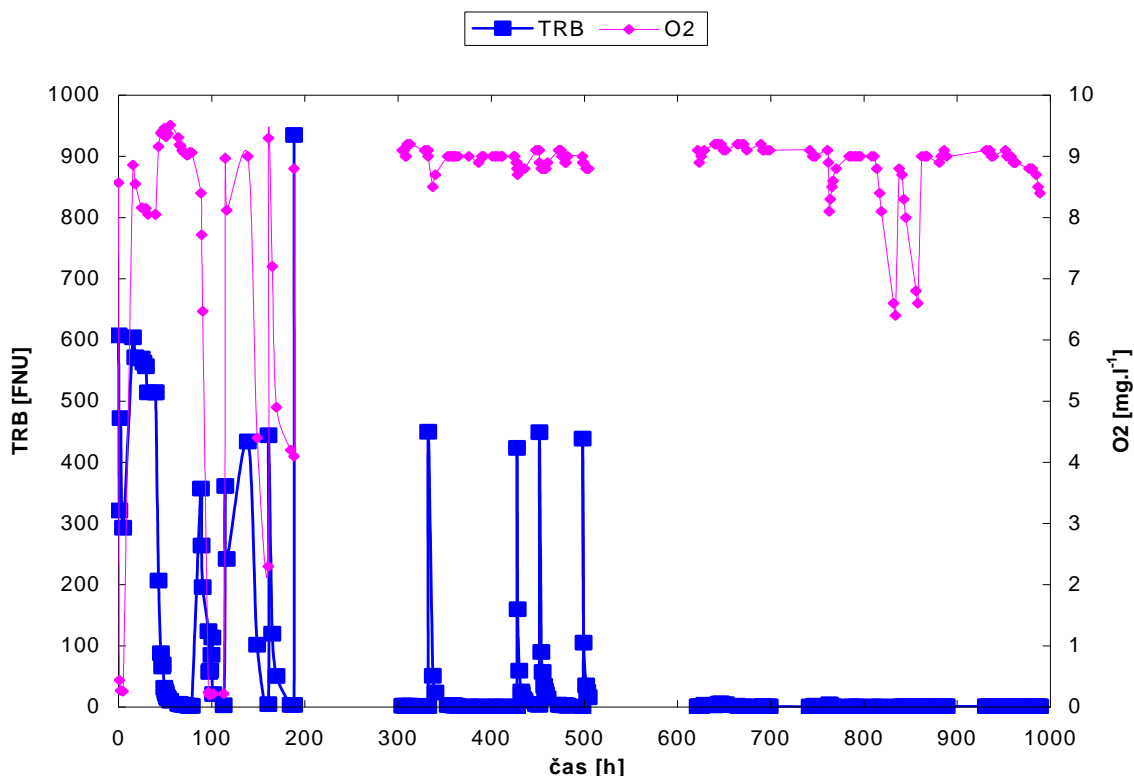
Hodnoty v tabulce (Tab. 12) jsem zapisoval z internetové stránky fermentoru (<http://www.labi.fai.utb.cz/DE5Main.html>). Čtyři následující grafy jsou právě z těchto hodnot.



Obr. 22. Závislost teploty  $T$  a  $pH$  na době experimentu.

V období zhruba mezi 200. a 300. hodinou (1.-4.4.2006) bylo internetové rozhraní fermentoru mimo provoz, proto hodnoty za toto období chybí. Další výpadek dat je mezi 500. a 620. hodinou (13.-18.4.2006). Tento výpadek byl způsoben poruchou zdroje v rozvodné skříni fermentoru. Bohužel se tak stalo zrovna během Velikonočních svátků, proto výměna poškozeného zdroje za nový trvala déle.

Biomédium obsahovalo fosforečnanový pufru, proto byla hodnota pH po celou dobu experimentu prakticky na stejné úrovni. Teplota se naopak výrazně měnila. Nejprve vzrostla na 29,3°C, pak klesla na 25,8°C a poté rostla až na hodnotu 36°C. Oba růsty měl na svědomí původní motor míchadla. Po prvním vzestupu teploty byl vypnut, pak jsme zkusili jeho nepřetržitý provoz, při kterém však zahříval suspenzi kalu na neúnosnou mez. Z tohoto důvodu jsem pak obsah fermentoru promíchal jen jednou z den dva. Malé kolísání teploty kolem 24°C je z větší části způsobeno změnami teploty v laboratoři (noc/den). Vzrůsty a poklesy teploty v závěrečné fázi experimentu jsou způsobeny testováním regulace teploty pomocí softwaru.



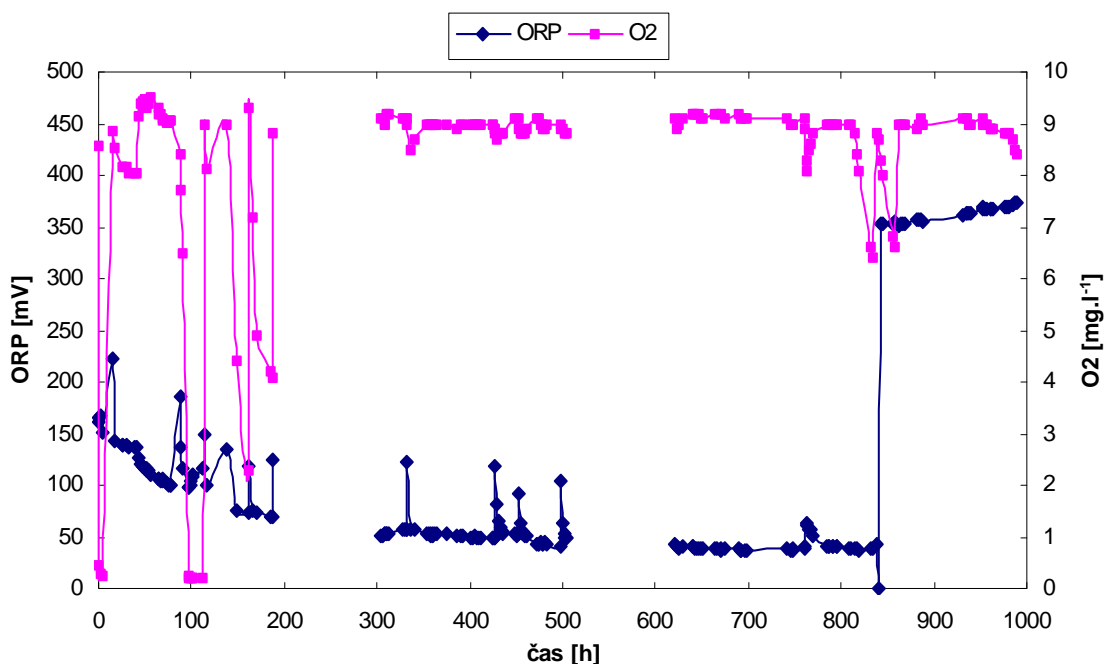
Obr. 23. Závislost turbidity (TRB) a obsahu rozpuštěného kyslíku O<sub>2</sub> na době experimentu  
Turbidita na počátku experimentu poklesla (vypnutý motor – usazování kalu). Po ukončení trvalého chodu míchadla klesala a vždy stoupla při krátkodobém promíchání. Zhruba ve stejné době kdy došlo k poruše zdroje v rozvodné skříni fermentoru přestal fungovat i

motor míchadla. V poslední fázi experimentu byl fermentor bez míchání (kromě zanedbatelné části kterou promíchával jenom proud bublinek aerace), proto klesla turbidita k nule (rozsah výstupního proudu je 0-20 mA, který odpovídá rozsahu 0,001-4000 FNU  $\Rightarrow$  oblast jednotek hodnot FNU je nepřesná).

V první fázi experimentu hodnoty rozpuštěného kyslíku klesaly a rostly podle toho jak byl fermentor promícháván. Mikroorganismy v suspenzi kalu byly vysoce aktivní, takže pokud nebyl fermentor míchán, spotřebovali všechnen kyslík dřív, než se dostal od ústí aerační trubky ke kyslíkové sondě.

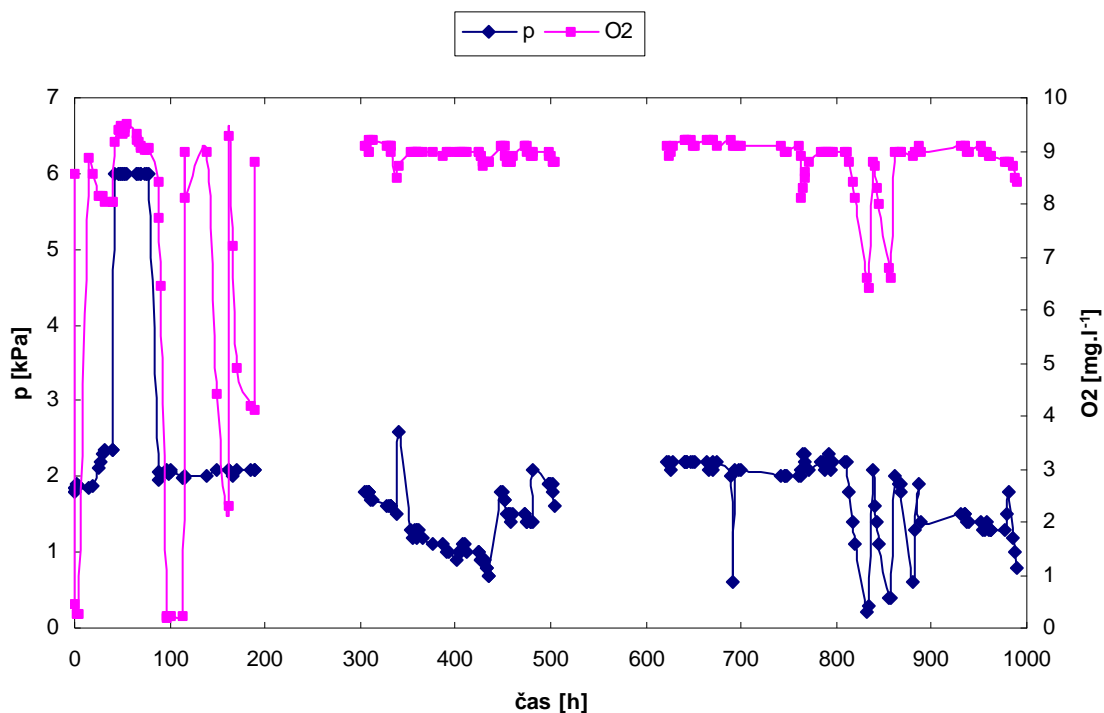
V druhé fázi experimentu se koncentrace rozpuštěného kyslíku udržovala kolem hodnoty 9 mg.l<sup>-1</sup>. pouze po promíchání vždy krátkodobě poklesla. V této fázi experimentu byl aktivovaný kal většinou usedlý u dna fermentoru, takže ve výšce kyslíkové sondy byl kyslíku relativní dostatek. Při promíchání se mikroorganismy dostaly do vznosu a mohli spotřebovávat i kyslík v blízkosti sondy.

V poslední fázi experimentu (po poruše zdroje v rozvodné skříně fermentoru – aerace krátkodobě mimo provoz než jsem motorek zapnul do síťové zásuvky, takže již nebyl závislý na napájení fermentoru) byl kal pořád u dna fermentoru. Výjimku tvořili vločky přichycené na stěnách a na sondách. Výkyvy v koncentraci rozpuštěného kyslíku již nebyly způsobovány mikroorganismy, ale změnami fyzikálních podmínek (tlaku a teploty).



Obr. 24. Závislost ORP a obsahu rozpuštěného kyslíku O<sub>2</sub> na době experimentu.

Hodnota ORP souvisela s přítomností biomasy. Na počátku a pak vždy během promíchání byla hodnota ORP vyšší, neboť se mikroorganismy a produkty jejich metabolismu dostali k měřicí části sondy. Po ukončení i občasného promíchávání se už hodnota ORP udržovala na stabilní úrovni. Vzrůst ke konci experimentu byl způsoben opravou softwarové chyby, která podhodnocovala skutečné hodnoty ORP.



Obr. 25. Závislost přetlaku  $p$  a obsahu rozpuštěného kyslíku na době experimentu.

Hodnoty přetlaku byly ze začátku zobrazovány jako průtok (softwarová chyba), teprve od 810. hodiny jsou správně označovány jako přetlak (do grafu použity správné hodnoty). S hodnotou přetlaku souvisí hodnota obsahu rozpuštěného kyslíku jak je vidět na obrázku (Obr. 25). S těmito dvěma hodnotami souvisí ještě hodnota průtoku vzduchu na aeraci. Neuvedl jsem ji do grafu, protože hodnoty průtoku byly až do poslední fáze experimentu naprosto scestné a neodpovídali skutečnosti. Hodnotu obsahu rozpuštěného kyslíku tedy kromě biochemických procesů (nedají se moc ovládat) určují hodnoty přetlaku, průtoku vzduchu a teploty (Obr. 22 a 25), které se dají snadno regulovat. Pozn.: v experimentu použit tlakoměr s rozsahem do 6 kPa přetlaku, proto nejsou zaznamenány vyšší hodnoty.

Zbylé zapisované veličiny jsem nepoužil do grafu, protože po většinu experimentu ukazovaly scestné hodnoty (otáčky, hladina, průtok) nebo nebyly pro probíhající experiment důležité (vodivost). Během experimentu jsem taky pro porovnání občas zapisoval hodnoty z lokální obrazovky DATALABu nebo přímo z modulu sond HACH LANGE (nejpřesnější). Tyto hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 13).

Tab. 13. Porovnání hodnot získaných z různých rozhraní fermentoru.

Internet											
průběžný čas [h]	teplota [°C]	otáčky [ot.min <sup>-1</sup> ]	G [μS/cm]	pH [1]	ORP [mV]	O <sub>2</sub> [mg.l <sup>-1</sup> ]	TRB [FNU]	přetlak [kPa]	hladina [cm]	průtok [l.h <sup>-1</sup> ]	
	42,98	24,9	13	956,0	7,18	127,3	9,16	206,54	11,0	46,0	6,00
	90,25	22,2	12	956,0	7,10	117,2	6,47	195,92	13,0	16,0	2,03
**	114,58	22,0	10	956,4	7,13	149,9	8,97	361,11	13,0	14,0	1,97
**	138,80	21,1	10	956,6	7,10	134,8	9,00	433,90	13,0	7,0	2,00
*	160,75	21,0	16	955,3	7,10	73,9	2,30	4,80	15,0	6,0	2,10
**	160,83	21,0	9	956,7	7,10	118,5	9,30	444,10	12,0	7,0	2,10
*	188,33	21,4	15	955,3	7,10	68,8	4,10	3,30	12,0	7,0	2,10
**	188,41	21,5	10	956,6	7,10	123,5	8,80	934,80	13,0	6,0	2,10
*	260,91	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
**	261,01	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	762,83	36,0	12	955,3	7,30	63,2	8,10	4,40	12,0	1,0	2,10
	787,58	26,4	11	955,4	7,30	41,2	9,00	0,80	14,0	2,0	2,10
	953,41	24,9	0	1268,1	7,40	368,5	9,00	1,10	1,3	19,0	102,00
DATALAB											
průběžný čas [h]	teplota [°C]	otáčky [ot.min <sup>-1</sup> ]	G [μS/cm]	pH [1]	ORP [mV]	O <sub>2</sub> [mg.l <sup>-1</sup> ]	TRB [FNU]	přetlak [kPa]	hladina [cm]	průtok [l.h <sup>-1</sup> ]	
	42,98	24,9	13	956,0	7,10	127,0	9,16	206,00	6,0	22,6	14,70
	90,25	22,2	12	956,0	7,10	116,0	6,48	197,00	2,0	24,6	99,20
**	114,58	21,9	11	956,0	7,10	151,0	8,97	363,00	1,9	24,5	93,10
**	138,80	21,1	11	956,0	7,10	135,0	8,69	457,00	2,0	24,9	93,80
*	160,75	20,9	15	955,0	7,10	74,0	2,31	4,00	2,1	25,5	93,90
**	160,83	21,0	9	956,0	7,10	118,0	9,10	469,00	2,1	24,5	93,80
*	188,33	21,4	15	955,0	7,10	68,0	4,12	3,00	2,0	24,5	91,90
**	188,41	21,4	11	956,0	7,10	122,0	8,50	456,00	2,0	24,4	91,90
*	260,91	21,1	12	955,0	7,10	54,0	6,98	0,00	2,3	23,9	100,20
**	261,01	21,2	10	956,0	7,10	127,0	9,47	395,00	2,3	23,3	100,30
	762,83	35,9	14	955,0	7,30	63,0	8,13	4,00	2,0	20,2	84,10
	787,58	26,4	12	955,0	7,30	40,0	9,01	0,00	2,1	19,5	85,80
	953,41	24,9	0	1266,0	7,40	369,0	9,03	1,10	1,3	19,0	102,00
HACH LANGE											
průběžný čas [h]	teplota [°C]	otáčky [ot.min <sup>-1</sup> ]	G [μS/cm]	pH [1]	ORP [mV]	O <sub>2</sub> [mg.l <sup>-1</sup> ]	TRB [FNU]	přetlak [kPa]	hladina [cm]	průtok [l.h <sup>-1</sup> ]	
	42,98	25,0	---	1122,0	7,25	228,0	9,27	217,00	---	---	---
	90,25	22,3	---	1110,0	7,17	243,0	6,46	210,00	---	---	---
**	114,58	22,0	---	1112,0	7,19	200,0	9,05	373,00	---	---	---
**	138,80	21,1	---	1115,0	7,20	218,0	9,32	440,00	---	---	---
*	160,75	21,0	---	1118,0	7,19	303,0	2,23	6,67	---	---	---
**	160,83	21,0	---	1118,0	7,19	241,0	9,57	434,00	---	---	---
*	188,33	21,4	---	1126,0	7,21	310,0	4,14	5,12	---	---	---
**	188,41	21,4	---	1126,0	7,19	233,0	9,23	4,37	---	---	---
*	260,91	21,2	---	1133,0	7,24	330,0	7,09	1,97	---	---	---
**	261,01	21,2	---	1137,0	7,23	226,0	9,44	436,00	---	---	---
	762,83	36,0	---	1259,0	7,40	319,0	8,27	6,49	---	---	---
	787,58	26,2	---	1256,0	7,39	350,0	9,20	2,40	---	---	---
	953,41	24,8	---	1263,0	7,43	366,0	9,04	0,98	---	---	---
Poznámky : * před promícháním fermentoru ** po promíchání fermentoru											

Na modulu sond HACH LANGE sc1000 se dají odečíst jen hodnoty pěti hlavních sledovaných veličin (pH, O<sub>2</sub>, TRB, ORP, G). Teplota byla brána jako průměr hodnot, které ukazovaly jednotlivé sondy (sondy mají pro korekci teploty vlastní teplotní čidla). Tyto hodnoty byly většinou stejné, maximálně se lišily u jedné/dvou sond o 0,1°C.

Při porovnání hodnot z HACH LANGE a DATALBu je patrné podhodnocení u G, pH a ORP. To bylo způsobeno nesprávnou softwarovou korekcí, která byla v poslední fázi experimentu opravena. Hodnoty O<sub>2</sub> a TRB si odpovídaly vezmeme-li v úvahu drobné zpoždění mezi zobrazením na HACH LANGE a DATALABem. U TRB je navíc problém s rozsahem (viz. výše), kdy reálnému rozsahu 0,001-4000 FNU odpovídá rozsah výstupního proudu 0-20 mA (nutný kvůli použité sběrnici).

Rozhraní Internet (www stránka fermentoru) vychází z DATALABu, proto pro něj platí v porovnání s HACH LANGE to samé. Drobné rozdíly mezi Internetem a DATALABem jsou způsobeny tím, že hodnoty na Internetu jsou aktualizovány v několika sekundových intervalech, zatímco DATALAB zobrazuje „on-line“. Několikasekundové intervaly aktualizace dat na Internetu byly zvoleny kvůli jejich zobrazování jako obrázků ve webovém prohlížeči. Navíc by absolutní on-line zobrazování nemuselo zvládnout pomalejší připojení k Internetu na straně Klienta.

Zobrazení některých měřených veličin (otáčky, přetlak, hladina, průtok) na Internetu (DATALABu) nebylo až do poslední fáze experimentu korektní. Otáčky ukazovaly hodnoty větší než nula i když bylo míchání mimo provoz. Hladina se měnila, i když byla během experimentu konstantní (kromě doby promíchávání). Průtok aeračního vzduchu také po většinu experimentu neukazoval reálné hodnoty, navíc byly jeho hodnoty prohozené s hodnotami přetlaku.

V přílohách P V – P VIII jsou snímky obrazovek DATALABu a www rozhraní tak jak se měnily v průběhu tvorby a doladování softwaru a uživatelského rozhraní úlohy DE5. U www rozhraní je zachycena obrazovka, ze které jsem čerpal data do tabulek (Tab. 12 a Tab. 13). Tuto obrazovku uvidí u veřejného experimentu kdokoliv včetně Klienta. Obrazovka DATALABu je přístupná jen u fermentoru (resp. jeho IPC), nebo přes LAN pomocí vzdálené plochy (na IPC běží operační systém WindowsXP). V příloze P IX jsou snímky obrazovky www rozhraní po přihlášení (pro Klienta nepřístupné!). První snímek ukazuje zadávání parametrů (16.5.2006 – ještě dojde ke změnám), druhý výpis uložených experimentů, které se dají stáhnout nebo smazat.

## ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo zprovoznit a ověřit laboratorní fermentor LF20. Byly koupeny nové sondy od firmy Hach Lange využívající moderních metod měření (optické stanovení koncentrace rozpuštěného kyslíku, indukivní měření vodivosti, nefelometrické měření zákalu). Po kalibraci jsme tyto sondy nainstalovali na modernizovaný fermentor a ověřili plynotěsnost celku. Poté následovalo ověřování zapojení a funkce měřících okruhů pomocí pitné vody. Objevily se problémy s mícháním, které se podařilo odstranit. Bohužel při pokračování ověřování pomocí demonstračního procesu se opět vyskytly problémy s mícháním, tentokrát pravděpodobně způsobené starým motorem. Výměnou motoru a změnou způsobu míchání byly tyto problémy odstraněny. Fermentor je nyní v provozuschopném stavu.

Během této diplomové práce také bylo vytvořeno softwarové vybavení fermentoru, které umožňuje jeho dálkovou kontrolu a ovládání. Tím modernizovaný fermentor splňuje zaměření projektu LABI (laboratoře integrované automatizace), jehož je součástí. Fermentor je tedy využitelný při výuce předmětu Automatizace na Fakultě aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati. Studenti mohou nejenom studovat dálkové ovládání bioprocusů, ale v budoucnu si mohou zkusit vytvořit jednoduché programy pro řízení těchto procesů (díky použitému systému Control Web). Fermentor bude využíván i studenty Ústavu inženýrství ochrany životního prostředí Fakulty technologické Univerzity Tomáše Bati při výuce předmětu Technologická cvičení z ochrany životního prostředí. Tito studenti se budou učit obsluhovat a ovládat fermentor. Přitom získají povědomí o fungování reálných bioreaktorů, se kterými se budou setkávat v praxi. Obě skupiny studentů budou moci pracovat s fermentorem ve stejném čase. Studenti předmětu Automatizace budou svými experimenty ovlivňovat pokusy studentů Fakulty technologické a tak nevědomky simulovat poruchové veličiny. Podrobnější vypracování úloh do laboratorních cvičení pro obě skupiny bude předmětem některé budoucí diplomové práce.

Fermentor je využitelný i v oblasti výzkumu. Mohou se v něm studovat nejrůznější aerobní i anaerobní procesy z oboru ochrany životního prostředí, procesního inženýrství a po důkladné sterilizaci i z oblasti potravinářství. Veškerá data budou výzkumníkům kdykoliv přístupná přes síť Internet a pokud to Obsluha\_DE5 povolí tak i jakémukoliv návštěvníkovi internetové stránky projektu LABI.



## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Kabeš, K. *Přístroje pro měření elektrolytické vodivosti – přehled trhu*. Automatizace, 48 (2005), č. 3, s. 205-206.
- [2] Kabeš, K.: *Elektrochemické snímače a převodníky – přehled trhu*. Automatizace, 48 (2005), č. 3, s. 207-212.
- [3] Kaštanek, F. *Bioinženýrství*. 1. vyd. Praha: Academia, 2001. 334 s. ISBN 80-200-0768-7
- [4] Klouda, P. *Moderní analytické metody*. 1. vyd. Ostrava: Pavel Klouda, 1996. 203 s. ISBN 80-902155-0-5
- [5] *Kapacitní hladinoměry CLM-36 – návod*. Zlín – Příluky: Dinel<sup>®</sup>, 2006, 6 s.
- [6] *KATALOG HACH LANGE 2004/2005*. Düsseldorf: Hach Lange, 2004. 134 s. 1 CD-ROM
- [7] Vyhláška Ministerstva zdravotnictví 464/2000 ze dne 8.12.2000, kterou se stanoví hygienické požadavky na koupaliště, sauny a hygienické limity venkovních hracích ploch – Měření oxidačně-redukčních potenciálů (Metodický pokyn)
- 
- [8] Novotný. *Atrima Brno (podpora)* [online]. poslední aktualizace 6.9.2005 [cit. 2005-10-19]. <<http://web.iol.cz/atrima/podpora.html>>
- [9] *Merck spol. s r.o.* [online]. [cit. 2005-10-03]. <<http://www.merck.cz/main.php?id=29>>
- [10] *Měření složení* [online]. [cit. 2005-11-13]. <<http://uprt.vscht.cz/ucebnice/mrt/F4/F4k46-sloz.htm#k4614>>
- [11] Laika, V. *Peristaltické čerpadlo* [online]. [cit. 2006-02-01]. <<http://mve.energetika.cz/jineturbiny/peristalticke-cerpadlo.htm>>
- [12] *RDO (Optical Dissolved Oxygen Sensor)* [online]. c2005 [cit. 2005-10-03]. <[http://www.in-situ.com/In-Situ/Products/TROLL9500/TROLL9500\\_RDO.html](http://www.in-situ.com/In-Situ/Products/TROLL9500/TROLL9500_RDO.html)>
- [13] *Report on the Validation of Proposed EPA Method 360.3 (Luminescence) for the Measurement of Dissolved Oxygen in Water and Wastewater* [online]. August 2004 [cit. 2005-11-14]. <<http://www.hach.com/fmmimghach?/CODE:L24787317|1//true>>
- [14] *Thefluoroprobe.com* [online]. [cit. 2005-10-03]. <http://www.thefluoroprobe.com>

---

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ATP	Adenosine Triphosphate
ČOV	Čistírna odpadních vod
DOC	Dissolved Organic Carbon
EPA	Environmental Protection Agency
FNU	Formazine Nephelometric Unit
G	vodivost (bráno obecně při označení elektrochemické veličiny)
GSM	Global System for Mobile Communications
I <sub>out</sub>	výstupní proud
IR	Infra Red
LABI	Laboratoř integrované automatizace
LAN	Local Area Network
LCD	Liquid Crystal Display
LDO	Luminescent Dissolved Oxygen
LED	Light Emitting Diode
LF20	laboratorní fermentor (typ použitý v diplomové práci)
ORP	oxidačně redukční potenciál
PID	Proportional Integral Derivation
SCP	Single Cell Proteins (označení mikrobiálních kultur při výrobě krmných směsí)
TRB	turbidita (zákal)

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1. Schéma průběhu křivky růstu mikroorganismů ve vsádkovém fermentoru [3]. ....	12
Obr. 2. Schéma aerobních procesů ve fermentoru.....	15
Obr. 3. Nákres klasické sondy založené na elektrochemickém principu.....	16
Obr. 4. Princip funkce LDO [6]......	17
Obr. 5. Závislost intenzity luminiscence na čase podle koncentrace kyslíku [6]. ....	18
Obr. 6. Srovnání stability měření rozpuštěného kyslíku tradičními elektrodami (vlevo) a senzorem RDO ( $\approx$ LDO) (vpravo) [12]. ....	18
Obr. 7. Kontaktní sonda pro měření elektrolytické vodivosti s deskovými elektrodami: a) dvouelektrodová, b) čtyřelektrodová; [1]. ....	20
Obr. 8. Princip bezkontaktního měření vodivosti [10]. ....	21
Obr. 9. Nákres bezelektrodového vodivostního senzoru [10]. ....	22
Obr. 10. Dva způsoby měření zákalu [10]. ....	24
Obr. 11. Intenzita vyzařování rozptýleného světla v polárních souřadnicích [8]. ....	24
Obr. 12. Detail ponorné zákalové sondy SOLITAX sc od firmy Hach Lange [6]. ....	25
Obr. 13. Princip potenciometrického měření hodnoty pH a redoxního potenciálu [2]. ....	27
Obr. 14. Schéma kombinované skleněné elektrody [4]. ....	27
Obr. 15. Detail měřící části elektrody pH sc od firmy Hach Lange [6]. ....	28
Obr. 16. Princip činnosti peristaltického čerpadla [11]. ....	36
Obr. 17. Nákres peristaltického čerpadla.....	37
Obr. 18. Charakteristika peristaltického čerpadla při použití průhledné hadičky a převodovém stupni (rozsahu) A.....	38
Obr. 19. Charakteristika peristaltického čerpadla při použití průhledné hadičky a převodovém stupni (rozsahu) B.....	38
Obr. 20. Schéma horního víka fermentoru .....	42
Obr. 21. Nákres magnetické spojky míchání fermentoru. ....	44
Obr. 22. Závislost teploty T a pH na době experimentu.....	50
Obr. 23. Závislost turbidity (TRB) a obsahu rozpuštěného kyslíku O <sub>2</sub> na době experimentu .....	51
Obr. 24. Závislost ORP a obsahu rozpuštěného kyslíku O <sub>2</sub> na době experimentu. ....	52
Obr. 25. Závislost přetlaku p a obsahu rozpuštěného kyslíku na době experimentu.....	53

**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1. Technické parametry sondy LDO firmy Hach Lange [6].....	19
Tab. 2. Technické parametry indukční vodivostní sondy firmy Hach Lange [6].....	22
Tab. 3. Nejvíce používané jednotky zákalu [8]. .....	23
Tab. 4. Technické parametry použité ponorné zákalové sondy firmy Hach Lange [6].....	26
Tab. 5. Technické parametry sond pH D sc a 1200 sc firmy Hach Lange [6].....	30
Tab. 6. Oxidačně-redukční potenciál roztoku standardu proti chloridostříbrné elektrodě s různou koncentrací roztoku KCl (ORP) a potenciál proti standardní vodíkové elektrodě (ORP <sub>H</sub> ) a hodnoty pH při různých teplotách [7].....	34
Tab. 7. Složení 1 l biomédia. ....	35
Tab. 8. Charakteristika peristaltického čerpadla při použití silikonové hadičky .....	37
Tab. 9. Naměřené koncentrace rozpuštěného kyslíku při ověřování LDO.....	40
Tab. 10. Hodnoty naměřené při ověřování fermentoru pitnou vodou. ....	43
Tab. 11. Ověření zapojení fermentoru. ....	43
Tab. 12. Hodnoty naměřené během prvního experimentu s aktivovaným kalem. ....	46
Tab. 13. Porovnání hodnot získaných z různých rozhraní fermentoru. ....	54

**SEZNAM PŘÍLOH**

PŘÍLOHA P I: ZAPOJENÍ SIGNÁLŮ NA SBĚRNICI DATALABU

PŘÍLOHA P II: NÁKRESY HLAVNÍCH SOND

PŘÍLOHA P III: FOTOGRAFIE FERMENTORU

PŘÍLOHA P IV: NÁKRESY PŘEVODNÍKU HACH LANGE sc1000

PŘÍLOHA P V: WWW ROZHRANÍ FERMENTORU (23.3.2006 A 10.4.2006)

PŘÍLOHA P VI: WWW ROZHRANÍ FERMENTORU (3.5.2006)

PŘÍLOHA P VII: WWW ROZHRANÍ FERMENTORU (11.5.2006)

PŘÍLOHA P VIII: ROZHRANÍ DATALABU (23.3.2006 A 2.5.2006)

PŘÍLOHA P IX: WWW ROZHRANÍ – NASTAVENÍ PARAMETRŮ EXPERIMENTU  
A SEZNAM VŠECH ULOŽENÝCH EXPERIMENTŮ (16.5.2006)

PŘÍLOHA P X: FOTOGRAFIE UPRAVENÉHO MÍCHÁNÍ FERMENTORU

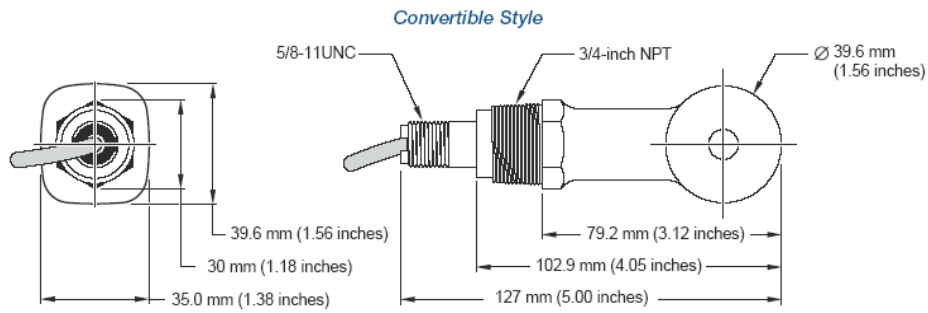
# PŘÍLOHA P I: ZAPOJENÍ SIGNÁLŮ NA SBĚRNICI DATALABU

Zapojení signálů DE5							
svorkovnice	č. svorky	modul	DataLab	název signálu	el. rozsah	fyz. rozsah	
X3	1	AO	AO/DO GND	společná zem. analog OUT/dig. OUT			
	2		AO/DO GND	společná zem. analog OUT/dig. OUT			
	3		AO/DO GND	společná zem. analog OUT/dig. OUT			
	4		AO/DO GND	společná zem. analog OUT/dig. OUT			
	5		AO/DO GND	společná zem. analog OUT/dig. OUT			
	6		AO/DO GND	společná zem. analog OUT/dig. OUT			
	7		AO/DO GND	společná zem. analog OUT/dig. OUT			
	8		AO/DO GND	společná zem. analog OUT/dig. OUT			
	9		AO/DO GND	společná zem. analog OUT/dig. OUT			
	10		C1	signál. LED			
	11		C2	T (3d)	teplo	0-10 V	0-300 W
	12		C3	H (4)	ventil 4	0-10 V	otevřeno / zavřeno
	13		C4	H (13)	ventil 13	0-10 V	otevřeno / zavřeno
	14		C5	H (17)	ventil 17	0-10 V	otevřeno / zavřeno
	15		C6	H (24)	ventil 24	0-10 V	otevřeno / zavřeno
	16		C7	(19)	otáčky	0-50 Hz	0-1000 ot/min
	17		C8		rezerva		
	18		DO	DO7	H (4)		
	19	DO8			rezerva		
X4	1	AI	A1	TCA3	teplota	0-10 V	0-100°C
	2		A2		rezerva		
	3		A3	(7)	vodivost	0-10 V	0-2 S
	4		A4	(8)	pH	0-10 V	0-14 [1]
	5		A5	(9)	ORP	0-10 V	-1000 +1000 mV
	6		A6	(10)	O2	0-10 V	0-20 mg/l
	7		A7	(11)	turbidita	0-10 V	0-5000 FNU
	8		A8		rezerva		
	9	AI	(A9) B1		rezerva		
	10		(A10) B2	P (21)	tlak	0-10 V	0-1600 kPa
	11		(A11) B3	L (22)	hladina	0-10 V	0-0,3 m
	12		(A12) B4	F (23)	průtok	0-10 V	0-150 l/h
	13		(A13) B5	(14)	NH3	0-10 V	0-10 %
	14		(A14) B6	(15)	CO2	0-10 V	0-20 %
	15		(A15) B7	(16)	CH4	0-10 V	0-50 %
	16		(A16) B8	(5)	pěna	0-10 V	0-10 %

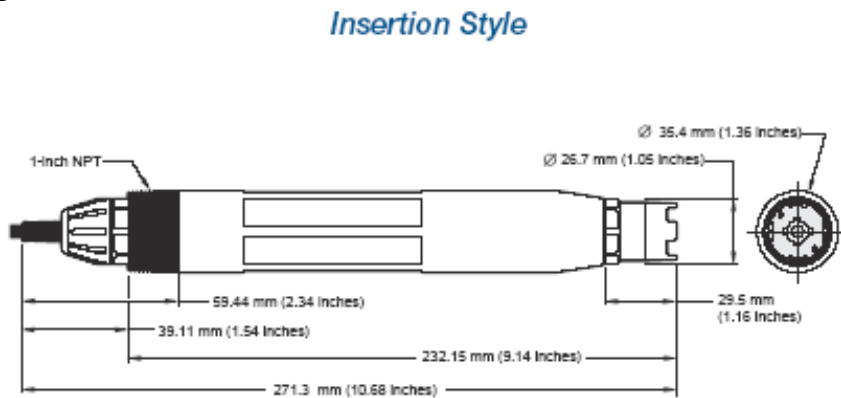
Poznámky : svorkovnice X4 (...) je třípólový  
modrá = společná zem 0 V (GND)  
hnědá = společný náboj +24 V (U)  
červená = signál 0-10 V (OUT)

# PŘÍLOHA P II: NÁKRESY HLAVNÍCH SOND

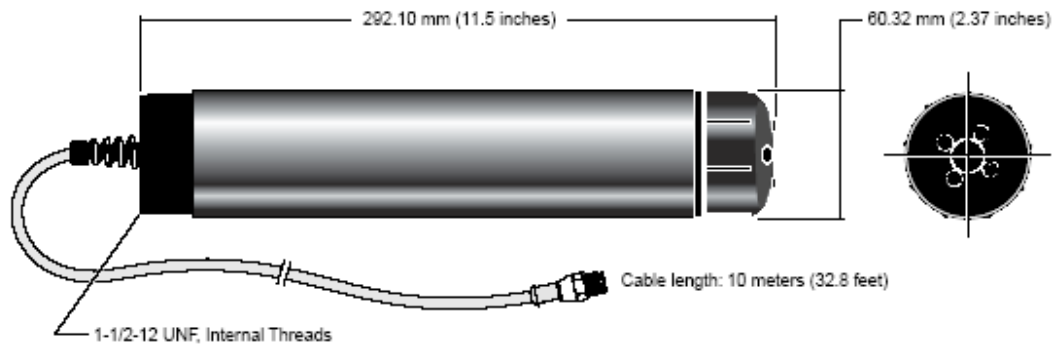
Vodivost



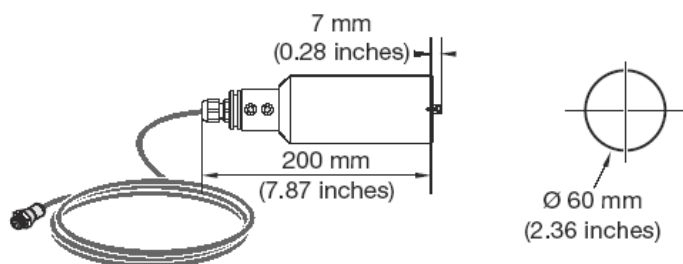
pH, ORP:



Kyslík (hloubka závitů 6/4“ je 30mm).



Zákal



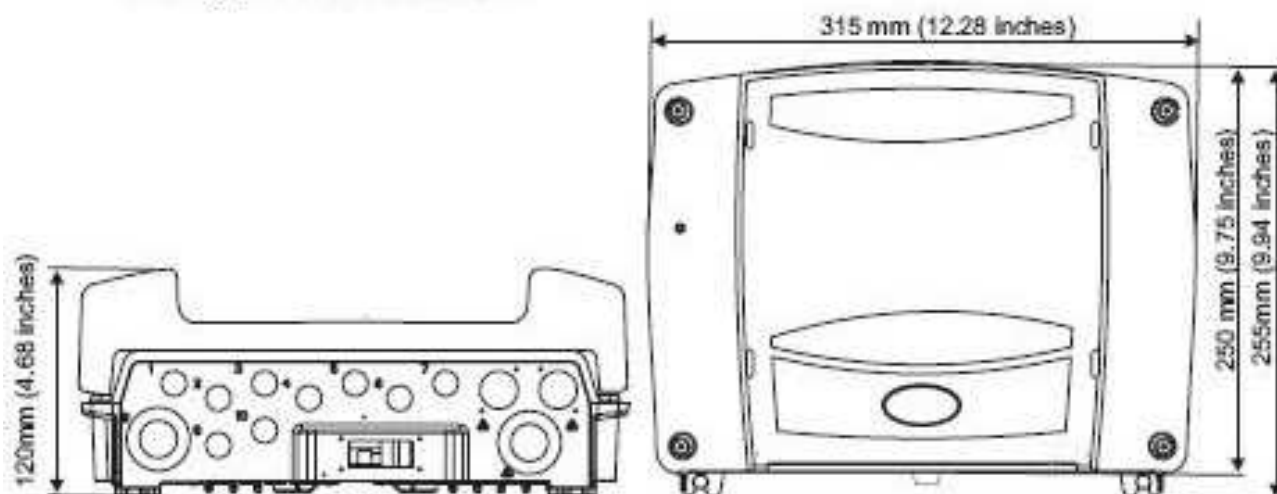
## PŘÍLOHA P III: FOTOGRAFIE FERMENTORU



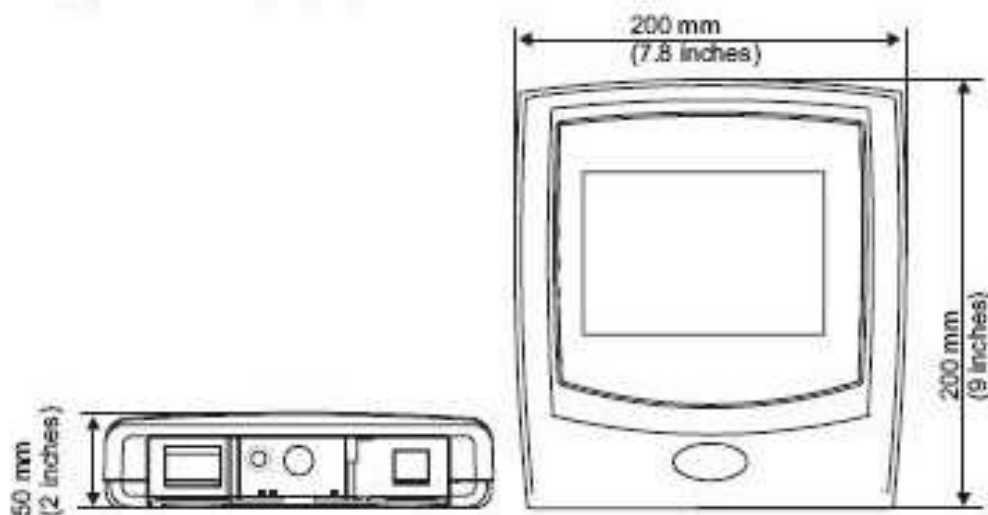


## PŘÍLOHA P IV: NÁKRESY PŘEVODNÍKU HACH LANGE SC 1000

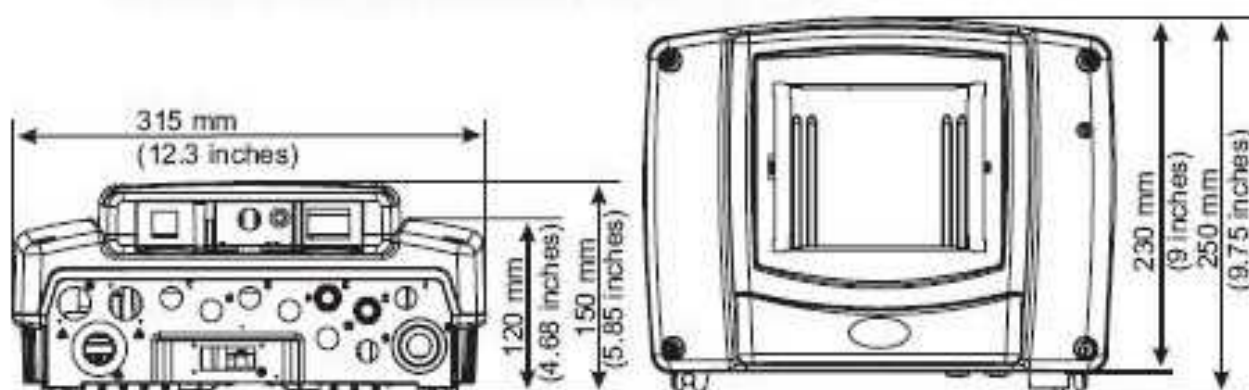
Celkový pohled na modul sond



Celkový pohled na displejový modul



Celkový pohled na displejový modul s modulem sond



# PŘÍLOHA P V: WWW ROZHRANÍ FERMENTORU (23.3.2006 A 10.4.2006)

Server - Microsoft Internet Explorer

Soubor Úpravy Zobrazit Oblíbené Nástroje nápověda

Zpět

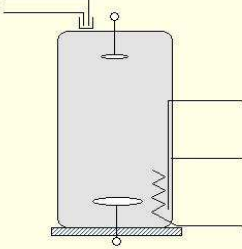
Adresa <http://195.178.95.248/DE5Main.html?UserID=ftplzxmjvchi@ffdkbkojpsghosyvdo&Mode5=R&NgVer=CZ> Přejít Odkazy

**DE5 - Biochemický proces** Hlavní stránka

● Běží experiment **5rad060323a**, spuštěný uživatelem a **23.3.2006**  
**14:33:57**  
 Zbývá 00:11:24 z 01:40:00

Parametr	Hodnota
Režim	Provoz
Teplota ohřevu	0
Otáčky míchání	0
Provozdušňování	0
pH	0
Dávkování čerpadla 2b	0
Dávkování čerpadla 2c	0
Perioda vzorkování	0

Úloha je ve výstavbě



Teplota	27.7 °C
Otáčky	10 ot/min
Vodivost	957.5 uS/cm
pH	7.35 pH
ORP	161.2 mV
Kyslík	8.57 ppm
Turbidita	607.47 FTU
Tlak	14 kPa
Hladina	8 cm
Průtok	1.79 l/h

DE5 - Biochemický proces  V této úloze máte uložené experimenty (2) Přihlášen uživatel a [Odhlásit](#) [Administrátorská sekce](#)

Hotovo Internet

Server - Microsoft Internet Explorer

Soubor Úpravy Zobrazit Oblíbené Nástroje nápověda

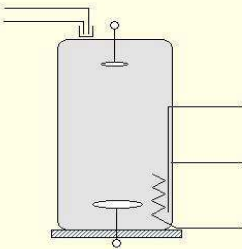
Zpět

Adresa <http://195.178.95.248/DE5Main.html> Přejít Odkazy

**DE5 - Biochemický proces** Hlavní stránka

● Úloha neběží, po [přihlášení](#) ji můžete ovládat.

Úloha je ve výstavbě



Teplota	24.9 °C
Otáčky	10 ot/min
Vodivost	955.7 uS/cm
pH	7.2 pH
ORP	117.8 mV
Kyslík	8.8 mg/l
Turbidita	423.4 FNU
Tlak	12 kPa
Hladina	12 cm
Průtok vzduchu	0.9 l/h

DE3 - Průtokoměry

Stahování obrázku <http://195.178.95.248/prMain5?98...>

# PŘÍLOHA P VI: WWW ROZHŘANÍ FERMENTORU (3.5.2006)

Opera Widgets Server - Opera

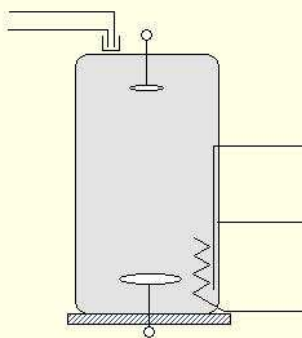
http://www.labi.fai.utb.cz/DE5Main.html

Seznam Server


[Hlavní stránka](#)

## DE5 - Biochemický proces

● Úloha neběží, po [přihlášení](#) ji můžete ovládat.

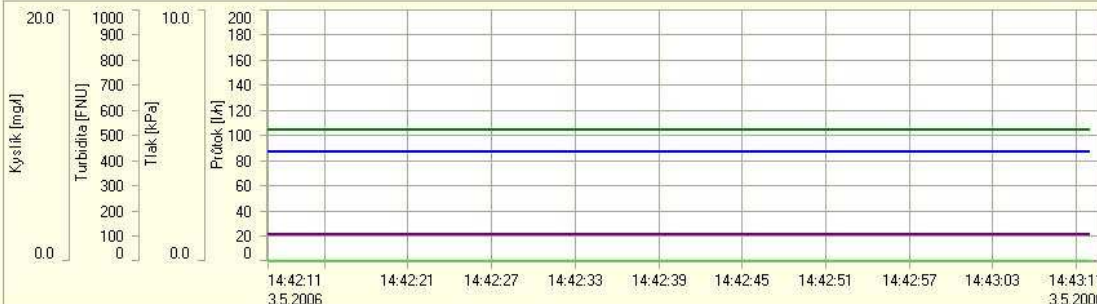


Teplota	25.8 °C
Otáčky	0 ot/min
Vodivost	1137.7 uS/cm
pH	7.4 pH
ORP	369.1 mV
Kyslík	8.8 mg/l
Turbidita	1.2 FNU
Tlak	1.1 kPa
Hladina	19 cm
Průtok vzduchu	105.4 l/h



Osa: Teplota

- Teplota
- Vodivost
- pH
- ORP

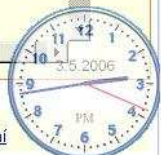


Osa: Kyslík

- Kyslík
- Turbidita
- Tlak
- Průtok

DE1 - Regulace teploty ▼ Přejít

[Přihlášení](#)



# PŘÍLOHA P VII: WWW ROZHRANÍ FERMENTORU (11.5.2006)

Opera Widgets Server - Opera  
 http://www.labi.fai.utb.cz/DE5Main.html Images: 5/6 Menu

Seznam Server

DE5 - Biochemický proces Hlavní stránka

● Běží experiment

Teplota	25.3 °C
Otáčky	0 ot/min
Vodivost	1149.2 uS/cm
pH	7.3 pH
ORP	383.7 mV
Kyslík	8.2 mg/l
Turbidita	0.9 FNU
Tlak	0.2 kPa
Hladina	18.8 cm
Průtok vzduchu	0 l/h

- Osa: Teplota
- Teplota
- Osa: Vodivost
- Vodivost
- Osa: pH
- pH
- Osa: ORP
- ORP

- Osa: Kyslík
- Kyslík
- Osa: Turbidita
- Turbidita
- Osa: Tlak
- Tlak
- Osa: Průtok
- Průtok

DE4 - Spojité řízení motoru Přejít Přihlášení

# PŘÍLOHA P VIII: ROZHRANÍ DATALABU (23.3.2006 A 2.5.2006)

**DE5** Vypnout vše.

**RDE5**

Z1  I

Z2  I

Z3  I

Z4  I

Z5  I

Otáčky motoru % 19.31

Topení  I

servo1 0.00 (OUT2)

servo2 0.00 (OUT3)

servo3 0.00 (OUT4)

servo4 0.00 (OUT5)

teplota °C **27.7 °C** In Analog A

otáčky **11 ot/min**

Vodivost us/cm **957 us/cm**

pH **7.3**

ORP mV **161 mV**

O2 mg/l **8.55 mg/l**

Turbidita FNU **616 FNU 1**

rezerva **14**

rezerva **6** In Analog B

tlak kPa **1.7 kPa1**

Hladina cm **25.5 cm**

průtok l/h **95.5 l/h**

NH3 % **-0 %**

CO2 % **0 %**

NH4 % **0 %**

pěna **0**

**servis**

In Analog A Mode: 0 Device Connected: ■

LED 0.00 0 (OUTA)

rezerva 0.00 1 (OUTB)

rezerva 0.00 6 (OUTG)

Out Port 0 0

**DE5** Experiment zastaven

Ovládání z WWW  Mistní ovládání  Experiment zastaven

**Regulace pH**

Režim  R  P

Diference od pH=7 **7.00**

Perioda regulace [s] **50.00**

Výstupní impuls [s] **1.00**

**Regulace provzdušnění**

Režim  R  P

Požadovaná **50**

PID zesílení **10.00**

PID integrační konstanta **9999.00**

PID derivační konstanta **0.00**

Perioda regulace **1**

teplota °C **24.9 °C** In Analog A

otáčky **0 ot/min**

Vodivost us/cm **1265 us/cm**

pH **7.4**

ORP mV **369 mV**

O2 mg/l **9.03 mg/l**

Turbidita FNU **1.2 FNU 1**

rezerva **21524**

rezerva **17** In Analog B

tlak kPa **1.3 kPa**

Hladina cm **19.0 cm**

průtok l/h **102.0 l/h**

NH3 % **0 %**

CO2 % **-0 %**

NH4 % **0 %**

pěna **0**

**Regulace teploty**

Režim  R  P

Požadovaná teplota **30.0**  Topení  Chlazení

Hystereze **0.0**

Perioda regulace **50.0**

Topení - konstanta **0.10**

PID zesílení **10.00**

PID integrační konstanta **9999.00**

PID derivační konstanta **0.40**

**Regulace tlaku**

Max tlak **500**

**Ručně ovládané výstupy**

Z3  Plynový odběr

Z4  Kapalinový odběr

# PŘÍLOHA P IX: WWW ROZHRANÍ – NASTAVENÍ PARAMETRŮ EXPERIMENTU A SEZNAM VŠECH ULOŽENÝCH EXPERIMENTŮ (16.5.2006)

Název experimentu	Začátek	Konec	Veřejný
sdf	22.3.2006 15:41:42	N/A	Ne
Srad060323a	23.3.2006 14:33:57	23.3.2006 16:13:57	Ne
Srad060323b	24.3.2006 11:24:03	24.3.2006 13:04:04	Ne
Shru060324b	24.3.2006 14:38:42	24.3.2006 16:18:42	Ne
prvni	28.3.2006 13:47:18	28.3.2006 15:27:19	Ne
mil20060426-001	26.4.2006 13:52:02	26.4.2006 13:52:02	Ne
mil20060426-002	26.4.2006 14:04:33	26.4.2006 14:04:34	Ne
mil-20060426-00	26.4.2006 14:09:41	26.4.2006 14:09:41	Ne
mil-20060426-004	26.4.2006 14:12:45	26.4.2006 14:12:45	Ne
mil-20060426-020	26.4.2006 14:39:20	26.4.2006 14:39:20	Ne
mil-20060426-021	26.4.2006 14:45:33	26.4.2006 14:45:33	Ano
Srad060427a	27.4.2006 14:44:38	27.4.2006 14:44:39	Ano
Srad060427b	27.4.2006 15:07:55	27.4.2006 15:07:56	Ne
Shru060428a	28.4.2006 8:07:58	28.4.2006 8:07:58	Ne
Shru060502a	2.5.2006 7:42:15	2.5.2006 7:42:15	Ne
test00258	4.5.2006 16:04:36	4.5.2006 16:04:36	Ne
xxxc	9.5.2006 16:15:49	9.5.2006 16:15:49	Ne
Shru060511a	11.5.2006 13:25:16	11.5.2006 13:25:17	Ne
Shru060516idf	16.5.2006 14:09:51	16.5.2006 14:09:52	Ne

## PŘÍLOHA P X: FOTOGRAFIE UPRAVENÉHO MÍCHÁNÍ FERMENTORU

Umístění nového motoru míchání na horním víku fermentoru.



Zátka ve dně fermentoru zabraňující nebezpečnému rozkmitání hřídele.



## EVIDENČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>Místo uložení práce:</b> Ústřední knihovna UTB ve Zlíně	
<b>Autor práce:</b>	<b>SEDLAČÍK Radek</b>
<b>Název práce</b>	
česky:	<b>Technologické ověření provozních funkcí zařízení fermentoru</b>
anglicky:	Technological verification of the operational functions of fermenter unit
<b>Vedoucí práce:</b>	Ing. Marie Dvořáčková, Ph.D.
<b>Vysoká škola (název a adresa):</b>	
Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Mostní 5139, 760 01 Zlín	
Fakulta technologická, nám. T. G. Masaryka 275, 762 72 Zlín	
Ústav inženýrství ochrany životního prostředí	
<b>Rok obhájení práce:</b>	2006
<b>Počet stran, obrázků, tabulek:</b>	61, 25, 13
<b>Předmětová hesla:</b>	
česky:	fermentor, bioreaktor, aerobní fermentace, biotechnologie, LDO, měření kvality/parametrů vodných roztoků
anglicky:	fermenter, bioreactor, aerobic fermentation, biotechnology, LDO, water solutions quality/parameters measurement
<b>Souhrn</b>	
česky:	Tato diplomová práce je zaměřena na technologické zprovoznění laboratorního fermentoru středních rozměrů s využitím průmyslových sond pro měření významných provozních veličin. V úvodní teoretické části je rozpracován popis jednotlivých typů bioreaktorů (fermentorů) a měřených veličin včetně sond a metod pro jejich měření. V praktické části je rozpracováno ověření reálných měřících snímačů a okruhů s využitím možností dálkového sledování a řízení fermentačních procesů pomocí sítě internet. Využívá se přitom projektu „Laboratoře integrované automatizace“. Fermentor je v tomto projektu označen jako „Úloha DE5 – Biochemické procesy“. V závěru práce jsou uvedeny souhrnné výsledky ověřování.
anglicky:	This diploma work is intent on technological launching of middle size laboratory fermenter with utilization industrial sensors for measurement of important operational quantity. In introductory theoretical part is elaborated description of single type bioreactors (fermenters) and measured quantity inclusive sensors and methods for their measurement. In practical part is elaborated the attestation of real measuring sensors and circuit with using the potentiality of long-distance monitoring and driving of fermentative processes per the Internet. Fermenter is part of the project "Laboratories of integrated automatization" and is marked as "Experiment DE5 - Biochemical processes". In conclusion the work are stated summary results of checkout.