

# Posouzení možnosti pěstování aerobních mikroorganismů v suspenzi stékající po skloněné kultivační ploše

665.939.35

Ing. KAREL LÍVANSKÝ, CSc., Ing. MIROSLAV KAJAN, Mikrobiologický ústav ČSAV, Oddělení autotrofních mikroorganismů, Třeboň

**Klíčová slova:** *přestup kyslíku, výkonnost aerace, disipace energie, stékající vrstva, aerobní mikroorganismy, fermentace, řasy*

## ÚVOD

Už více než 40 let se výzkum zabývá mikroskopickými řasami, které jsou zdrojem nejen biomasy, ale i širokého spektra ostatních produktů [1–3]. I přes nesporné přednosti řasové biomasy (vysoký obsah proteinů, vitamínů a jiných biologicky cenných látek) a potenciální výhody v porovnání s produkcí vyšších rostlin v zemědělství, zůstává objem vyrobené řasové biomasy celosvětově na relativně nízké hladině — řádově  $10^3$  až  $10^4$  tun suché biomasy za rok. Jednou z příčin tohoto stavu jsou poměrně vysoké investiční náklady na stavbu kultivačních jednotek a na zařízení zpracovatelské linky (separace, sušení atd.). Tím je doba návratnosti investic dlouhá. V klimaticky mírných pásmech se vzhledem k autotrofnímu způsobu výživy řas tato doba zdvojnásobuje oproti oblastem, kde je možno pěstovat v příhodných klimatických podmínkách řasy celoročně. Jednou z možností, jak tento nedostatek eliminovat, je využití kultivačních ploch a zpracovatelské linky v období, kdy se řasy nepěstují, k doplňkové technologii pěstování aerobních mikroorganismů (např. kvasinek, které rostou při nízkém pH umožňujícím udržet po delší dobu kulturu relativně čistou i v neaseptických podmínkách). Aerobní heterotrofní organismy mají technologii zpracování v podstatě shodnou s technologií řasové výroby. Předpokládáme, že teplota kultivace aerobních mikroorganismů může být udržována na optimální hodnotě např. přihříváním s využitím odpadního nízkopotenciálního tepla, jehož zdrojem jsou jaderné elektrárny, kompresorové stanice apod.

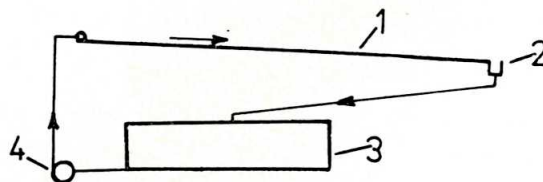
V práci posuzujeme z teoretického hlediska možnost produkce aerobních mikroorganismů (AM) v suspenzi stékající turbulentním tokem po skloněné kultivační ploše.

## ROZBOR PROBLÉMU

### a) **Oxygenační kapacita a výkonnost aerace v uvažovaných kultivačních jednotkách**

Na třeboňském pracovišti Mikrobiologického ústavu ČSAV byly v 60. letech postaveny a odzkoušeny kultivační jednotky pro řasy, jejichž schéma a funkce byly popsány dříve [4]. Kultivační jednotky mají rovinný povrch se sklonem do 3 %, po němž stéká suspenze řas do sběrného žlabu a dále do retenční nádrže, odkud je suspenze dopravována čerpadlem zpět na kultivační plochu. Přes noc a v případě nepříznivého počasí je suspenze udržována v retenční nádrži, kde je aerována vzduchem. Principiální schéma kultivační jednotky je na obr. 1.

Předpokládejme, že na kultivační ploše se nachází suspenze AM, přičemž kyslík potřebný pro růst mikroorganismů je zabezpečován difuzí ze



Obr. 1. Schéma kultivačního zařízení (boční pohled).  
1 — kultivační plocha se sklonem, 2 — sběrný žlab, 3 — nádrž, 4 — čerpadlo



vzduchu. Rychlost přestupu kyslíku ze vzduchu do suspenze můžeme vyjádřit vztahem:

$$R = [K_L A/V] (C_s - C) \quad (1)$$

V případě, že koncentrace rozpuštěného kyslíku uvnitř suspenze je zanedbatelná vůči koncentraci kyslíku na rozhraní suspenze — vzduch, dostaneme z rovnice (1) vztah pro oxygenační kapacitu:

$$R_m = [K_L A/V] C_s \quad (2)$$

Poměr oxygenační kapacity a spotřebované energie na aeraci udává výkonnost aeračního zařízení [5]:

$$\varphi = R_m / \varepsilon \rho \quad (3)$$

$R_m$  se udává obvykle v  $\text{kg O}_2/\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ,  $\varphi$  v  $\text{kg O}_2/\text{kWh}$ .

V rozsahu teplot  $0-30^\circ\text{C}$  vzrůstá u všech typů aeračních zařízení hodnota  $K_L$  asi o 2 % při zvýšení teploty kapaliny o  $1^\circ\text{C}$ . V důsledku poklesu rozpustnosti kyslíku se zvýšením teploty se však zmenšuje i hodnota  $C_s$ , a proto je aerační kapacita přibližně nezávislá na teplotě [6].

Hodnoty  $K_L A/V$  (též se nazývá koeficient reaerace) udává pro tok vody v řekách a potocích, popř. kanálech řada autorů — [7—8]. V těchto pracích jsou uvedeny závislosti  $K_L A/V$  na střední rychlosti  $u$  a na tloušťce vrstvy kapaliny  $h$  pro tloušťky větší než 10 cm. Pro menší tloušťky vrstvy kapaliny, které se vyskytují při toku po kultivační ploše, nejsou k dispozici žádné vztahy. Měřením a vyhodnocením transportu kyslíku do turbulentně tekoucí kapaliny s tloušťkou vrstvy 2,6 cm se zabývali v laboratorním měřítku Risse *et al.* [9]. Pro vodu obsahující různé přidané soli a povrchově aktivní látky navrhuji tyto autoři pro výpočet  $K_L$  vztah:

$$K_L = 0,4 \text{ Sc}^{-2/3} (\varepsilon \nu)^{1/4} \quad (4)$$

Rychlost disipace energie v jednotce hmotnosti kapaliny proudící po kultivační ploše vypočteme:

$$\varepsilon = g u \sin \alpha \quad (5)$$

kde  $\sin \alpha$  je sklon plochy vůči vodorovné rovině.

V turbulentní oblasti proudění v kanálech platí Manningova rovnice:

$$u = \frac{1}{n} h^{2/3} (\sin \alpha)^{1/2} \quad (6)$$

Součinitele drsnosti  $n$  jsou tabelovány ve standardních příručkách [10]. Do rovnice (6) je nutno dosazovat správné rozměry  $u$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ],  $h$  [m], aby tabelované hodnoty  $n$  poskytl správné výsledky.

#### b) Příklad výpočtu

Parametry vzaté do výpočtu jsou uvedeny v tabulce 1. Uvažujeme jako kapalinu vodu, sklon kultivační plochy je 3 %, materiál plochy je ze skla [4].

Tabulka 1. Vstupní parametry pro výpočty

Teplota	=	$30^\circ\text{C}$	$n$	=	0,009 (hladké povrchy 10)
$C_s$	=	$6,75 \text{ mg O}_2 \cdot \text{l}^{-1}$	$\sin \alpha$	=	0,03
$\nu$	=	$8,04 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$g$	=	$9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
$D$	=	$2,84 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$\rho$	=	$1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Tabulka 2. Vypočtené charakteristiky suspenze mikroorganismů na kultivační ploše

$\Gamma = uh$	$h$	$u$	$\varepsilon$	$K_L$	$R_m$	$\varphi$
(rov. (6))			rov. (5)	rov. (4)	rov. (2)	rov. (3)
( $\text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ )	(cm)	( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ )	( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	( $\text{kg O}_2 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ )	( $\text{kg O}_2 \cdot \text{kWh}^{-1}$ )
1	0,27	0,37	0,109	$1,60 \cdot 10^{-4}$	1,445	13,19
2	0,41	0,49	0,144	$1,71 \cdot 10^{-4}$	1,022	7,07
3	0,52	0,58	0,170	$1,78 \cdot 10^{-4}$	0,834	4,91
4	0,62	0,65	0,191	$1,84 \cdot 10^{-4}$	0,722	3,79
5	0,71	0,71	0,208	$1,88 \cdot 10^{-4}$	0,646	3,10

Výsledky výpočtu jsou uvedeny v tabulce 2. Je zde také uvedena lineární rychlost zkrápění kultivační plochy  $\Gamma = uh$ , jež představuje objemový průtok dopravované kapaliny připadající na jednotku šířky kultivační plochy.

Oxygenační kapacita v rovnici (2) byla vypočtena s tím, že  $A/V = h$ .

#### VÝSLEDKY A DISKUSE

V rovnici (3) vystupuje rychlost disipace energie v turbulentně tekoucí kapalině na skloněném povrchu kultivační jednotky. Na dopravu kapaliny zpět na kultivační plochu musíme dodat cirkulačnímu čerpadlu více energie, než je disipováno na kultivační ploše, neboť je třeba překonávat hydraulické odpory ve výtlačném potrubí, ztráty v převodu z elektromotoru na čerpadlo a ztráty v elektromotoru. Pro rychlost disipace energie při dopravě kapalin čerpadlem platí:

$$\varepsilon' = E/V\rho \quad (7)$$

kde příkon čerpadla  $E$  je vypočten podle vztahu [11]:

$$E = \rho g HQ/\eta \quad (8)$$

Z rovnic (5), (7), (8) obdržíme vzhledem k tomu, že  $Q/V = u/L$ :

$$\varepsilon'/\varepsilon = (H/H_{\min})/\eta \quad (9)$$

kde  $H_{\min} = L \sin \alpha$  je rozdíl výšek mezi počátkem a koncem kultivační plochy.

Skutečnou výkonnost aerace vypočteme z rovnice (3), kde místo  $\varepsilon$  dosadíme  $\varepsilon'$  z rovnice (9):

$$\varphi'/\varphi = (H_{\min}/H) \eta \quad (10)$$

Pokud je kultivační plocha zároveň střechou skleníku [4], bývá vynesena ve výšce 2 až 3 m nad terén. Pro čerpadlo umístěné v rovině terénu bude dopravní výška kolem  $H = 5 \text{ m}$  (přesná hodnota se v konkrétním případě stanoví hydraulickým výpočtem). Pro kultivační plochu délky  $L = 50 \text{ m}$  a sklon  $\sin \alpha = 0,03$  dostaneme  $H_{\min} = L \sin \alpha = 1,5 \text{ m}$  a tudíž  $H/H_{\min} = 3,33$ . Vezmeme-li střední hodnotu hustoty zkrápění kultivační plochy  $\Gamma = 3 \text{ l} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , pak z rovnice (10) pro  $\eta = 0,5$  a  $\varphi = 4,91 \text{ kg O}_2/\text{kWh}$  (tabulka 2) dostaneme  $\varphi' = 1,11 \text{ kg O}_2/\text{kWh}$ .

Přehled výkonnosti aerace v různých reaktorech je v tabulce 3 a rychlost přestupu kyslíku u různých zařízení uvádí tabulka 4. Porovnáním hodnot  $R_m$  z tabulky 2 a 4 vidíme, že rychlost přestupu



Tabulka 3. Výkonnost aerace v různých reaktorech [12]

Typ reaktoru	Výkonnost aerace ( $\text{kg O}_2 \cdot \text{kWh}^{-1}$ )
Mamutkový typ	1,2 - 2,0
Bublaná kolona	0,8 - 2,4
Míchací reaktor	1,2 - 2,4
Jet - loop reaktor	4 - 6
Jet - loop reaktor	1,4 - 1,7
Fermentor Le Francois	1,7
Fermentor Vogelbusch	1,1 - 1,7
Samonasávající aerátor	
Heinrich - Fring	1,7
Tubulární fermentor se smyčkou	0,2 - 0,6
Airlift fermentor	0,7 - 1,2
Ejektorový fermentor se smyčkou	1,0 - 2,5

Tabulka 4. Rychlost přestupu kyslíku v různých zařízeních [13]

Systém větrání	Využití vzduchu (%)	Přestup kyslíku ( $\text{kg O}_2 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ )
Dirkované trubky /Strauch a Schmidt/	3 - 9	1,28 - 1,60
Keramické větrání bez míchání /Stich/	20 - 40	1,28 - 3,84
Emulzní větrání /Waldhof/	80	8 - 9,6
Větrání turbomíchadlem	10 - 50	2,56 - 11,52

kyslíku na kultivační ploše je nižší než u vzdušných jiných zařízení. Výše vypočtená výkonnost aerace  $\varphi' = 1,11 \text{ kg O}_2/\text{kWh}$  pro kultivační plochu je porovnatelná s výkonností aerace u mnoha reaktorů uvedených v tabulce 3.

Odhadněme rychlost produkce biomasy AM na kultivační ploše. Pro  $I' = 3 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$  nalezneme v tabulce 2  $R_m = 0,834 \text{ kg O}_2 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ . Naroste-li 1,2 kg biomasy z 1 kg asimilovaného kyslíku [14], pak v 1 m<sup>3</sup> suspenze za 1 h naroste 1 kg biomasy. Na kultivační ploše o velikosti 250 m<sup>2</sup> při tloušťce vrstvy suspenze 0,52 cm (tabulka 2) se nachází 1,3 m<sup>3</sup> suspenze. Za 24 hodin provozu se naprodukuje 31,2 kg biomasy, což představuje 124,8 g biomasy na 1 m<sup>2</sup> za 24 h.

Aerace suspenze AM na kultivační ploše se dosahuje přestupem kyslíku ze vzduchu bez dalších pomocných zařízení. K recirkulaci suspenze je využito odstředivé čerpadlo, odpadá potřeba kompresoru či míchadla jako u fermentací, což činí kultivaci nenáročnou a spolehlivou. Další možností je využití dodatečného syčení suspenze kyslíkem v míchaném absorberu či jiném syčícím zařízení, používaném pro rozpouštění CO<sub>2</sub> v suspenzi řas.

#### Použité symboly

A	— velikost kultivační plochy	(m <sup>2</sup> )
C	— koncentrace rozpuštěného kyslíku uvnitř suspenze	(kg · m <sup>-3</sup> )
C <sub>s</sub>	— koncentrace rozpuštěného kyslíku na fázovém rozhraní vzduch-suspenze	(kg · m <sup>-3</sup> )
D	— součinitel difuze kyslíku v suspenzi	(m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> )
E	— příkon čerpadla	(kW)

g	— gravitační zrychlení	(m · s <sup>-2</sup> )
h	— tloušťka suspenze na kultivační ploše	(m)
H	— dopravní výška čerpadla	(m)
H <sub>min</sub>	— rozdíl výšek mezi horním a spodním okrajem kultivační plochy	(m)
K <sub>L</sub>	— součinitel přestupu kyslíku ze vzduchu do suspenze	(m · s <sup>-1</sup> )
L	— délka kultivační plochy	(m)
n	— součinitel drsnosti	(s · m <sup>-1/3</sup> )
S <sub>c</sub> = $\nu/D$	— Schmidtovo číslo	(—)
R	— rychlost přestupu kyslíku	(kg O <sub>2</sub> · m <sup>-3</sup> · s <sup>-1</sup> )
R <sub>m</sub>	— oxygenační kapacita	(kg O <sub>2</sub> · m <sup>-3</sup> · s <sup>-1</sup> )
u	— střední rychlost suspenze na kultivační ploše	(m · s <sup>-1</sup> )
V	— objem suspenze na kultivační ploše	(m <sup>3</sup> )
sin α	— sklon kultivační plochy	(—)
I'	— lineární rychlost zkrácení kultivační plochy	(m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> )
ε	— rychlost disipace energie na jednotku hmotnosti suspenze nacházející se na kultivační ploše	(m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> )
ε'	— rychlost disipace energie na jednotku hmotnosti suspenze při čerpání	(m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> )
η	— celková účinnost čerpacího zařízení	(—)
ρ	— hustota suspenze	(kg · m <sup>-3</sup> )
ν	— kinematická viskozita suspenze	(m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> )
φ	— výkonnost aeračního zařízení	(kg O <sub>2</sub> · kWh <sup>-1</sup> )
φ'	— reálná výkonnost aeračního zařízení	(kg O <sub>2</sub> · kWh <sup>-1</sup> )

#### Literatura

- [1] BURLEW J. S. Ed.: Algal Culture from Laboratory to Pilot Plant. Carnegie Institute, Washington, DC, 1953.
- [2] SHELEF G., SOEDER C. J. Eds.: Algal Biomass, Production and Use. Elsevier, Amsterdam 1980.
- [3] BOROWITZKA M. A., BOROWITZKA L. J.: Micro - Algal Biotechnology. Cambridge University Press, Cambridge 1988.
- [4] ŠETLÍK I., ŠUST V., MÁLEK I.: Algol. Stud. Třeboň 1, 1970, s. 111.
- [5] ŠTÍCHA V., BULÍČEK J., HÁLA Z.: Odvádění a čištění odpadních vod ze sídlišť. SNTL Praha 1970.
- [6] DOWNING A. L.: J. Inst. Public Health Engrs. 1960.
- [7] WILSON G. T., MACLEOD N.: Water Research 8, 1974, s. 341.
- [8] THYSEN N., et al.: Int. Rev. Ges. Hydrobiol. 72, 1987, s. 405.
- [9] RISSE F. U., WEILAND P., ONKEN U.: Ger. Chem. Eng. 9, 1986, s. 107.
- [10] SMETANA J.: Hydraulika 1., ČSAV, Praha 1957.
- [11] MÍKA V., NEUŽIL L., VLČEK J.: Sběrka příkladů z chemického inženýrství. SNTL Praha 1981.
- [12] MORESI M., GIANTURCO G. B., SEBASTIANI E.: Biotechnol. Bioeng. 25, 1983, s. 2889.
- [13] GRÉGR V.: Základy výroby kvasničných bílkovin. Slovenská spoločnosť pro racionálnu výživu. Bratislava 1965.
- [14] RYDER D. N., SINCLAIR C. C.: Biotechnol. Bioeng. 14, 1972, s. 787.

**Livánský, K. - Kajan, M.: Posouzení možností pěstování aerobních mikroorganismů v suspenzi stékající po skloněné kultivační ploše.** Kvas. prům., **35**, 1989, č. 8—9, s. 239—242.

Další možností jak využít v mimovegetační sezóně venkovních kultivačních ploch určených původně pro pěstování řas je pěstování aerobních mikroorganismů. To předpokládá v nepříznivých klimatických podmínkách přehřívání suspenze těchto mikroorganismů, např. odpadním nízkopotenciálním teplem. Z provedených výpočtů plyne, že rychlost přestupu kyslíku ze vzduchu do suspenze mikroorganismů na kultivační ploše je nižší než u fermentací s různými způsoby vzdušnění. Výkonost aerace v suspenzi na kultivační ploše je však srovnatelná s mnoha jinými typy aerace používanými ve fermentacích.

**Ливански, К. - Каян, М.: Обсуждение возможности выращивания аэробных микроорганизмов в суспензии, стекающей по наклонной плоскости культивирования.** Квас. prům., **35**, 1989, № 8—9, стр. 239—242.

Одной из возможностей использования в вневегетационный сезон культивационных площадей, назначенных для выращивания водорослей является выращивание аэробных микроорганизмов. В неблагоприятных климатических условиях предполагается добавочный обогрев суспензии этих микроорганизмов напр. отходным низкопотенциальным теплом. Из проведенных расчетов вытекает, что скорость передачи кислорода из воздуха в суспензию микроорганизмов на площади культивирования ниже чем в случае ферментации с разными способами аэрации. Эффективность аэрации в суспензии на культивационной плоскости однако сравнима с многими другими типами аэрации, применяющимися в ферментациях.

**Livánský, K. - Kajan, M.: Evaluation of Cultivation of Aerobic Microorganisms in Suspension Flowing Down on Inclined Plane.** Kvas. prům., **35**, 1989, No. 8—9, pp. 239—242.

The cultivation of aerobic microorganisms on external cultivation planes that are in the vegetative season utilized for the cultivation of algae is described. Under unsuitable climatic conditions the microbial suspension has to be heated, e. g. by the low potential waste heat. From the calculations follow that the oxygen transfer rate into the microbial suspension is lower on the cultivation plane in comparison to that achieved in submerged cultivations performed in aerated bioreactors. However, the achieved oxygen transfer rate can be compared with many other aeration types used in fermentations.

**Livánský, K. - Kajan, M.: Studium der Möglichkeit der Kultivation aerober Mikroorganismen in Suspensionen, die über geneigte Kultivationsflächen herabfließen.** Kvas. prům., **35**, 1989, Nr. 8—9, S. 239—242.

Die zur Algenkultivation bestimmten Kultivationsflächen im Freien können in der vegetationsfreien Saison auch zur Kultivation aerober Mikroorganismen ausgenutzt werden. Dies setzt in ungünstigen klimatischen Bedingungen die Vorwärmung der Mikroorganismen-Suspension voraus, z. B. mittels Abfall-Niederpotentialwärme. Die durchgeführten Berechnungen bestätigten, daß die Geschwindigkeit der Sauerstoffübertragung aus der Luft in die Suspension der Mikroorganismen auf der Kultivationsfläche niedriger ist als bei Fermentationen mit verschiedenen Belüftungsverfahren. Die Wirksamkeit der Aeration in der Suspension auf der Kultivationsfläche ist jedoch mit vielen anderen bei Fermentationen angewandten Aerationstypen vergleichbar.