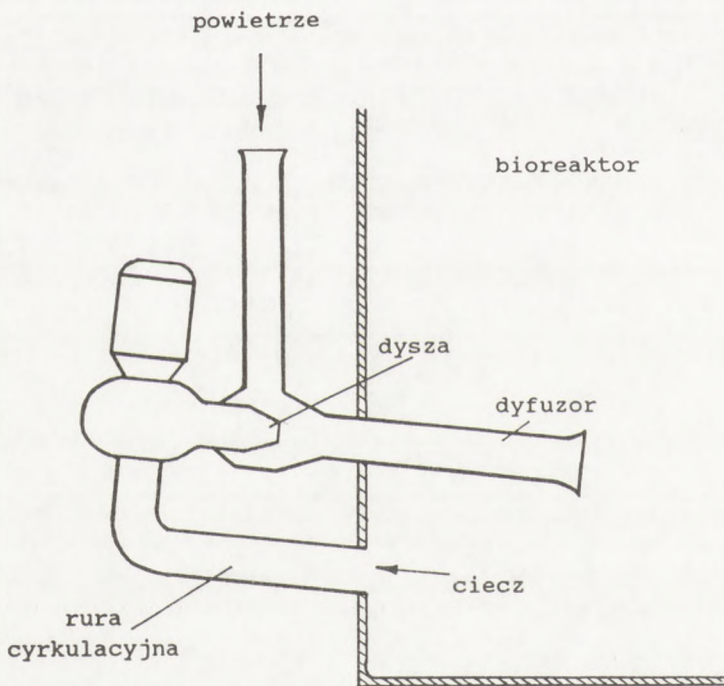


Energetyczne aspekty natleniania dużych objętości wody na przykładzie napowietrzacza Venturiego

Grzegorz Rogacki
Wydział Inżynierii Procesowej
i Ochrony Środowiska
Politechnika Łódzka
Łódź

1. Wstęp

W napowietrzaczu (aeratorze) Venturiego (rys. 1) tłoczenie powietrza, generowanie pęcherzyków i mieszanie realizuje się w urządzeniu o zwartej i prostej budowie. Jego zdolność do mieszania umożliwia obsługę reaktorów o dużych objętościach rzędu setek lub tysięcy metrów sześciennych (oczyszczalnie ścieków), a zwarta konstrukcja umożliwia szybki transport i użycie do interwencyjnego napowietrzania naturalnych zbiorników wodnych (katastrofy ekologiczne).



Rys. 1. Schemat napowietrzacza Venturiego.

2. Współczynnik wnikania masy

Warunki wnikania tlenu dla napowietrzacza Venturiego zbadano na drodze eksperymentalnej w małej i dużej skali [1]. W małej skali użyto zbiornika cylindrycznego o objętości $0,58 \text{ m}^3$ oraz dwóch zbiorników prostopadłościanowych o objętości $0,37 \text{ m}^3$ i $0,77 \text{ m}^3$. W dużej skali użyto dwóch zbiorników cylindrycznych (355 m^3 i 430 m^3). Odpowiednio do skali zbiornika zmieniano również wielkość aeratora. Pomiary wykonywano w wodzie wodociągowej metodą stanu nieustalonego [2]. Wodę odtleniano przedmuchując azotem. W małej skali wykonano około dwieście pomiarów, a w dużej osiemdziesiąt pięć.

Przy stałych parametrach napowietrzania równanie bilansowe

$$\frac{dC}{dt} = k_{LA} (C_s - C) \quad (1)$$

daje prostą zależność stężenia tlenu w wodzie od czasu:

$$\begin{aligned} t \leq t_0 & \quad C = C_0 \\ t > t_0 & \quad C = C_s - (C_s - C_0) \exp[-k_{LA}(t - t_0)] \end{aligned} \quad (2)$$

Na podstawie odpowiedzi sondy tlenowej (t_i, C_i) współczynnik k_{LA} identyfikowano na drodze optymalizacji nieliniowej

$$\begin{aligned} \text{MIN} \{ & [C_i - C(t_i, t_0, C_0, C_s, k_{LA})] \\ & t_0, C_0, C_s, k_{LA} \} \end{aligned} \quad (3)$$

Wartość k_{LA} jako zależną od temperatury wody korygowano do standardowej temperatury 20°C wg formuły:

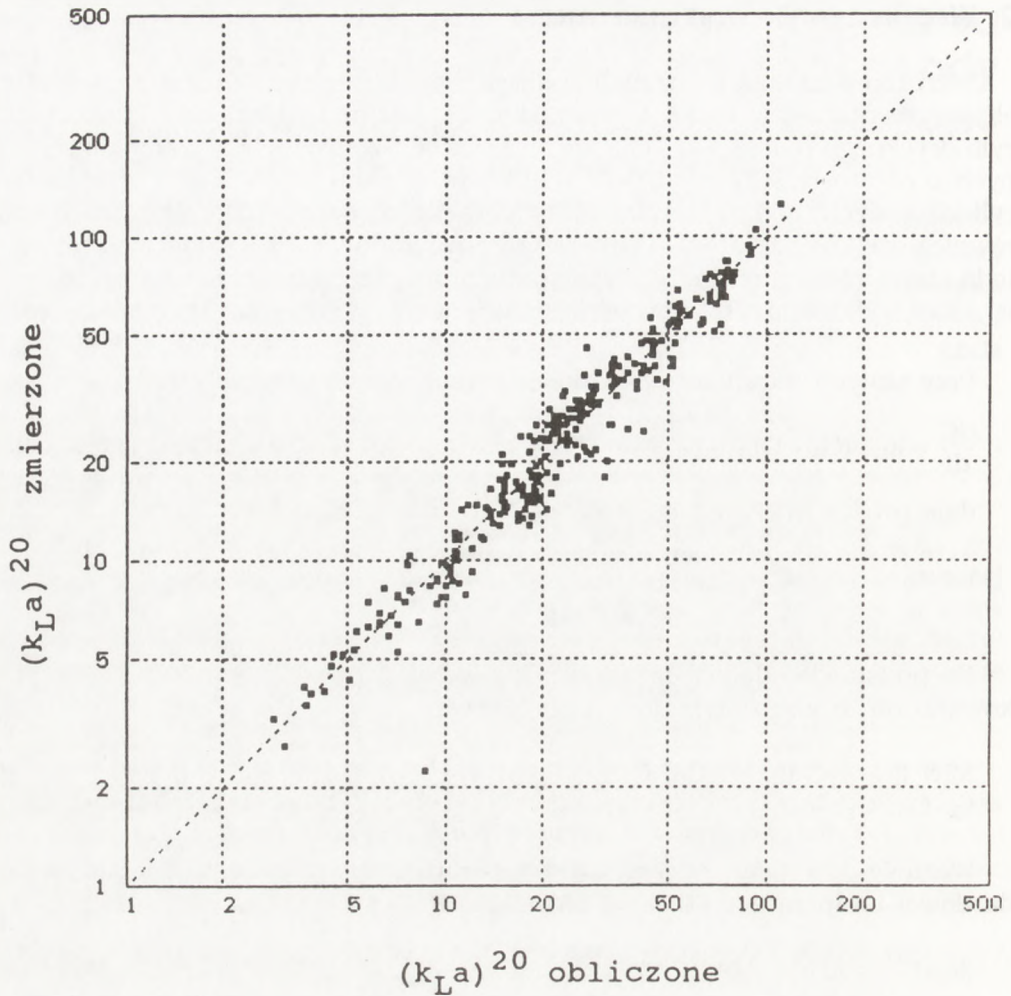
$$(k_{LA})^{20} = k_{LA} 1,024^{(20 - T_w)} \quad (4)$$

Dla aeratora Venturiego jako intensywnie mieszającego założono, że współczynnik wnikania k_{LA} będzie zależał od całkowitego zużycia energii mechanicznej odniesionej do jednostki objętości cieczy w reaktorze (Q/V) i od pozornej liniowej prędkości powietrza v_{sa} [3]

$$k_{LA} = Z (Q/V)^\alpha v_{sa}^\beta \quad (5)$$

Całkowitą moc mechaniczną Q obliczano jako sumę energii zużywanej na tłoczenie powietrza Q_a i energii zużywanej na cyrkulację wody Q_w . Wartości Q_a obliczano na podstawie natężenia przepływu powietrza i spadku ciśnienia przyjmując adiabatyczny model sprężania, natomiast moc Q_w na podstawie natężenia przepływu wody i spadku ciśnienia.

Analiza statystyczna wyników [4] dała wspólne dla małej i dużej skali równania regresji (rys. 2) w postaci



Rys. 2. Porównanie wartości zmierzonych k_{La} z obliczonymi wg uzyskanej korelacji.

$$(k_{La})^{20} = 35,5 (Q/V)^{0,52} v_{sa}^{0,50} \quad (6)$$

dla zakresów: $(Q/V) = (10 - 1300) \text{ W/m}^3$, $v_{sa} = (0,2 - 20) \text{ mm/s}$, $V = (0,5 - 400) \text{ m}^3$. Wartości współczynnika wnikania masy w tych warunkach wynoszą $(k_{La})^{20} = (2 - 200) \text{ 1/h}$.

3. Efektywność napowietrzania

Współczynnik wnikania masy nie określa efektywności procesu.

Producenci urządzeń napowietrzających posługują się wskaźnikiem typu sprawnościowego

$$Ox_{eff} = \frac{\text{ilość rozpuszczonego tlenu}}{\text{ilość zużytej energii}} \quad (7)$$

Wskaźnik ten nie niesie jednak informacji o szybkości natleniania i w skrajnym przypadku (np. napowietrzanie naturalne) tak zdefiniowana sprawność może okazać się nieskończenie dobra. Dla uniknięcia paradoksu należy wprowadzić drugi wskaźnik określający szybkość przenoszenia tlenu

$$Ox_{rate} = \frac{\text{ilość rozpuszczonego tlenu}}{(\text{objętość wody}) (\text{czas napowietrzania})} \quad (8)$$

Efektywność procesu można teraz wyrazić jako punkt we współrzędnych ($Ox_{rate} - Ox_{eff}$) [1]. Z dwóch procesów bardziej efektywny jest ten, który przy tej samej szybkości natleniania (Ox_{rate}) ma większy wskaźnik sprawności (Ox_{eff}) lub ten, który przy tej samej sprawności ma większy wskaźnik szybkości. Jeśli w zamian za wzrost szybkości natleniania o 1% zgodzimy się na utratę p% sprawności to możliwe jest wytyczenie linii „stałej efektywności” o hiperbolicznym przebiegu.

$$Ox_{eff} = (1/Ox_{rate})^p + \text{const} \quad (9)$$

Wyznaczenie wskaźników Ox_{eff} i Ox_{rate} w rzeczywistych warunkach (np. fermentacja osadu czynnego) jest bardzo trudne, gdyż wnikanie tlenu przebiega w warunkach absorpcji z towarzyszącą reakcją (bio-)chemiczną. Z tego względu stosuje się uproszczenia. Na przykład norma ASCE zaleca wskaźnik SORT (*Standard Oxygen Transfer Rate*):

$$\text{SORT} = (k_L a)^{20} C_s^{20} V \quad (10)$$

Nadmierne uproszczenie tego wskaźnika może w pewnych przypadkach sugerować sprawność lepszą niż 100%. Paradoks ten eliminuje model uwzględniający spadek stężenia tlenu w pęcherzyku podczas jego unoszenia się. Wówczas szybkość natleniania można obliczyć na podstawie współczynnika wnikania masy $k_L a$ i elementarnych parametrów prowadzenia procesu:

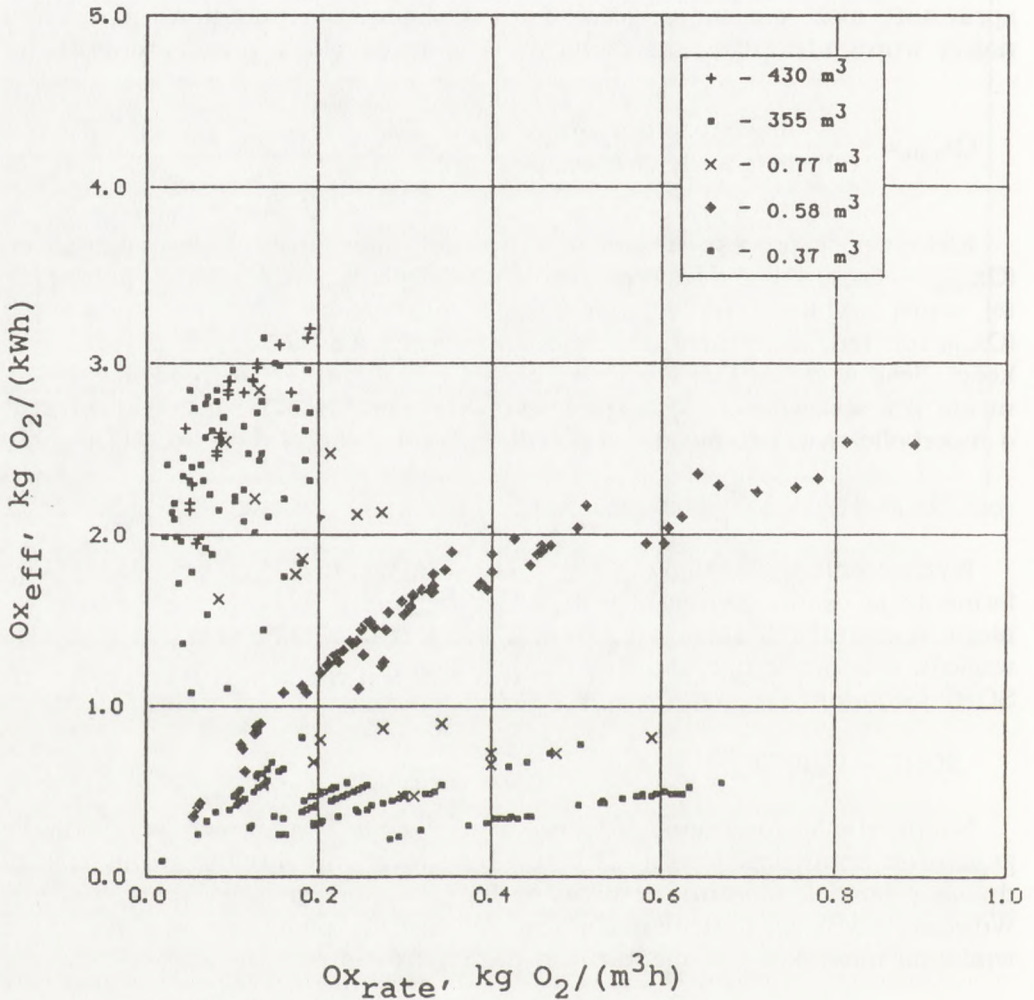
$$Ox_{rate} = \frac{F_a \rho_a Y_{ox}}{A_t h_w} [1 - \exp(-\xi h_w)] \quad (11)$$

gdzie:

$$\xi = \frac{k_L a A_t C_s}{F_a \rho_a Y_{ox}} \quad (12)$$

Wyniki eksperymentów przedstawione w układzie ($Ox_{eff} - Ox_{rate}$) prowadzą do wniosku, że w małej skali sprawność natleniania jest mała natomiast w dużej skali jest większa, ale przy małych szybkościach natleniania (rys. 3).

W celu porównania efektywności natleniania aeratora Venturiego z innymi metodami wykonano eksperyment z dyfuzorem ze spieku ceramicznego

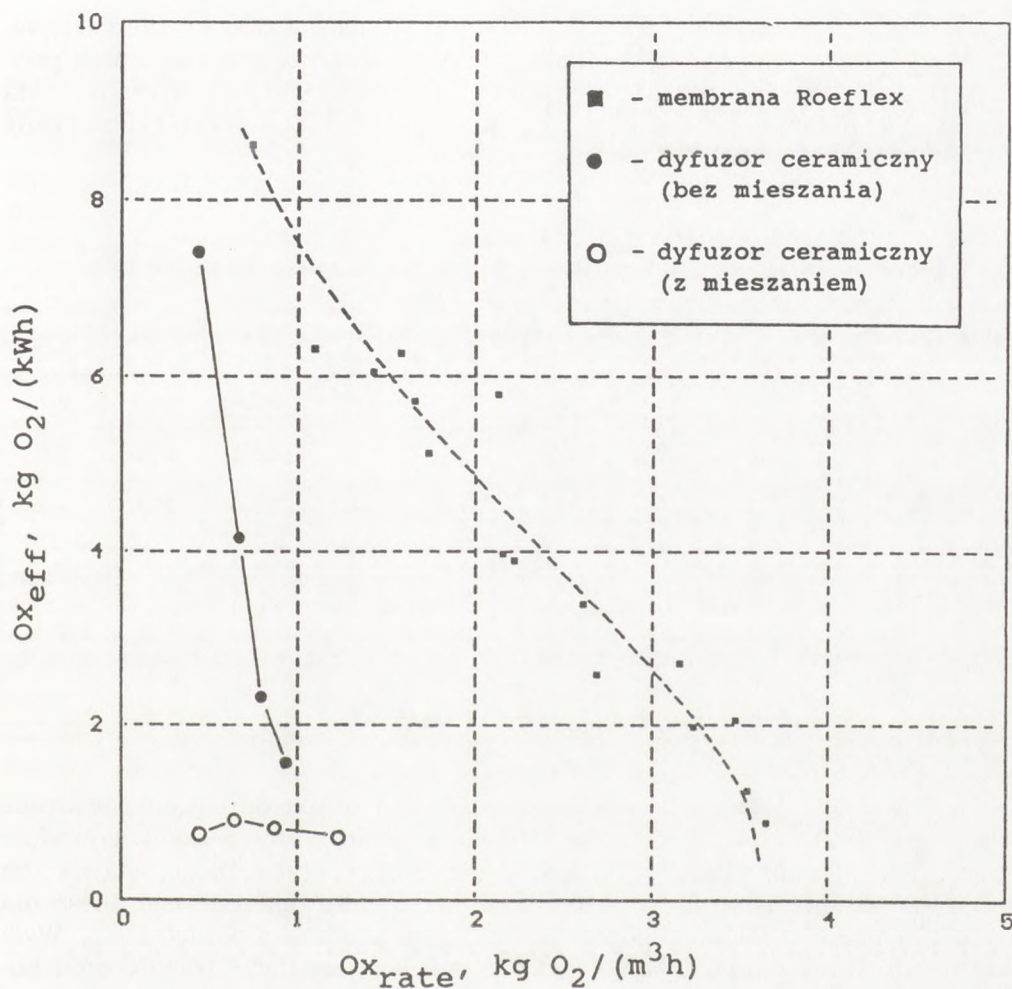


Rys. 3. Sprawność natleniania w funkcji szybkości natleniania dla aeratora Venturiego.

i membraną gumową (Roeflex™.) Dla zbadania wpływu mieszania na efektywność natleniania eksperyment z dyfuzorem ceramicznym wykonano w wersji z i bez dodatkowego mieszania. Eksperymenty wykonano w małej skali (0,1 – 0,5 m³). Wyniki przedstawione na wykresie w układzie (Ox_{eff} — Ox_{rate}) (rys. 4) prowadzą do następujących wniosków:

— dla małych wartości Ox_{rate} napowietrzanie bez mieszania jest znacznie bardziej efektywne,

— dla bardzo dużych wartości Ox_{rate} różnice w sprawności bez — i z mieszaniem zanikają.



Rys. 4. Sprawność natleniania w funkcji szybkości natleniania dla dyfuzora ceramicznego i membrany Roeflex.

4. Obliczenia symulacyjne na modelu

Dysponując wiarygodnym modelem wnikania masy w postaci równania (6) przeprowadzono obliczenia symulacyjne o charakterze optymalizacyjnym. Dla uproszczenia obliczeń symulacje przeprowadzono w oparciu o następujące założenia:

- model wnikania masy ma postać i parametry identyczne z modelem wnikania masy dla aeratora Venturiego,

- energia na tłoczenie powietrza zużywana jest wyłącznie na pokonanie ciśnienia hydrostatycznego,

- pewna ilość energii mechanicznej może być dodana do układu w formie mieszania,

- droga pęcherzyków powietrza równa jest wysokości cieczy w bioreaktorze.

W przeprowadzonych obliczeniach zbadano całkowite zużycie energii podczas napowietrzania arbitralnie przyjętej objętości (100 m^3) wody ze stałą szybkością natleniania $O_{x\text{rate}} = 0,2 \text{ kg O}_2/(\text{m}^3\text{h})$. Założono cylindryczny kształt bioreaktora. Wyniki przedstawiono w tab. 1.

TABELA 1
SYMULACJA NAPONOWIETRZANIA 100 m^3 WODY PRZY SZYBKOŚCI NATLENIANIA $0,2 \text{ kg O}_2/(\text{m}^3\text{h})$

Wariant	h_w m	D m	F_a m^3/h	Q_a kW	Q_{mix} kW	Q_{tot} kW	k_{La} h^{-1}	$\%_{\text{trsf}}$ %	v_{sa} mm/s
A	5	5,05	483	5,62	0	5,62	23,6	16,4	6,7
B	10	3,57	273	5,62	0	5,62	25,1	29,0	7,6
C	5	5,5	309	3,60	6,0	9,60	25,0	25,6	4,3
gdzie:	h_w — wysokość cieczy w reaktorze, m; D — średnica reaktora, m; F_a — objętościowe natężenie powietrza, m^3/h ; Q_a — moc tłoczenia powietrza, kW; Q_{mix} — moc na dodatkowe mieszanie, kW; Q_{tot} — całkowita moc napowietrzania ($Q_a + Q_{\text{mix}}$), kW; k_{La} — objętościowy wsp. wnikania masy, h^{-1} ; $\%_{\text{trsf}}$ — procent wykorzystywania tlenu, %; v_{sa} — liniowa pozorna prędkość powietrza, mm/s.								

Jeśli wariant A ($h_w = 5 \text{ m}$) potraktować jako punkt odniesienia wówczas dla wariantu B ($h_w = 10 \text{ m}$) wzrasta procent wykorzystania tlenu. Powoduje to spadek siły napędowej wymiany masy. Wobec stałej $O_{x\text{rate}}$ spadek ten musi być skompensowany wzrostem k_{La} . Przy braku dodatkowego mieszania wzrost k_{La} można osiągnąć poprzez zwiększenie prędkości powietrza v_{sa} . Wyższy reaktor przy tej samej objętości ma mniejszą średnicę dzięki czemu konieczną większą prędkość v_{sa} można osiągnąć przy mniejszym objętościowym natężeniu przepływu powietrza F_a . Tę mniejszą ilość powietrza należy tłoczyć pokonując większe ciśnienie hydrostatyczne. W rezultacie całkowite zużycie

energii (Q_{tot}) w wariancie B jest praktycznie takie samo jak w wariancie A. Oznacza to, że zmiana geometrii reaktora ma znikomy wpływ na efektywność napowietrzania. Wariant C zakłada, że do układu doprowadzone jest dodatkowo 6 kW energii mechanicznej w postaci mieszania. Mieszanie to powoduje wzrost wartości współczynnika k_{La} , w wyniku czego zmniejsza się zapotrzebowanie na powietrze, a tym samym na energię tłoczenia. Jednak spadek ten nie kompensuje wydatku energii na mieszanie i całkowite zapotrzebowanie na energię (Q_{tot}) w tym wariancie jest większe niż w tym bez mieszania.

5. Wnioski

Na podstawie eksperymentu wykazano, że dla aeratora Venturiego korelacja między współczynnikiem wnikania masy k_{La} a całkowitym zużyciem energii mechanicznej w jednostce objętości cieczy (Q/V) i pozorną liniową prędkością powietrza v_{sa} nie zależy od skali.

Z faktu, że mieszanie obniża efektywność natleniania wynika, że aerator Venturiego, w którym mieszanie jest nieodłączne od procesu wytwarzania pęcherzyków w żadnych warunkach nie będzie tak efektywny jak napowietrzacz typu dyfuzor, zwłaszcza jeśli pokrywa on całe dno bioreaktora.

Ze względu na prostą konstrukcję aeratora Venturiego wydaje się, że może on konkurować z aeratorami typu dyfuzor, gdyż te ostatnie wymagają znacznie większych kosztów zarówno inwestycyjnych jak i związanych z nadzorem i konserwacją.

Małe wymiary aeratora Venturiego w stosunku do objętości cieczy, które może obsłużyć czynią go idealnym urządzeniem do interwencyjnego napowietrzania naturalnych zbiorników wodnych.

Wykaz oznaczeń

A_t — pole poprzecznego przekroju bioreaktora, m^2 ; C — stężenie tlenu w wodzie, kg/m^3 ; F — objętościowe natężenie przepływu, m^3/s ; h_w — wysokość cieczy w bioreaktorze, m ; k_{La} — objętościowy współczynnik wnikania masy, $1/h$; Ox_{eff} — sprawność natleniania, $kg O_2/kWh$; Ox_{rate} — szybkość natleniania, $kg O_2/(m^3h)$; Q — moc, W ; t — czas napowietrzania, h , (s); V — objętość cieczy w bioreaktorze, m^3 ; v_{sa} — pozorną liniową prędkość powietrza (F_a/A_t), m/s ; Y_{Ox} — ułamek masowy tlenu w powietrzu, [-]; ρ_a — gęstość powietrza, kg/m^3 ;

Indeksy:

a — powietrze; s — nasycone; w — woda.

Literatura

1. Rogacki G., (1992), Oxygen Transfer and Efficiency of Venturi Aerator, EA Technology Report, Capenhurst, UK.
2. American Society of Civil Engineers, (1984), ASCE Standard for Measurement of Oxygen Transfer in Clean Water, ed. ASCE, New York, USA.
3. Kawase Y., Moo-Young, M., (1988), Volumetric Mass Transfer Coefficient in Aerated Stirred Tank Reactors with Newtonian and Non-Newtonian Media, Chem. Eng. Res. Des., 66, 284 – 288.
4. Ryan B. F., Joiner B. L., Ryan T. A., (1985), MINITAB Handbook, Duxbury Press, Boston, USA.

The energy aspects of oxygenation of vast volumes of water during Venturi aeration

Summary

Venturi aeration is a promising technique, where air aspiration, bubble generation and the bioreactor content stirring are performed in a very simple and compact piece of equipment. It is applicable especially in biological effluent treatment and emergency aeration of natural water reservoirs.

In the paper a model of mass transfer in clean water for Venturi aeration in tanks of scale from 0,5 to 400 cubic meters is presented. The model has the form of a correlation of volumetric mass transfer coefficient with total energy consumption per liquid volume and superficial air velocity.

The efficiency problem of the aerator on the basis of the author's definitions of oxygenation rate and oxygenate efficiency is discussed.

key words:

water aeration, aeration efficiency, Venturi aerator.

Adres dla korespondencji:

Grzegorz Rogacki, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska Katedra Inżynierii Bioprocessowej, ul. Wólczańska 175, 90-924 Łódź.