

# Wpływ immobilizacji bakterii na szybkość rozkładu organicznych związków węglowych

Irena Wojnowska-Baryła  
Akademia Rolniczo-Techniczna  
Olsztyn

## 1. Wstęp

W ostatnich latach prowadzono szereg badań nad zastosowaniem immobilizowanych mikroorganizmów w oczyszczaniu ścieków oraz w procesach odnowy wody. Nilsson i in. (1) zastosowali do usuwania azotanów z wody pitnej *Pseudomonas denitrificans* inkludowane w żelu alginianowym. Tam i in. (2) zastosowali immobilizowane glony *Chlorella vulgaris* do usuwania fosforu ze ścieków. Badania nad wykorzystaniem bakterii immobilizowanych metodą inkluzji w procesach nityfikacji prowadzili między innymi Tramper, Grootjen (3), Wijffels i in. (4). Deguchi, Kashiwaya (4) wykorzystali w procesach nityfikacji biomasę bakterii unieruchomioną na poliuretanie.

O praktycznym wykorzystaniu immobilizowanych mikroorganizmów do biodegradacji decyduje aktywność enzymatyczna immobilizowanej biomasy oraz szybkość rozkładu organicznych związków węglowych. W procesach biodegradacji z zastosowaniem immobilizowanych bakterii na całkowitą szybkość rozkładu związków organicznych wpływa tempo procesów cząstkowych, tj. dyfuzji zewnętrznej i wewnętrznej oraz reakcji biochemicznej (6). Parametry cząstkowych równań szybkości reakcji rozkładu nie zawsze jednoznacznie wskazują na charakter ograniczeń całkowitej szybkości tej reakcji. Stąd konieczność wyznaczenia wartości stałych wskazujących na wzajemne zależności między parametrami równań cząstkowych procesu rozkładu. W tym celu dla układów heterogenicznych można zastosować liczbę Damkohlera, moduł Thiela i liczbę Biota, które pozwalają na interpretację wpływu procesów przenoszenia masy i szybkości reakcji biochemicznej na całkowitą szybkość rozkładu substratu.

Wykorzystanie immobilizowanych biokatalizatorów w procesach uzdatniania wody i oczyszczania ścieków wymaga przyjęcia sposobu obliczania szybkości rozkładu związków organicznych i charakteryzowania immobilizowanych

biokatalizatorów na podstawie uzyskanych parametrów równań szybkości rozkładu związków organicznych.

Celem pracy było przeprowadzenie analizy wpływu immobilizacji bakterii metodą inkluzji na szybkość rozkładu związków organicznych w warunkach nieprzepływowym.

W badaniach wykorzystano wolne i inkludowane w alginianie bakterie *Pseudomonas* sp. 190 i 191 oraz *Alcaligenes* sp. T-186 zdolne do rozkładu laktozy, kazeiny i tłuszczu mlekowego. Na podstawie wyników badań rozkładu związków organicznych przez immobilizowane bakterie *Pseudomonas* sp. 190 i 191 oraz *Alcaligenes* sp. T-186 wyznaczono parametry równań cząstkowych ( $K_m$ ,  $r_{max}$ ,  $k_{L2}$ ,  $C_s$ ,  $D_{ef}$ ,  $C^*$ ) składających się na całkowitą szybkość rozkładu związków organicznych przez immobilizowane bakterie. Określono również wpływ procesów przenoszenia masy na całkowitą szybkość rozkładu przy zastosowaniu jako kryterium liczby Damkohlera, modułu Thiela, współczynnika efektywności oraz współczynnika wykorzystania katalizatora.

## 2. Metodyka badań

Inoculum szczepów bakterii: *Pseudomonas* sp. 190, *Pseudomonas* sp. 191 oraz *Alcaligenes* sp. T-186 uzyskano przez 3-krotne pasażowanie szczepów na pożywkę bulionowej z dodatkiem 4% glukozy w temp. 30°C przez 18 h. Hodowlę biomasy bakterii prowadzono dodając do 100 cm<sup>3</sup> pożywki bulionowej z dodatkiem 4% glukozy inoculum w ilości 1 cm<sup>3</sup>, a następnie inkubując w temp. 30°C przez 18 h. Biomase bakterii oddzielano od pożywki przez wirowanie przy 15 tys. obr./min/0°C i przechowywano w wodzie jałowej w temperaturze 4°C.

Zmieszana w stosunku objętościowym 1:1:1 biomase bakterii *Pseudomonas* sp. 190, *Pseudomonas* sp. 191 i *Alcaligenes* sp. T-186 łączono z 2% roztworem alginianu sodowego firmy Sigma o lepkości 2% roztworu w temp. 25°C wynoszącej 3500 cps, a następnie utwardzano przez wstrzykiwanie do 0,02 M roztworu CaCl<sub>2</sub>, uzyskując ziarna o średnicy 2 mm. W celu zwiększenia mechanicznej wytrzymałości nośnika, ziarna alginianowe z inkludowaną biomasą bakterii przetrzymywano przez 2 h w roztworze CaCl<sub>2</sub>. Stężenie inkludowanej biomasy w ziarnach alginianowych wynosiło 1,25%.

Do badań zastosowano reaktory napowietrzane dyfuzorami, działające w sposób okresowy, o pojemności użytkowej 2 dm<sup>3</sup>. Stężenie tlenu rozpuszczalnego w reaktorze wynosiło 2 mg O<sub>2</sub>/dm<sup>3</sup>. Badania prowadzono w czterech seriach pomiarowych dla założonych stężeń początkowych związków organicznych wyrażonych wartością ChZT, wynoszących: 170, 400, 700, 1000 mg O<sub>2</sub>/dm<sup>3</sup>.

Stężenie początkowe wolnych i immobilizowanych bakterii w reaktorach w badanych seriach było stałe i wynosiło 1,25 g sm/dm<sup>3</sup>. Badania prowadzono równolegle w dwóch reaktorach, zawierających:

— immobilizowane w alginianie komórki *Pseudomonas* sp. 190 i 191 oraz *Alcaligenes* sp. T-186,

— wolne komórki *Pseudomonas* sp. 190, 191 oraz *Alcaligenes* sp. T-186.

Do badań, jako źródło węgla organicznego, wykorzystywano ścieki o następującym składzie: cukier mlekowy — 0,2 g/dm<sup>3</sup>, białka mleka — 0,2 g/dm<sup>3</sup>, tłuszcz mlekowy — 0,3 g/dm<sup>3</sup>, ChZT — 130 g O<sub>2</sub>/dm<sup>3</sup>, sucha pozostałość ogólna — 1,5 g/dm<sup>3</sup>, sucha pozostałość mineralna — 0,5 g/dm<sup>3</sup>. W zależności od badanego stężenia związków organicznych ścieki rozcieńczano wodą.

### 3. Omówienie i dyskusja wyników

W celu określenia wpływu procesów dyfuzji na szybkość rozkładu związków organicznych przez immobilizowane bakterie przeprowadzono badania technologiczne w reaktorze okresowym o pełnym wymieszaniu. Uzyskane dane odnoszono do wyników biodegradacji związków organicznych przez wolne bakterie *Pseudomonas* sp. 190 i 191 oraz *Alcaligenes* sp. T-186.

Przyjęto założenie, że szybkość reakcji  $r$  wolnych bakterii równa jest szybkości reakcji biochemicznych:

$$r = r_b = - \frac{dC}{dt} = \frac{r_{max} \cdot C_b}{K_m + C_b} \quad [1]$$

Analizując szybkości rozkładu związków organicznych przez immobilizowane bakterie rozważono następujące przypadki:

- szybkość reakcji zależy jedynie od tempa reakcji biochemicznych, wówczas wartości parametrów kinetycznych  $r_{max}$ ,  $K_m$  są równe wartościom uzyskanym przez wolne bakterie,
- procesy przenoszenia masy wpływają na zmianę wartości parametrów  $r_{max}$ ,  $K_m$ .

W tabeli 1 przedstawiono wartości parametrów kinetycznych  $r_{max}$  i  $K_m$  uzyskanych przez: wolne oraz przez immobilizowane bakterie.

TABELA 1  
PORÓWNANIE WARTOŚCI PARAMETRÓW KINETYCZNYCH  $r_{max}$ ,  $K_m$   
DLA ROZKŁADU SUBSTRATU PRZEZ WOLNE I IMMOBILIZOWANE BAKTERIE

Wolne bakterie		Immobilizowane bakterie	
$K_m$ mg O <sub>2</sub> /dm <sup>3</sup>	$r_{max}$ mg O <sub>2</sub> /h	$K_m$ mg O <sub>2</sub> /dm <sup>3</sup>	$r_{max}$ mg O <sub>2</sub> /h
840	360	1200	360

Wzrost wartości  $K_m$  wynikał z obniżenia się całkowitej szybkości reakcji. Założono zatem, że w przypadku inkludowanych w alginianie bakterii cał-

kowita szybkość reakcji mogła być ograniczona dyfuzją substratu na granicy faz. Założono, że czynnikiem ograniczającym całkowitą szybkość reakcji inkludowanych bakterii było stężenie substratu na granicy faz roztwór — nośnik  $C_s$ , a nie stężenie substratu w reaktorze  $C_b$  jak w przypadku wolnych bakterii. Stąd równanie szybkości reakcji przyjęło postać:

$$r_{ef} = r_{max} \cdot \frac{C_s}{K_m + C_s} \quad [2]$$

Porównując równania [1] i [2] obliczono wartość  $C_s$  :

$$C_s = K_m \cdot \frac{C_b}{K_{m_{poz}}} \quad [3]$$

Według Horvath, Engasser (6) wzrost wartości  $K_m$  jest następstwem ograniczeń szybkości reakcji procesami dyfuzji zewnętrznej i wewnętrznej.

Wpływ szybkości dyfuzji zewnętrznej i wewnętrznej substratu na szybkość reakcji immobilizowanych bakterii może być wyrażony wartością współczynnika efektywności. W przypadku gdy  $\eta_e$  równe jest jedności, to szybkość rozkładu kontrolowana jest przez reakcje biochemiczne. Fink i in. (7) definiują współczynnik efektywności następująco:

$$\eta_e = \frac{r_{ef}}{r} \quad [4]$$

gdzie:

$\eta_e$  — współczynnik efektywności [bezw.],

$r$  — szybkość reakcji wolnych bakterii [ $\text{mg O}_2/\text{dm}^3 \cdot \text{h}$ ],

$r_{ef}$  — szybkość reakcji immobilizowanych bakterii [ $\text{mg O}_2/\text{dm}^2 \cdot \text{h}$ ].

W tabeli 2 przedstawiono wartości współczynnika efektywności immobilizowanych bakterii.

TABELA 2  
WSPÓLCZYNNIK EFEKTYWNOŚCI REAKCJI  $\eta_e$  IMMOBILIZOWANYCH BAKTERII

Immobilizowane bakterie
0,61
0,64
0,70
0,75

Następnie, wyznaczono parametry szybkości dyfuzji zewnętrznej oraz przeprowadzono analizę wpływu procesów przenoszenia masy na szybkość rozkładu związków organicznych przez immobilizowane komórki bakterii.

Uzyskane w równaniu Michaelisa wartości stałej  $K_m$  dla związków organicznych rozkładanych przez immobilizowane bakterie są wyższe niż dla wolnych bakterii, można zatem przypuszczać, że całkowita szybkość rozkładu była ograniczona szybkością dyfuzji zewnętrznej  $r_{dz}$ .

W tym przypadku:

$$r_{ef} = r_{dz} = k_{L2} \cdot C_b \quad [5]$$

gdzie:

$$r_{ef} = \frac{r_{ef}}{A} \quad [6]$$

$r_{ef}$  — szybkość reakcji na jednostkę powierzchni ziaren nośnika [ $\text{mg O}_2/\text{dm}^2 \cdot \text{h}$ ],  
 $A$  — powierzchnia całkowita ziaren nośnika [ $\text{dm}^2$ ].

Przyjmując, że szybkość dyfuzji substratu na granicy faz roztwór — powierzchnia nośnika jest równa szybkości reakcji biochemicznej inkludowanych bakterii otrzymujemy:

$$r_{max'} \cdot \frac{C_s}{K_m + C_s} = k_{L2} \cdot (C_b - C_s) \quad [7]$$

gdzie:

$r_{max'}$  — maksymalna szybkość reakcji na jednostkę powierzchni ziarna nośnika [ $\text{mg}/\text{dm}^2 \cdot \text{h}$ ].

W tabeli 3 zestawiono wartości współczynnika przenoszenia masy  $k_{L2}$  oraz stężenia substratu na powierzchni ziarna biokatalizatora  $C_s$ .

TABELA 3  
 WYZNACZONE PARAMETRY SZYBKOSCI DYFUZJI ZEWNĘTRZNEJ:  
 WSPÓLCZYNNIK PRZENOSZENIA MASY  $k_{L2}$ , STĘŻENIE SUBSTRATU NA GRANICY FAZ  $C_s$

Immobilizowane bakterie	
$C_s$ $\text{mg O}_2/\text{dm}^3$	$k_{L2}$ $\text{dm}/\text{h}$
99,0	0,186
194,8	0,175
392,0	0,157
614,8	0,147

Do analizy wpływu dyfuzji zewnętrznej na szybkość reakcji biochemicznych zastosowano bezwymiarową wielkość — liczbę Damkohlera ( $Da$ ).

$$Da = \frac{r_{max}}{k_{L2} \cdot K_m} \quad [8]$$

gdzie:

$Da$  — liczba Damkohlera [wielkość bezwymiarowa].

Na podstawie analizy zależności między współczynnikiem efektywności a liczbą  $Da$  dla danej wartości stosunku  $C_b/K_m$ , Moser (8) wykazał, że gdy  $\eta_e = 1$  to całkowita szybkość reakcji zależy od szybkości reakcji biochemicznej. Natomiast wpływ dyfuzji zewnętrznej na całkowitą szybkość reakcji wzrasta wraz ze wzrostem liczby  $Da$  powyżej wartości liczby  $Da_{lim}$ . Wartość  $Da_{lim}$  wyznacza granicę, od której należy rozpatrywać wpływ procesów przenoszenia masy na całkowitą szybkość reakcji w układach heterogenicznych.

W doświadczeniu wyznaczono wartości liczby  $Da_{lim}$  zakładając, że dla obliczonej wartości należy rozpatrywać wpływ dyfuzji zewnętrznej na całkowitą szybkość rozkładu substratu przez immobilizowane bakterie.

$$Da_{lim} = \frac{1}{1 + Da} \quad [9]$$

W tabeli 4 przedstawiono obliczone wartości liczby  $Da$  oraz  $Da_{lim}$  dla badanych stężeń początkowych związków organicznych, wyrażonych jako stosunek  $C_b/K_m$ .

TABELA 4  
PARAMETRY OKREŚLAJĄCE WPŁYW DYFUZJI ZEWNĘTRZNEJ NA CAŁKOWITĄ SZYBKOŚĆ REAKCJI

Immobilizowane bakterie	
$Da$	$Da_{lim}$
0,770	0,560
1,370	0,420
1,530	0,400
1,710	0,370

Otrzymane wyniki pozwalają przypuszczać, że o ograniczeniach procesami dyfuzji zewnętrznej w zakresie badanych stężeń decyduje stężenie związków organicznych na granicy roztwór — powierzchnia nośnika.

Inkluzja bakterii wewnątrz nośnika powoduje, że cząsteczki muszą dyfundować w porach nośnika, by być dostępnymi do rozkładu. Stężenie zwią-

ków organicznych wewnątrz nośnika decyduje o szybkości reakcji biochemicznych bakterii inkludowanych. W celu wyznaczenia stężenia związków organicznych w masie ziarna alginianowego z inkludowaną biomasa bakterii wykorzystano następujące równanie:

$$D_{eff} \cdot \frac{d^2 C^*}{dx^2} = \frac{r_{max'} \cdot C^*}{K_m + C^*} \quad [10]$$

gdzie:

$C^*$  — stężenie substratu w ziarnie biokatalizatora [ $\text{mg O}_2/\text{dm}^3$ ],

$D_{eff}$  — współczynnik dyfuzji wewnętrznej [ $\text{cm}^2/\text{s}$ ],

$r_{max'}$  — maksymalna szybkość reakcji przypadająca na jednostkę objętości ziarna [ $\text{mg O}_2/\text{dm}^3 \cdot \text{h}$ ],

$x$  — odległość od powierzchni ziarna [mm].

Rozwiązując równanie 10 przy warunkach początkowych:

$$C^* = C_s \quad \text{dla } x = 0$$

$$\frac{dC^*}{dx} = 0 \quad \text{dla } x = l$$

uzyskuje się postać:

$$C^* = C_s \cdot \frac{\cosh[a \cdot (L - x)]}{\cosh \cdot (L \cdot a)} \quad [11]$$

gdzie :

$$a = \frac{r_{max'}}{D_{eff} \cdot K_m}$$

Równanie [11] pozwala na obliczenie stężenia związków organicznych wewnątrz ziarna o średnicy równej  $L$ .

Zależność między szybkością dyfuzji wewnętrznej  $r_i$  a stężeniem na powierzchni nośnika  $C_s$  wyraża się wzorem:

$$r_i = \frac{r_{max'}}{\chi_i} \cdot C_s \quad [12]$$

gdzie:

$\chi_i$  — wyraża zależność między wartością modułu Thiela a wartością parametru równania Michaelisa-Menten  $K_m$ .

$$\chi_i = \frac{K_m \cdot \Phi}{\tanh \Phi} \quad [13]$$

gdzie  $\Phi$  jest modułem Thiele'a zdefiniowanym następująco:

$$\Phi = L \cdot \sqrt{\frac{r_{max'}}{D_{eff} \cdot K_m}} \quad [14]$$

Podstawiając równanie [12] do równania [14] otrzymujemy:

$$r_i = \frac{r_{max'} \cdot \tanh \Phi}{K_m \cdot \Phi} \cdot C_s \quad [15]$$

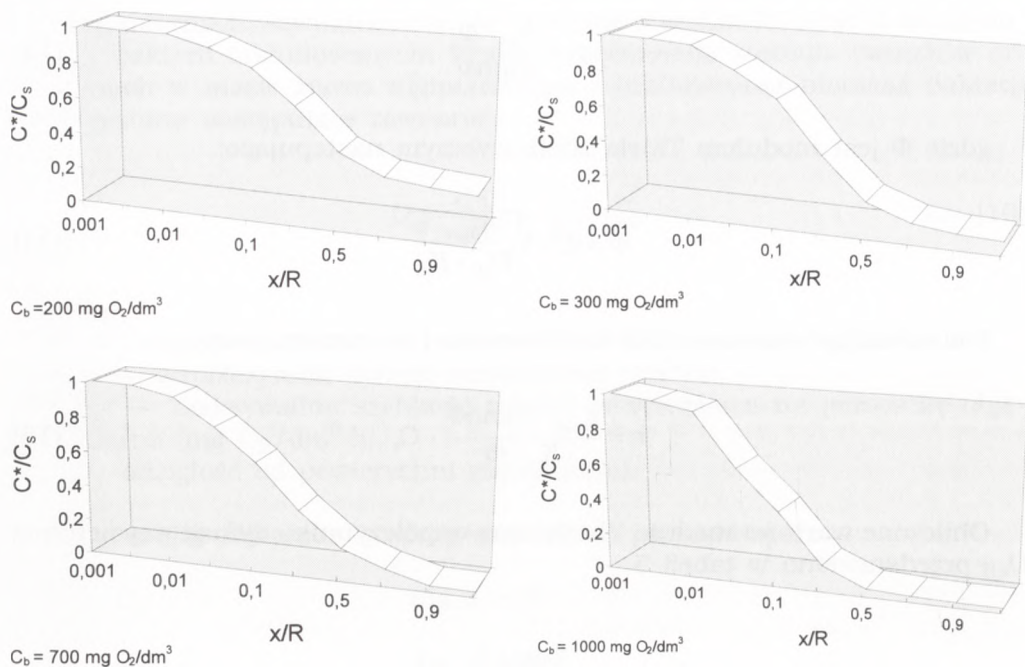
Obliczone wartości modułu Thiele'a oraz współczynnika dyfuzji wewnętrznej  $D_{eff}$  przedstawiono w tabeli 5.

TABELA 5  
WYZNACZONE WARTOŚCI WSPÓŁCZYNNIKA DYFUZJI WEWNĘTRZNEJ  $D_{eff}$  I MODUŁU THIELE'A  $\Phi$

Immobilizowane bakterie		
$C_s$ mg $O_2/dm^3$	$D_{eff}$ $cm^2/s$	$\Phi$ bezw.
99,0	$1,08 \cdot 10^{-7}$	0,99
194,8	$2,9 \cdot 10^{-8}$	1,48
392,0	$2,7 \cdot 10^{-8}$	1,58
614,8	$2,6 \cdot 10^{-8}$	1,73

Wzrost stężenia związków organicznych na powierzchni ziarna alginianowego powodował spadek wartości współczynnika dyfuzji wewnętrznej  $D_{eff}$ . Wyznaczenie wartości współczynnika  $D_{eff}$  dla związków organicznych dyfundujących w ziarnie z inkludowaną biomasą pozwoliło na obliczenie stężenia lokalnego związków organicznych w ziarnie nośnika. Stężenie związków organicznych wewnątrz nośnika przedstawiono na rysunku 1, jako zależność między stosunkiem stężenia związków organicznych w ziarnie do stężenia na powierzchni  $f(y) = (C^*/C_s)$  a stosunkiem odległości od powierzchni do promienia ziarna  $f(x) = (x/R)$ . Krzywe rozkładu stężenia substratu wewnątrz ziarna alginianowego o stężeniu immobilizowanej biomasy 1,25% sm wskazują, że wzrost stężenia substratu na powierzchni ziarna z 99 do 614,8 mg  $O_2/dm^3$  oraz spadek wartości współczynnika  $D_{eff}$  z  $1,08 \cdot 10^{-7}$  do  $2,6 \cdot 10^{-8}$   $cm^2/s$  powodowały zmniejszenie się dostępności związków organicznych wraz ze wzrostem odległości od powierzchni ziarna. W odległości równej stosunkowi  $x/R = 0,5$  stężenie lokalne substratu  $C^*$  wynosiło w zależności od stę-





Rys. 1. Zmiany stężenia związków organicznych wewnątrz ziarna alginianowego z inkludowaną biomasą bakterii w zależności od odległości od powierzchni ziarna ( $x/R$ ).

żenia związków organicznych na powierzchni ziarna (tab. 5) odpowiednio: 40,8, 35,7, 28,8, 11,3  $\text{mg O}_2/\text{dm}^3$ .

Parametrem charakteryzującym opór nośnika wobec dyfundującego substratu jest moduł Thiele. Stężenie związków organicznych na granicy faz wpływało na wartości modułu Thiele (tab. 5). Dostępność związków organicznych wewnątrz nośnika była czynnikiem ograniczającym szybkość przemian biochemicznych.

Do analizy wpływu dyfuzji wewnętrznej na szybkość reakcji biochemicznych bakterii inkludowanych w alginianie, wprowadzono współczynnik wykorzystania katalizatora  $E$ . Dla wartości  $E = 1$  szybkość reakcji rozkładu w nośniku nie jest ograniczona oporem wewnętrznym wobec dyfundującego substratu.

$$E = \frac{\tanh\Phi}{\Phi} \quad [16]$$

gdzie:

$E$  — współczynnik wykorzystania katalizatora [wartość bezwymiarowa],

$\Phi$  — współczynnik Thiele [wartość bezwymiarowa].

Wartości współczynników wykorzystania katalizatora  $E$  w zależności od stężenia związków organicznych na powierzchni nośnika (tab. 5) kształtowały się następująco: 0,76, 0,6, 0,58, 0,54.

#### 4. Podsumowanie

Przeprowadzone badania pozwoliły na określenie wpływu immobilizacji na szybkość rozkładu związków organicznych oraz na wyznaczenie parametrów szybkości rozkładu organicznych związków węglowych przez bakterie inkluowane w alginianie.

Wpływ procesów przenoszenia masy na szybkość rozkładu substratu przez immobilizowane bakterie określono opierając się na następujących założeniach:

$$r_{ef} = f(r_{max}, k_{L2}, D_{eff})$$

W warunkach występującego ograniczenia szybkości procesami dyfuzji zewnętrznej i wewnętrznej, efektywna szybkość rozkładu organicznych związków przez immobilizowane bakterie wyrażono jako:

$$r_{ef} = r \cdot \eta_e,$$

a współczynnik efektywności:

$$\eta_e = r_{ef} / r$$

Przy wystąpieniu ograniczenia szybkości reakcji rozkładu transportem na granicy faz roztwór-powierzchnia ziarna, współczynnik efektywności był funkcją liczby Damkohlera ( $Da$ ), której wartość została obliczona z równania:

$$Da = \frac{r_{max}}{K_m \cdot k_{L2}}$$

Natomiast przy wystąpieniu ograniczeń szybkości reakcji transportem wewnętrznym, współczynnik efektywności był funkcją modułu Thiele ( $\Phi$ ):

$$\Phi = L \sqrt{\frac{r_{max'}}{D_{eff} \cdot K_m}}$$

Wyznaczenie wartości liczby  $Da$  oraz modułu Thiele umożliwiło określenie wpływu: dyfuzji wewnętrznej na szybkość reakcji rozkładu, parametrów technologicznych, takich jak: wielkość ziarna, ilości ziaren w objętości reaktora, stężenie immobilizowanej biomasy w nośniku, a także szybkości rozkładu organicznych związków węglowych przez immobilizowane bakterie.

#### Symbole

$\Phi$  — moduł Thiele [bezw.],

$\eta_e$  — współczynnik efektywności [bezw.],

- $A$  — powierzchnia ziaren nośnika [dm<sup>2</sup>],  
 $C^*$  — stężenie substratu w ziarnie [mg O<sub>2</sub>/dm<sup>3</sup>],  
 $C_b$  — stężenie substratu w reaktorze [mg O<sub>2</sub>/dm<sup>3</sup>],  
 $C_s$  — stężenie substratu na granicy faz roztwór-powierzchnia nośnika [mgO<sub>2</sub>/dm<sup>3</sup>],  
 $D_a$  — liczba Damkohlera [bezw.],  
 $D_{eff}$  — współczynnik dyfuzji wewnętrznej [cm<sup>2</sup>/s],  
 $E$  — współczynnik wykorzystania katalizatora [bezw.],  
 $K$  — współczynnik aktywności oddechowej [mg O<sub>2</sub>/mg sm·h],  
 $k_{L2}$  — współczynnik przenoszenia masy [dm/h],  
 $K_m$  — stała nasycenia równa stężeniu substratu, dla którego szybkość reakcji jest równa połowie szybkości maksymalnej [mg O<sub>2</sub>/dm<sup>3</sup>],  
 $K_{m,poz}$  — stała nasycenia w równaniu kinetycznym rozkładu substratu przez immobilizowane komórki bakterii [mg O<sub>2</sub>/dm<sup>3</sup>],  
 $r$  — szybkość reakcji wolnych bakterii [mg O<sub>2</sub>/dm<sup>3</sup>·h],  
 $r_b$  — szybkość reakcji biochemicznego rozkładu [mg O<sub>2</sub>/dm<sup>3</sup>·h],  
 $r_{dz}$  — szybkość dyfuzji substratu do powierzchni biokatalizatora [mg O<sub>2</sub>/dm<sup>2</sup>·h],  
 $r_{ef}$  — całkowita szybkość reakcji przypadająca na jednostkę powierzchni ziarna biokatalizatora [mg/dm<sup>2</sup>·h],  
 $r_{max}$  — maksymalna szybkość reakcji biochemicznego rozkładu [mg O<sub>2</sub>/dm<sup>3</sup>·h],  
 $r_{max'}$  — maksymalna szybkość reakcji przypadająca na jednostkę powierzchni ziarna biokatalizatora [mg/dm<sup>2</sup>·h],  
 $r_{max''}$  — maksymalna szybkość reakcji przypadająca na jednostkę objętości ziarna [mg O<sub>2</sub>/dm<sup>3</sup>·h],  
 $x$  — odległość od powierzchni ziarna [mm],  
 $L$  — średnica ziarna [mm],  
 $R$  — promień ziarna [mm].

## Literatura

1. Nilsson I., Ohlson S., Hagstrom L., Molin N., Mosbach K., (1980), *European Journal of Applied Microbiol. and Biotechnol.*, 14, 261-274.
2. Tam N. F. Y., Lau P. S., Wong Y. S., (1994), *Wat. Sci. Tech.*, 30, 369-374.
3. Tramper J., Grootjen D. R. J., (1986), *Enzyme Microbial Technology*, 8, 477-480.
4. Wijffels R. H., Leenen E. J. T. M., Tramper J., (1993), *Wat. Sci. Tech.*, 27, 233-240.
5. Deguchi H., Kashiwaya M., (1994), *Wat. Sci. Tech.*, 30, 143-149.
6. Horvath C., Engasser J. M., (1974), *Biotech. Bioeng.*, 16, 909-923.
7. Fink D. J., Tsungyen N., Schultz J. S., (1973), *Biotech. Bioeng.*, 15, 879-888.
8. Moser A., (1988), *Bioprocess technology. Kinetics and reactors*, Springer-Verlag.

## The influence of immobilization on the overall rate of substrate biodegradation by bacterial cells

### Summary

The paper includes the results of mass transfer influence on the overall rate of substrate biodegradation by bacterial cells immobilized in alginate gel. The overall rate of substrate biodegradation by immobilized bacteria is the function of the following parameters:  $r_{ef} = f(r_{max}, k_{L2}, D_{eff})$ .

The results indicate that overall ratio of substrate biodegradation by immobilized bacteria is limited by external and internal transport. The effectiveness of the substrate biodegradation depends on the value of overall effectiveness factor. When limiting the overall rate of substrate

biodegradation by the diffusion in a phase liquid-beads surface, the effectiveness factor is the function of Damkohler number. In the case of the internal diffusion limiting the overall rate of substrate biodegradation by immobilized bacteria the effectiveness factor depends on the Thiel number.

**Key words:**

alginate gel, biodegradation, immobilized bacteria.

*Adres do korespondencji:*

Irena Wojnowska-Baryła, Katedra Chemii i Technologii Wody i Ścieków,  
Akademia Rolniczo-Techniczna, 10-957 Olsztyn-Kortowo, bl. 47.