

Charakterystyka zdolności usuwania kadmu przez wolne i immobilizowane bakterie *Kliebsiella pneumoniae*

Irena Wojnowska-Baryła

Ewa Stolarczyk

Anna Grędzińska

Katedra Chemii i Technologii Wody i Ścieków

Akademia Rolniczo-Techniczna

Olsztyn-Kortowo

1. Wstęp

Efektywne wykorzystanie mikroorganizmów do usuwania metali ciężkich ze środowiska zależy do sprawności usuwania, możliwości odzysku sorbowanego metalu oraz regeneracji biosorbenta (1).

Technika unieruchomiania komórek na/lub w nośnikach pozwala na zwiększenie zdolności usuwania metali przez mikroorganizmy (2,3) oraz na wielokrotne wykorzystanie mikroorganizmów jako biosorbentów metali (4). Najczęściej stosowanymi technikami immobilizacji mikroorganizmów są adsorpcja oraz inkluzja. Technika adsorpcji ze względu na ograniczone stężenie unieruchomionych na powierzchni nośnika komórek oraz na nietrwałość wiązań jest rzadziej stosowana w porównaniu z metodą inkluzji. Polega ona na włączeniu mikroorganizmów w sieć przestrzenną nośnika. Nośniki stosowane do immobilizacji powinny być nietoksyczne, posiadać zdolność do tworzenia wiązań z powierzchnią komórek mikroorganizmów, wysoką porowatość, stabilność termiczną oraz odporność mechaniczną.

W pracy badano wpływ immobilizacji bakterii metodą inkluzji w żelu alginianowym na sprawność usuwania kadmu z roztworów wodnych. W tym celu określono zdolność usuwania kadmu przez ziarna alginianowe, wolne i immobilizowane *Kliebsiella pneumoniae*. Zdolności sorpcyjne badanych biosorbentów określono wyznaczając sprawność usuwania kadmu oraz wartości parametrów równań Freundlicha i Langmuira.

2. Metodyka badań

2.1. Przygotowanie biosorbentów

Biosorbent alginianowy uzyskano w wyniku żelowania 1% roztworu alginianu sodu w roztworze CaCl_2 zawierającym 4,35 g $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ w 1dm^3 wody destylowanej. Powstające ziarna alginianowe utwardzono przetrzymując w roztworze CaCl_2 przez 2h. Po tym czasie ziarna alginianowe oddzielano od roztworu CaCl_2 i przechowywano w wodzie destylowanej w temperaturze 4°C .

Do hodowli biomasy wykorzystywano przechowywane na skosach agarowych *Klebsiella pneumoniae*, które uaktywniono przez trzykrotne pasażowanie na bulionie odżywczym. Inkubację prowadzono w temperaturze 37°C przez 18 h. Uaktywnioną biomasą w ilości 20 cm^3 zaszczepiono 2 dm^3 bulionu odżywczego i inkubowano przez 18 h w temperaturze 37°C . Namnożone bakterie oddzielano od podłoża przez wirowanie przy 15 tys. obr./min przez 15 min. Odwirowaną biomasę przenoszono do kolby miarowej o objętości 50 cm^3 i uzupełniano wodą jałową. Sucha masa zagęszczonych bakterii wynosiła $49,1\text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$. Biomasę bakterii wykorzystywano jako biosorbent kadmu z roztworów wodnych o różnym stężeniu początkowym oraz do immobilizacji.

Immobilizację bakterii *Klebsiella pneumoniae* prowadzono metodą inkluzji. Biomasę bakterii w ilości 25 g dodawano do 10 g wody jałowej, następnie rozpuszczano w sterylnej mieszaninie zawierającej 1 g alginianu oraz 64 g wody. Jednorodną mieszaninę alginianu i biomasy bakterii wkraplano do roztworu CaCl_2 zawierającego 4,35 g $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ w 1 dm^3 wody destylowanej. Powstające ziarna utwardzono przetrzymując w roztworze CaCl_2 przez 2 h. Następnie, ziarna alginianowe oddzielano od roztworu CaCl_2 i przechowywano w wodzie destylowanej w temperaturze 4°C . W wyniku immobilizacji otrzymano biosorbent o stężeniu inkludowanej biomasy równym $1,23\text{ g s.m.}(1)$ i $0,58\text{ g s.m.}(2)$.

2.2. Przygotowanie roztworu kadmu

Roztwór podstawowy kadmu o stężeniu $20\text{ mg Cd}^{2+} \cdot \text{cm}^{-3}$ przygotowano rozpuszczając 45,84 g $\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ w 1dm^3 wody dejonizowanej. W zależności od serii badań roztwór podstawowy kadmu rozcieńczano wodą dejonizowaną do wymaganego stężenia początkowego kadmu.

2.3. Badanie zdolności usuwania kadmu przez biosorbenty

Badania prowadzono w trzech seriach:

- w I — badano zdolność usuwania kadmu z roztworów o początkowym stężeniu wynoszącym w przedziale od 1 do $200\text{ mg Cd}^{2+} \cdot \text{dm}^{-3}$ przez biosorbent alginianowy;
- w II — badano zdolność usuwania kadmu z roztworów o początkowym stężeniu wynoszącym w przedziale od 1 do $200\text{ mg Cd}^{2+} \cdot \text{dm}^{-3}$ przez biomasę bakterii *Klebsiella pneumoniae*;

- w III — badano zdolność usuwania kadmu z roztworów o początkowym stężeniu wynoszącym w przedziale od 1 do 200 mg $\text{Cd}^{2+} \cdot \text{dm}^{-3}$ przez immobilizowane w alginianie bakterie *Klebsiella pneumoniae* o stężeniu biomasy 1,23 g s.m.(1) i 0,58 g s.m.(2);

W badaniach wykorzystano roztwory kadmu o następującym stężeniu początkowym: 1, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 100, 150 i 200 mg $\text{Cd}^{2+} \cdot \text{dm}^{-3}$. W każdej serii czas sorpcji wynosił 30 min. Po tym czasie próby kontrolne zawierające roztwory kadmu o badanym stężeniu początkowym oraz próby z biosorbentem odwirowywano przez 15 minut przy 15 tys. obr. $\cdot \text{min}^{-1}$. W odwirowywanych próbach kontrolnych i z biosorbentem oznaczano ilość kadmu pozostałego w roztworze.

Metody analityczne

Zakres analiz obejmował:

- oznaczenie zawartości kadmu w roztworach metodą adsorpcji atomowej w aparacie Spektrometr AA-20+ firmy Warian,
- oznaczenie suchej masy zagęszczonych bakterii wg Hermanowicza i wsp. (5).

Na podstawie uzyskanych wyników usuwania kadmu z roztworów przez badane biosorbenty wyznaczono:

- sprawność usuwania kadmu z roztworów wodnych jako procentowy stosunek kadmu zaadsorbowanego do jego początkowej zawartości w roztworze,
- parametry równań Freundlicha ($k, \frac{1}{n}$) i Langmuira (K_c, q_{max}).

Parametry $k, \frac{1}{n}$ wyznaczono z równania Freundlicha:

$$q = k \cdot [C_{\text{Cd}^{2+}}]^{\frac{1}{n}}$$

gdzie:

$C_{\text{Cd}^{2+}}$ — stężenie kadmu w roztworze w stanie równowagi [$\text{mg Cd}^{2+} \cdot \text{dm}^{-3}$];
 k — stała sorpcji, określająca ilość metalu w $\text{mg Cd}^{2+} \cdot \text{g}^{-1}$ s.m. sorbowanego z roztworu w stężeniu równowagi $1 \mu\text{mol Cd}^{2+} \cdot \text{dm}^{-3}$ [$\text{mg Cd}^{2+} \cdot \text{g}^{-1}$ s.m.];

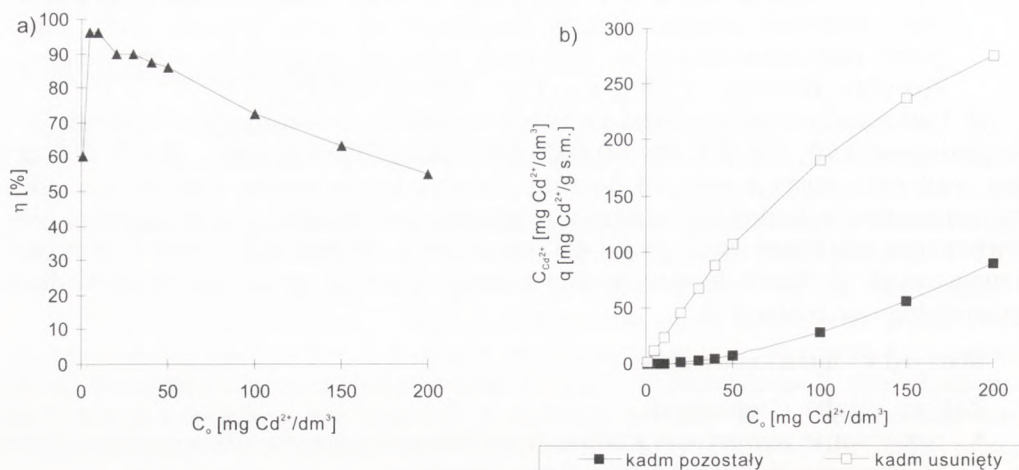
$\frac{1}{n}$ — współczynnik rozdziału, określający stosunek ilości substancji zaadsorbowanej do ilości substancji pozostałej w roztworze w stanie równowagi [$\text{dm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ s.m.].

Parametry K_c i q_{max} wyznaczono z równania Langmuira

$$q = \frac{1}{q_{max}} \cdot C_{\text{Cd}^{2+}} + \frac{1}{q_{max} \cdot K_c}$$

gdzie:

K_c — stała dysocjacji kompleksu jon kadmu — biosorbent [$\text{dm}^3 \cdot \text{mg}^{-1} \text{Cd}^{2+}$];
 $C_{\text{Cd}^{2+}}$ — stężenie kadmu w roztworze w stanie równowagi [$\text{mg Cd}^{2+} \cdot \text{dm}^{-3}$];
 q — ilość kadmu usuniętego przez gram suchej masy biosorbentu [$\text{mg Cd}^{2+} \cdot \text{g}^{-1}$ s.m.];



Rys. 1. Przebieg usuwania kadmu z roztworów o stężeniach od 1 do 200 mg Cd²⁺/dm³ przez alginian sodu: a) sprawność usuwania kadmu (η) z roztworów o stężeniu początkowym (C_0) w przedziale od 1 do 200 mg Cd²⁺/dm³, b) ilość kadmu pozostałego w roztworze ($C_{Cd^{2+}}$) oraz usuniętego (q) przez ziarna alginianu sodu w zakresie stężeń od 1 do 200 mg Cd²⁺/dm³.

q_{max} — maksymalna zdolność sorpcji, ilość substancji sorbowanej powodująca pokrycie powierzchni sorbentu warstwą jednocząsteczkową [mg Cd²⁺ · g⁻¹s.m.].

3. Omówienie wyników

W pracy badano zdolności sorpcyjne alginianu sodu zżelowanego w postaci ziarna o średnicy 3 mm z roztworów o początkowym stężeniu metalu wynoszącym w przedziale od 1 do 200 mg Cd²⁺ · dm⁻³. Najwyższą sprawność usuwania kadmu, wynoszącą 96%, uzyskano dla stężeń 5 i 10 mg Cd²⁺ · dm⁻³. Wzrost stężenia początkowego kadmu do 200 mg Cd²⁺ · dm⁻³ spowodował obniżenie sprawności usuwania kadmu do 55%. Średnia sprawność usuwania kadmu przez ziarna alginianowe wynosiła 79,6% (rys. 1). Na podstawie wyników usuwania kadmu z roztworu przez alginian obliczono parametry równań Freundlicha i Langmuira przedstawione w tabeli 1.

Obliczone współczynniki korelacji (tab. 1) wykazują, że usuwanie kadmu przez ziarna alginianowe przebiegało zgodnie z równaniem Langmuira. Wartość q_{max} wynosiła 333,3 mg Cd²⁺ · g⁻¹s.m., a stała dysocjacji kompleksu jon kadmu — biosorbent alginianowy K_c -0,045 dm³ · g⁻¹Cd²⁺.

Przewidywana ilość kadmu usuniętego z roztworu w stężeniu równowagi 1 μ mol Cd²⁺ · dm⁻³ (stała k) wynosiła 21,38 mg Cd²⁺ · g⁻¹s.m., a współczynnik rozdziału $\frac{1}{n}$ — 0,649 dm³ · g⁻¹s.m.

TABELA 1
PARAMETRY KINETYCZNE SORPCJI KADMU Z ROZTWORÓW WODNYCH O STĘŻENIACH OD 1 DO 200 mg Cd²⁺ · dm⁻³
PRZEZ BIOSORBENT ALGINIANOWY

Rodzaj bakterii	Średnia sprawność usuwania kadmu (%)	Parametry równania					
		Freundlich			Langmuir		
		k	$\frac{1}{n}$	r ²	q _{max}	K _c	r ²
alginianowe	79,6	mg Cd ²⁺ · g ⁻¹ s.m.	dm ³ · g ⁻¹ s.m.		mg Cd ²⁺ · g ⁻¹ s.m.	dm ³ · mg ⁻¹ Cd ²⁺	
		21,38	0,649	0,867	333,3	0,045	0,984

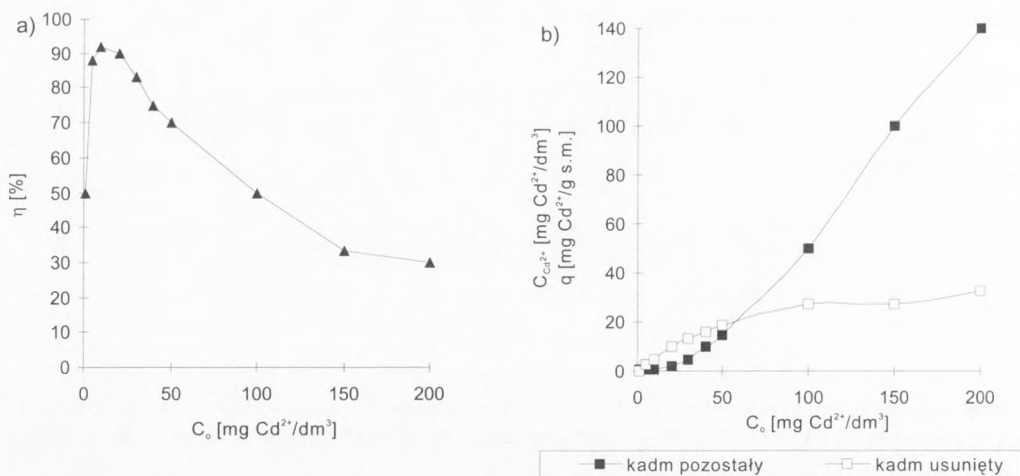
W serii II badano zdolności usuwania kadmu z roztworów o stężeniach od 1 do 200 mg Cd²⁺ · dm⁻³ przez bakterie *Klebsiella pneumoniae*. Najwyższą sprawność usuwania kadmu, wynoszącą 92%, uzyskano dla roztworu o stężeniu początkowym 10 mg Cd²⁺ · dm⁻³. W serii tej obserwowano spadek sprawności usuwania kadmu przez bakterie *Klebsiella pneumoniae* z 82% dla roztworów o stężeniu początkowym 30 mg Cd²⁺ · dm⁻³ do 30% dla stężenia początkowego 200 mg Cd²⁺ · dm⁻³. Podobnie jak w przypadku biosorbenta alginianowego sprawność usuwania kadmu z roztworu o stężeniu początkowym wynoszącym 1 mg Cd²⁺ · dm⁻³ była najniższa spośród obserwowanych w danej serii (rys. 2).

Obliczone parametry równań Freundlicha i Langmuira dla bakterii *Klebsiella pneumoniae* zestawiono w tabeli 2.

TABELA 2
PARAMETRY KINETYCZNE SORPCJI KADMU Z ROZTWORÓW WODNYCH O STĘŻENIACH OD 1 DO 200 mg Cd²⁺ · dm⁻³
PRZEZ BAKTERIE *Klebsiella pneumoniae*

Rodzaj bakterii	Średnia sprawność usuwania kadmu (%)	Parametry równania					
		Freundlich			Langmuir		
		k	$\frac{1}{n}$	r ²	q _{max}	K _c	r ²
<i>Klebsiella pneumoniae</i>	66,2	mg Cd ²⁺ · g ⁻¹ s.m.	dm ³ · g ⁻¹ s.m.		mg Cd ²⁺ · g ⁻¹ s.m.	dm ³ · mg ⁻¹ Cd ²⁺	
		2,88	0,582	0,832	34,48	0,06	0,94

Wartość maksymalnej zdolności sorpcyjnej q_{max}, wyznaczona dla bakterii *Klebsiella pneumoniae* wynosiła 34,48 mg Cd²⁺ · g⁻¹s.m. i była dziesięciokrotnie niższa niż q_{max} biosorbenta alginianowego. Podobnie wartość stałej sorpcji k wyznaczona z równania Freundlicha była prawie dziesięciokrotnie niższa w stosunku do wartości stałej k dla alginianu. Wartości współczynników korelacji (r²) wykazują, że usuwanie kadmu z roztworów o stężeniach



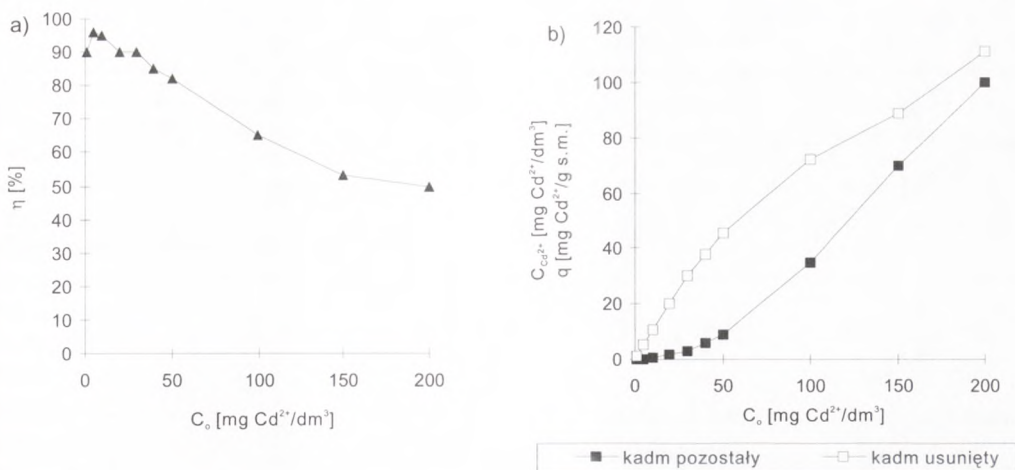
Rys. 2. Przebieg usuwania kadmu z roztworów o stężeniach od 1 do 200 mg Cd²⁺/dm³ przez bakterie *Klebsiella pneumoniae*: a) sprawność usuwania kadmu (η) z roztworów o stężeniu początkowym (C_0) w przedziale od 1 do 200 mg Cd²⁺/dm³, b) ilość kadmu pozostałego w roztworze ($C_{Cd^{2+}}$) oraz usuniętego (q) przez bakterie *Klebsiella pneumoniae* w zakresie stężeń od 1 do 200 mg Cd²⁺/dm³.

od 1 do 200 mg Cd²⁺ · dm⁻³ przez bakterie *Klebsiella pneumoniae* przebiegało zgodnie z równaniem Langmuira.

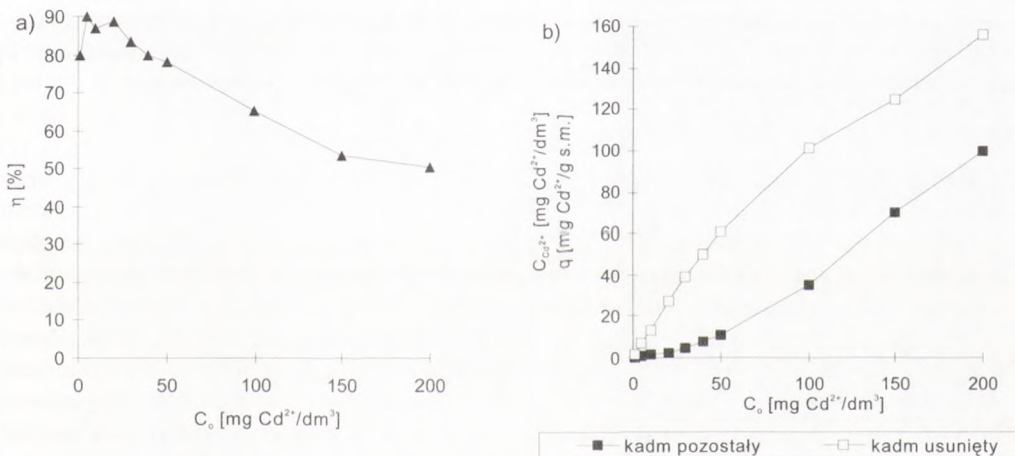
W serii III badano zdolność usuwania kadmu przez dwa biosorbenty różniące się stężeniem immobilizowanej biomasy bakterii, tj. *Klebsiella pneumoniae* (1) o stężeniu immobilizowanej biomasy równym 1,23 g s.m. oraz *Klebsiella pneumoniae* (2) o stężeniu 0,58 g s.m. Sprawność usuwania kadmu przez immobilizowane biosorbenty wynosiła średnio 79,6% dla immobilizowanych bakterii *Klebsiella pneumoniae* (1) i 75,5% dla immobilizowanego *Klebsiella pneumoniae* (2) (rys. 3,4).

Wyznaczone na podstawie wyników usuwania kadmu przez immobilizowane biosorbenty parametry równań Freundlicha i Langmuira przedstawiono w tabeli 3.

Sorpcja kadmu z roztworów o stężeniach od 1 do 200 mg Cd²⁺ · dm⁻³ przez immobilizowaną biomasę bakterii *Klebsiella pneumoniae* przebiegała zgodnie z równaniem Langmuira (tab. 3). Maksymalna zdolność sorpcyjna q_{max} była wyższa dla biosorbenta o niższym stężeniu immobilizowanej biomasy (0,58 g s.m.) i wynosiła 166,67 mg Cd²⁺ · g⁻¹s.m., natomiast dla biosorbenta o wyższym stężeniu biomasy (1,23 g s.m.) 111,11 mg Cd²⁺ · g⁻¹s.m. Wartość q_{max} bakterii immobilizowanych była prawie o połowę niższa od wartości wyznaczonej dla alginianu oraz prawie trzykrotnie wyższa niż q_{max} bakterii *Klebsiella pneumoniae*. Wartość stałej dysocjacji K_c wynosiła 0,1 dm³ · mg⁻¹Cd²⁺ dla *Klebsiella pneumoniae* (1) oraz 0,056 dla *Klebsiella pneumoniae* (2).



Rys. 3. Przebieg usuwania kadmu z roztworów o stężeniach od 1 do 200 mg Cd²⁺/dm³ przez immobilizowane bakterie *Klebsiella pneumoniae* o stężeniu biomasy 1,23 g s.m.: a) sprawność usuwania kadmu (η) z roztworów o stężeniu początkowym (C_0) w przedziale od 1 do 200 mg Cd²⁺/dm³, b) ilość kadmu pozostałego w roztworze ($C_{Cd^{2+}}$) oraz usuniętego (q) przez immobilizowane bakterie *Klebsiella pneumoniae* w zakresie stężeń od 1 do 200 mg Cd²⁺/dm³.



Rys. 4. Przebieg usuwania kadmu z roztworów o stężeniach od 1 do 200 mg Cd²⁺/dm³ przez immobilizowane bakterie *Klebsiella pneumoniae* o stężeniu biomasy 0,58 g s.m.: a) sprawność usuwania kadmu (η) z roztworów o stężeniu początkowym (C_0) w przedziale od 1 do 200 mg Cd²⁺/dm³, b) ilość kadmu pozostałego w roztworze ($C_{Cd^{2+}}$) oraz usuniętego (q) przez immobilizowane bakterie *Klebsiella pneumoniae* w zakresie stężeń od 1 do 200 mg Cd²⁺/dm³.

TABELA 3

PARAMETRY KINETYCZNE SORPCJI KADMU Z ROZTWORÓW WODNYCH O STĘŻENIACH OD 1 DO 200 mg Cd²⁺ · dm⁻³ PRZEZ IMMOBILIZOWANE BAKTERIE *Kliebsiella pneumoniae*

Rodzaj biosorbenta	Średnia sprawność usuwania kadmu (%)	Parametry równania				
		Freundlich			Langmuir	
		k	$\frac{1}{n}$	r ²	q _{max}	K _c
		mg Cd ²⁺ · g ⁻¹ s.m.	dm ³ · g ⁻¹ s.m.		mg Cd ²⁺ · g ⁻¹ s.m.	dm ³ · mg ⁻¹ Cd ²⁺
immobilizowane <i>Kliebsiella pneumoniae</i> (1)	79,6	10,500	0,577	0,651	111,11	0,100
immobilizowane <i>Kliebsiella pneumoniae</i> (2)	75,5	9,350	0,689	0,596	166,67	0,056

Ilość kadmu usuniętego z roztworu w stężeniu równowagi 1 μmol Cd²⁺ · dm⁻³ (stała sorpcji *k*) wynosiła 10,5 mg Cd²⁺ · g⁻¹s.m. dla immobilizowanych bakterii *Kliebsiella pneumoniae* (1) oraz 9,354 mg Cd²⁺ · g⁻¹s.m. dla immobilizowanego *Kliebsiella pneumoniae* (2) i były to wartości około 2-krotnie niższe od wartości stałej *k* dla biosorbentu alginianowego. Natomiast wartość stałej sorpcji *k* obliczona dla wolnych bakterii *Kliebsiella pneumoniae* wynosiła 2,88 mg Cd²⁺ · g⁻¹s.m. i była ponad 3-krotnie niższa niż wartości *k* wyznaczone dla immobilizowanych bakterii *Kliebsiella pneumoniae*.

4. Dyskusja

Sprawność usuwania kadmu z roztworów wodnych w przedziale stężeń od 1 do 200 mg Cd²⁺ · dm⁻³ przez ziarna alginianowe i inkludowane w alginianie bakterie *Kliebsiella pneumoniae* była taka sama i wynosiła 79,6%. Natomiast, wolne bakterie usuwały kadm ze sprawnością równą 66%. Przebieg usuwania kadmu przez badane biosorbenty był zgodny z równaniem Langmuira. Uzyskane krzywe sorpcji wskazują, że następowało stopniowe obniżanie się ilości dostępnych miejsc aktywnych sorbenta. Oznacza to, że wzrost stężenia równowagi metalu nie powodował wzrostu ilości kadmu usunawanego przez biosorbent.

Przebieg usuwania kadmu z roztworów wodnych przez alginian i wolne bakterie *Kliebsiella pneumoniae* był zbliżony. Zarówno biosorbent alginianowy, jak i wolne bakterie usuwały kadm z roztworu o stężeniu początkowym 1 mg Cd²⁺ · dm⁻³ z mniejszą sprawnością w porównaniu do stężenia 5 mg Cd²⁺ · dm⁻³. Badane biosorbenty były mniej efektywne w niskich stężeniach

początkowych kadmu w roztworze. Deans i Dixon (6) wskazują na znaczenie dwóch mechanizmów w usuwaniu metalu przez polimery, tj. wymiany jonowej i tworzenia kompleksów z biosorbentem. Wymiana jonowa jest charakterystyczna dla wysokich stężeń metalu w roztworze. W niższych stężeniach dominuje drugi mechanizm, który umożliwia osiągnięcie wysokiego stopnia usunięcia metalu. Podobny mechanizm usuwania metali przez mikroorganizmy opisali Fu i Allen (7). Usuwanie kationów metali następowało na drodze wymiany jonowej i kompleksowania ze słabo kwasowymi grupami funkcyjnymi występującymi na powierzchni komórki. Na efektywność wpływa również fizykochemiczne wiązanie metalu z polimerami zewnątrzkomórkowymi, których składnikami są polisacharydy (8). W omawianym doświadczeniu immobilizacja bakterii w nośniku alginianowym spowodowała wzrost sprawności usuwania kadmu z roztworów o stężeniu początkowym od 1 do 30 mg $\text{Cd}^{2+} \cdot \text{dm}^{-3}$ w stosunku do sprawności biosorbenta alginianowego i wolnych bakterii *Kliebsiella pneumoniae* o około 25%. Uzyskane dane wskazują, że w wyniku immobilizacji wzrosła zdolność kadmu do tworzenia kompleksów z grupami jonogennymi biosorbenta w przedziale stężeń od 1 do 30 mg $\text{Cd}^{2+} \cdot \text{dm}^{-3}$.

Wartości parametrów równań Freundlicha i Langmuira immobilizowanych bakterii w przedziale stężeń od 1 do 200 mg $\text{Cd}^{2+} \cdot \text{dm}^{-3}$ były jednak niższe niż dla biosorbentu alginianowego. Na sprawność usuwania kadmu przez immobilizowane bakterie wpływały właściwości sorpcyjne nośnika. Według Deansa i Dixona (6) biopolimery, takie jak alginian, chitosan czy celuloza są zdolne do obniżenia stężenia jonów metali w roztworze w wyniku wymiany jonowej oraz kompleksowania z różnymi grupami funkcyjnymi. Potwierdzają to również wyniki badań prowadzonych przez Wojnowską i wsp. (9).

W prezentowanych wynikach wykazano również, że immobilizowane bakterie *Kliebsiella pneumoniae* usuwają większe ilości kadmu niż wolne bakterie *Kliebsiella pneumoniae*. Podobne wyniki otrzymali także Garnham i wsp. (4), badając początkową fazę niezależnego od metabolizmu poboru Co, Zn i Mn przez immobilizowane glony *Chlorella salina*. Ilości kobaltu pobierane przez glony immobilizowane oraz nośnik były zbliżone w całym zakresie stężeń i wynosiły około 62%. Według Wilkinsona i wsp. (3) immobilizacja wpływa na poprawę właściwości sorpcyjnych mikroorganizmów. W przeprowadzonych badaniach nad usuwaniem rtęci wykazano, że immobilizowane komórki glonu *Chlorella emersonii* kumulowały znacznie więcej metalu niż komórki zawieszane w roztworze. Za usuwanie rtęci odpowiedzialne były głównie komórki glonów. Ilość metalu usuwana przez nośnik alginianowy wynosiła 7% początkowego stężenia rtęci w roztworze. W omawianych badaniach ziarna żelowanego 1% alginianu sodu usuwały jony kadmu ze średnią sprawnością około 80%. W badaniach przeprowadzonych przez Wojnowską i wsp. (9) wykazano, że immobilizacja biomasy hodowanej na podłożu wg Macaskie (2) w 2% alginianie spowodowała wzrost sprawności usuwania kadmu o ponad 10% w stosunku do nośnika alginianowego.

5. Podsumowanie

W badaniach nie uzyskano efektu sumowania się właściwości sorpcyjnych dwóch biosorbentów, tj. alginianu oraz biomasy bakterii. Wydaje się, że na sprawność immobilizowanych bakterii wpływały głównie właściwości sorpcyjne nośnika, a w mniejszym stopniu inkludowanej biomasy. Potwierdza to fakt, że dwukrotny wzrost inkludowanej suchej masy bakterii nie powodował wzrostu ani spadku sprawności usuwania kadmu. Uzyskany wzrost sprawności usuwania kadmu przez immobilizowane bakterie w stosunku do wolnej biomasy spowodowany był wiązaniem metalu przez alginian sodu, który jak wykazano charakteryzował się wyższą niż biomasa bakterii sprawnością usuwania kadmu. Wskazuje to na możliwość wykorzystania alginianu jako biosorbentu kadmu, a nie tylko nośnika do immobilizacji.

Literatura

1. Chang J. S., Hong J., (1994), *Biotechnology and Bioengineering*, 44, 999-1006.
2. Macaskie L. E., Wates J. M., Dean A. C. R., (1987), *Biotechnology and Bioengineering*, 30, 1, 66-73.
3. Wilkinson S. C., Goulding K. H., Robinson P. K., (1989), *Biotechnology Letters*, 11, 12, 861-864.
4. Garnham G. W., Codd G. A., Gadd G. M., (1992), *Environ. Sci. Technol.*, 26, 9, 1764-1769.
5. Hermanowicz W., Dożańska W., Dojlido J., Koziorowski B., (1976), *Fizyczno-chemiczne badanie wody i ścieków*, Arkady, Warszawa.
6. Deans J. R., Dixon B. G., (1992), *Water Research*, 26, 2, 421-430.
7. Fu G., Allen H. E., (1992), *Water Research*, 26, 2, 225-233.
8. Hänel K., Horwood E., (1988), *Immobilisation of Ions by Bio-sorption*, Eds. Eccles H., Hunt S., Ellis Horwood Ltd., Chichester, 173-182.
9. Wojnowska-Baryła I., E. Klimiuk, M. Kuczajowska-Zadrożna, R. Krzysik, D. Stachowiak, A. Maciejska, M. Bulińska, (1995), *Zastosowanie immobilizowanych komórek bakterii do usuwania metali ciężkich ze ścieków*. Raport końcowy z realizacji projektu badawczego nr 660319102.

Characteristics of the ability to uptake cadmium by free and immobilized bacteria *Klebsiella pneumoniae*

Summary

The ability to uptake cadmium of the following biosorbents: alginate gel, free and immobilized in alginate bacteria *Klebsiella pneumoniae* was characterized. An average efficiency of cadmium removal from solution with initial cadmium concentration range from 1 to 200 mg Cd²⁺ · dm⁻³ was 78.6% by alginate gel and immobilized bacteria *Klebsiella pneumoniae* and 60% by free bacteria. The maximum efficiency of cadmium removal from solution with initial concentration 1 mg Cd²⁺ · dm⁻³ was obtained for bacteria immobilized in alginate gel.

Key words:

biosorption, cadmium, *Klebsiella pneumoniae*, alginate gel, immobilization.

Adres do korespondencji:

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