

O właściwościach biofizycznych opatrunków membranowych z celulozy bakteryjnej

ANDRZEJ ŚLĘZAK¹, JOLANTA JASIK-ŚLĘZAK¹, MAREK KUCHARZEWSKI²,

¹Zakład Biologii i Biofizyki Politechniki Częstochowskiej w Częstochowie,

²Katedra i Klinika Chirurgii Ogólnej Śląskiej Akademii Medycznej w Bytomiu

Streszczenie

W pracy dokonano przeglądu prac, poświęconych biofizycznym właściwościom opatrunków membranowych z celulozy bakteryjnej. Owe właściwości zostały określone na podstawie badań nad osmotycznym i dyfuzyjnym transportem przez czystą (nie modyfikowaną) postać membrany celulozowej Biofill. Miarą owych właściwości są wartości parametrów transportowych membrany wynikających z teorii Kedem-Katchalsky'ego oraz interferogramy obszarów przymembranowych wykonanych metodą interferometrii laserowej.

On biophysical properties membrane dressing made of bacterial cellulose

Summary

In the paper, review of papers devoted to biophysical properties of membrane dressing made of bacterial cellulose was done. These properties were determined on the basis of studies on osmotic and diffusive transport through pure (non modified) bacterial cellulose membrane form called Biofill. The measures of these properties are values of membrane transport parameters resulted from Kedem-Katchalsky's theory and interferograms of near-membrane regions made laser interferometric method.

Słowa kluczowe: celuloza bakteryjna, opatrunki membranowe, żyłne owrzodzenia podudzi

Key words: bacterial cellulose, membrane dressing, venous leg ulcer

WPROWADZENIE

Membranowe procesy separacji na poziomie molekularnym są przydatne w wielu dziedzinach nauki, techniki i medycyny. Z tego powodu odnotowuje się systematyczny wzrost zainteresowania technologiami produkcji membran oraz procesami transportu membranowego [1]. Jedną z ciekawszych metod biotechnologicznych wykorzystywanych do produkcji polimerów błonotwórczych jest biosynteza mikrowłókienkowej celulozy przez szczepki *Acetobacter* [2]. Membrana uformowana z takiej celulozy jest półprzeźroczystą, porowatą folią, selektywnie przepuszczalną dla gazów takich jak O₂, N₂ czy CO₂ a nieprzepuszczalną dla mikroorganizmów [3]. W odróżnieniu od celulozy otrzymywanej z drewna, celuloza bakteryjna jest hypoalergiczna, nietoksyczna, niedrażniąca, niepirogeniczna, biodegradowalna, wysoce hydrofilna oraz biokompatybilna [3]. Struktura fizyko-chemiczna membrany z celulozy bakteryjnej oraz jej właściwości elektrostatyczne powodują, że spełnia ona podobną funkcję jak zewnętrzne warstwy naskórka w stosunku do skóry właściwej: zapewnia ochronę mechaniczną i termiczną zranionej tkanki, poprzez wytworzenie bariery dla mikroorganizmów oraz zapobiega utracie hydroelektrolitów i białka [3]. Właściwości elektrostatyczne owej membrany powodują jej dokładne przyleganie do powierzchni rany, co chroni ranę i zakończenia nerwowe przed bodźcami mechanicznymi i termicznymi oraz stosunkowo szybko redukuje ból. Ponadto polepsza ziarninowanie rany, wydatnie przyspieszając jej gojenie. Z kolei nieprzepuszczalność dla mikroorganizmów nie dopuszcza do zakażenia bakteryjnego rany [3]. Jednym z zastosowań owej membrany jest jej użycie jako opatrunku w procesie leczenia trudno gojących się ran. Bowiem poprzez wytworzenie odpowiedniego mikrośrodowiska zapewnia ona optymalne warunki fizjologiczne do szybkiego gojenia się rany, co istotnie obniża koszty leczenia szczególnie w przypadku rozległych oparzeń [4] i owrzodzeń żylnych podudzi [5,6].

W pracy dokonano przeglądu wyników badań nad osmotycznym i dyfuzyjnym transportem przez czystą (nie modyfikowaną) postać membrany celulozowej BioFill o nazwie handlowej Bioprocess (Fibrocel Biotechnological Products Ltd. Curitiba, Brazylia) wyprodukowanej przez szczep bakterii *Acetobacter*. Membrana celulozowa Bioprocess jest półprzeźroczystą folią o gęstości powierzchniowej od 9 do 20 g·m⁻² i pH zawartym pomiędzy 6 a 7. Jej grubość w stanie suchym wynosi 20 μm a w uwodnionym – 50 μm [3]. W pracy zebrano parametry transportowe membrany wynikające z teorii Kedem-Katchalsky'ego oraz przedstawiono wyniki badań obszarów styków membrana-roztwór przy pomocy interferogramów wykonanych przy pomocy laserowego interferometru Macha-Zehndera.

OKREŚLANIE PARAMETRÓW TRANSPORTOWYCH MEMBRANY

Jednym z ważniejszych zagadnień biofizycznych jest określenie właściwości transportowych membrany z celulozy bakteryjnej w odniesieniu do wodnych roztworów elektrolitów i nieelektrolitów. Procedura określania owych właściwości powinna wynikać z ogólniejszej teorii, najczęściej wchodzącej w skład podejścia deterministycznego rozumienia świata. Jedną z nich jest termodynamika nierównowagowa, której podstawy opracował w latach 30-tych ubiegłego wieku amerykański chemik pochodzenia norweskiego i laureat nagrody Nobla w dziedzinie chemii – Lars Onsager [7]. W ramach liniowej termodynamiki nierównowagowej Ora Kedem i Aharon Katchalsky (izraelscy uczeni pochodzenia polskiego) opracowali w latach 50-tych ubiegłego wieku, teorię transportu membranowego, stanowiącą wygodne narzędzie interpretacyjne procesów transportu zarówno przez membrany sztuczne jak i naturalne [8]. Ograniczeniem owej teorii jest niejednorodność faz rozdzielanych przez membranę [9].

Większość spontanicznie zachodzących procesów transportu w polu sił zewnętrznych, szczególnie w układach biologicznych, prowadzi do powstania różnego typu lokalnych niejednorodności, modyfikujących przepływy membranowe [10,11]. Jedną z przyczyn powstawania niejednorodności jest zjawisko polaryzacji, którego cechą jest ewolucja czasowo-przestrzenna bodźców, a co za tym idzie i przepływów termodynamicznych. W przypadku transportu membranowego zarówno nieelektrolitów jak i elektrolitów ma miejsce polaryzacja stężeniowa, polegająca na tworzeniu po obydwu stronach membrany (M) stężeniowych warstw granicznych (l_h^i i l_l^i) o grubościach odpowiednio (δ_h^i i δ_l^i). Każdą z warstw można traktować jako ciekłą membranę o określonych właściwościach transportowych [9]. Oznacza to, że owe warstwy, wraz z membraną rzeczywistą ograniczają przepływy zarówno osmotyczne jak i dyfuzyjne. Ponadto kinetyka kreacji i ewolucji stężeniowych warstw granicznych zarówno na poziomie fenomenologicznym jak i molekularnym jest sterowana przez bezwymiarowy parametr, nazywany stężeniową liczbą Rayleigha, zależny od czynnika grawitacyjnego, lepkościowego i gęstościowego [12]. W ramach liniowej termodynamiki nierównowagowej ów transport można opisać przy pomocy ogólniejszej formy równań Kedem-Katchalsky'ego, które dla roztworów binarnych mają postać [9]

$$J_v^i = L_p \omega [\omega \mp \frac{1}{2} L_p \sigma (C_h + C_l) (\zeta_s^i - 1)]^{-1} [\zeta_s^i \sigma RT (C_h - C_l) \pm \Delta P_s^i] \quad (1)$$

$$J_s^i = \zeta_s^i \omega RT (C_h - C_l) - \frac{1}{2} J_v^i (1 - \zeta_s^i \sigma) (C_h + C_l) \quad (2)$$

Równanie (1) opisuje stacjonarne przepływy objętościowe roztworu, przy czym pierwszy człon odnosi się do przepływów osmotycznych a drugi – do przepływów hydraulicznych. Z kolei równanie (2) opisuje stacjonarne przepływy masowe substancji rozpuszczonej. Należy zaznaczyć, że pierwszy człon równania (2) opisuje przepływy dyfuzyjne, a drugi – adwekcyjne. W powyższych równaniach J_v oznacza strumień objętościowy roztworu, J_s – strumień substancji rozpuszczonej, RT – iloczyn stałej gazowej i temperatury termodynamicznej, C_h i C_l – stężenia roztworów, ΔP – różnicę ciśnień hydrostatycznych. Z kolei L_p , σ oraz ω oznaczają odpowiednio współczynniki przepuszczalności hydraulicznej, odbicia oraz przepuszczalności substancji rozpuszczonej. Wartość współczynnika odbicia może być zawarta w przedziale $0 \leq \sigma \leq 1$. Jeśli $\sigma = 0$ to membrana jest nieselektywna. Spełnienie przez membranę warunku $0 < \sigma < 1$ oznacza jej selektywność. Jeśli z kolei $\sigma = 1$, to membrana jest półprzepuszczalna. W przypadku nieselektywności membrany współczynnik ω przyjmuje możliwą wartość maksymalną, natomiast dla membrany półprzepuszczalnej jest równy zero. Procedura wyznaczania owych parametrów transportowych została szczegółowo opisana w fundamentalnej pracy A. Katchalsky'ego i P.F. Currana [8].

Miarą polaryzacji stężeniowej jest współczynnik polaryzacji stężeniowej [12]

$$\zeta_s^i = [1 + RT\omega(D_l^{-1}\delta_l^i + D_h^{-1}\delta_h^i)]^{-1} \quad (3)$$

W powyższym równaniu D_l i D_h są współczynnikami dyfuzji substancji w warstwach odpowiednio l_l^i i l_h^i o grubości δ_l^i i δ_h^i ; (l) i (h) oznaczają odpowiednio mniejsze większe o stężenie roztworu. Współczynnik ζ_s^i może przyjmować wartości z przedziału $0 < \zeta_s^i \leq 1$. Grubość warstw δ_l^i i δ_h^i można wyznaczyć doświadczalnie metodą interferometrii laserowej [2-4]. Dla przypadku roztworów równomiernie mieszanych (jednorodnych) $\zeta_s^i = 1$, $J_v^i = J_v$, $J_s^i = J_s$ oraz $\Delta P_s^i = \Delta P$. Superscript i w równaniach (1) – (3) odnosi się do kolejności ustawienia roztworów względem membrany. Zwykle membrana ustawiana jest w płaszczyźnie wertykalnej lub horyzontalnej. W przypadku horyzontalnego ustawienia membrany możliwe są dwie konfiguracje, które oznaczmy przez A i B ($i=A, B$). W konfiguracji A roztwór o większym stężeniu będzie usytuowany nad membraną a o stężeniu mniejszym – pod membraną. W konfiguracji B będzie odwrotna kolejność usytuowania roztworów. Jeśli roztwory są równomiernie mieszane, to ustawienie membrany nie ma wpływu na transport membranowy. Jeśli natomiast roztwory nie są mieszane mechanicznie, to

ustawienie membrany decyduje zarówno o wartości przepływów objętościowych jak i substancji rozpuszczonej [13]. Jeśli gęstość roztworu nad membraną jest większa od gęstości roztworu pod membraną to w układzie transport membranowy ma charakter konwekcyjno-dyfuzyjny. W sytuacji odwrotnej – wyłącznie dyfuzyjny.

Wyznaczone doświadczalnie parametry transportowe dla stanów ustalonych oraz wodnych roztworów glukozy, sacharozy, dextranu, NaCl, KCl, których gęstość rośnie wraz ze wzrostem stężenia oraz etanolu, którego wodny roztwór ma gęstość mniejszą niż woda owej membrany zestawiono w tabeli 1. Z tabeli tej wynika, że wartości współczynnika odbicia dla poszczególnych substancji spełnia kryterium selektywności. Oznacza to, że membrana z celulozy bakteryjnej jest selektywna dla wszystkich badanych substancji. Największą selektywność owa membrana wykazuje dla dekstranu, a najmniejszą dla KCl, co jest związane z większą średnicą cząsteczki dekstranu utrudniającą przenikanie tej substancji przez membranę. Z kolei wartość współczynnika polaryzacji stężeniowej w konfiguracji A (ζ_s^A) jest największa dla etanolu, a najmniejsza dla glukozy, natomiast w konfiguracji B (ζ_s^B) jest największa dla glukozy a najmniejsza dla etanolu. Oznacza to, że układ stężeniowych warstw granicznych wytworzonych po obydwu stronach horyzontalnie ustawionej membrany jest stabilny (bezkonwekcyjny) wtedy membrana rozdziela dwa wodne roztwory o gęstości wprost proporcjonalnej do stężenia (wodne roztwory glukozy). Z kolei wtedy, gdy membrana rozdziela roztwory o gęstości odwrotnie proporcjonalnej do stężenia, stężeniowe warstwy graniczne są niestabilne z powodu generowania przepływów konwekcyjnych. Powyższe uwagi potwierdzają interferogramy przedstawione w poprzednich pracach [14,12] oraz na rys. 1 i 2.

BADANIA INTERFEROMETRYCZNE OBSZARÓW PRZYMEMBRANOWYCH

Badania obszarów roztworu przylegających bezpośrednio do powierzchni membrany (obszarów przymembranowych) przeprowadzono metoda interferometrii laserowej. Dokładny opis zestawu eksperymentalnego oraz metodyki badań przedstawiono w pracach [10,14]. Tutaj przedstawimy jedynie podstawowe informacje. Ów zestaw składał się z układu membranowego, interferometru Macha-Zehndera w wersji Dworeckiego [10]. Źródłem światła monochromatycznego o długości $\lambda = 632,8$ nm jest laser He-Ne. Rejestrowanie obrazów interferencyjnych (interferogramów) obszarów przymembranowych prowadzono przy pomocy kamery TV-CCD sprzężonej z komputerem wyposażonym w kartę przetwornika

obrazu (512×512, 8 bit, VIST) i specjalistyczne oprogramowanie. Owo oprogramowanie pozwala na akwizycję poszczególnych interferogramów z zadaniem interwałem czasowym oraz ich edycję. Podstawową funkcją oprogramowania jest analiza poszczególnych interferogramów polegająca na określaniu: grubości stężeniowych warstw granicznych, gradientów stężenia na membranie oraz profili stężeń. Układ membranowy stanowiły dwie szklane kuwety o wymiarach 7×10×65 mm, przedzielone membraną BioFill ustawioną w płaszczyźnie horyzontalnej.

Wybrane interferogramy odnoszące się do układu membranowego w konfiguracji A (kuweta nad membraną zawierała czystą wodę, kuweta pod membraną roztwór glukozy w 0,2 mol·l⁻¹ wodnym roztworze etanolu) przedstawiono na rys. 1. Na rys. 2. przedstawiono wybrane interferogramy odnoszące się do układu membranowego w konfiguracji B (kuweta nad membraną zawierała roztwory glukozy w 0,2 mol·l⁻¹ wodnym roztworze etanolu, natomiast kuweta pod membraną – czystą wodę). Kolejne interferogramy A – D przedstawione na rys. 1 i 2 zostały zarejestrowane po upływie 20 minut dla następujących różnic stężeń glukozy: $\Delta C = 0,02 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ (1A i 2A), $\Delta C = 0,0325 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ (1B i 2B) $\Delta C = 0,035 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ (1C i 2C) $\Delta C = 0,04 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ (1D i 2D). Zakrzywienia prążków interferencyjnych interferogramów przedstawionych na rys. 1 i 2 oznaczają, że w obszarach stężeniowych warstw granicznych zmiany stężeń są wyraźnie większe niż w pozostałej części roztworów. Obserwowane zmiany obszarów zakrzywień prążków zależą od początkowego stężenia roztworów i konfiguracji układu membranowego. Zaburzenia prążków interferencyjnych na interferogramach przedstawionych na rys. 1A i B oznaczają, że stężeniowe warstw graniczne uformowane po obydwu stronach membrany są hydrodynamicznie niestabilne. Pojawienie się owej niestabilności jest odzwierciedleniem stanów sprzyjających wystąpieniu w obszarach przymembranowych konwekcji grawitacyjnej, powodującej słabe mieszanie roztworów w układzie membranowym. Z kolei prążki interferencyjne na interferogramach 1 C-D pokazują, że stężeniowe warstwy graniczne stabilizują się wraz ze wzrostem różnicy stężeń glukozy.

Seria interferogramów dla konfiguracji B przedstawiona na rys. 2 ilustruje sytuację, w których stabilne hydrodynamicznie stężeniowe warstwy graniczne pojawiające się po obydwu stronach membrany mają inny charakter hydrodynamiczny niż warstwy dla tych samych stężeń roztworów w konfiguracji A. Z ukształtowania prążków interferencyjnych na interferogramie 2A wynika, że stężeniowe warstwy graniczne wytworzone po obydwu stronach membrany są stabilne hydrodynamicznie. Z kolei pojawienie się zaburzeń prążków interferencyjnych na interferogramach 2B-D oznacza, wystąpienie konwekcji grawitacyjnej w

obszarach przymembranowych, wywołującej słabe mieszanie roztworów. Intensywność tego mieszania rośnie ze wzrostem różnicy stężeń glukozy na membranie. Ponadto grubość stabilnych hydrodynamicznie stężeniowych warstw granicznych jest znacząco większa niż grubość warstw destabilizowanych przez konwekcję grawitacyjną.

Czasowe zależności grubości stężeniowych warstw granicznych uzyskano w oparciu o drugie równanie dyfuzji Ficka dla dwóch modeli membrany [14]. Szczegółowe rozważania na temat rozwiązań owego równania dla określonych modeli membrany, warunków początkowych i brzegowych są przedstawione w pracach [10,11,14]. W tej pracy przedstawimy jedynie pewne informacje ilustrujące procedurę konstruowania równania wykorzystywanego do obliczeń numerycznych. Jeśli membrana posiada infinitezymalną grubość, to warunki początkowe mają postać [14]

$$C(x, t = 0) = \begin{cases} C_{ol} & \text{dla } x < 0^- \\ C_{oh} & \text{dla } x > 0^+ \end{cases} \quad (4)$$

gdzie C_{ol} i C_{oh} oznaczają stężenia początkowe roztworu odpowiednio w kuwecie nad i pod membraną. Zgodnie z pracą [14] rozwiązaniem równania dyfuzji jest wyrażenie

$$C(x, t) = C_{ol} \frac{1 - \sigma}{2} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \quad \text{dla } x > 0^+ \quad (5)$$

gdzie D jest współczynnikiem dyfuzji substancji rozpuszczonej w rozpuszczalniku, σ jest współczynnikiem selektywności membrany dla substancji rozpuszczonej. Jeśli substancja rozpuszczona dyfunduje do czystego rozpuszczalnika, to grubość (δ) stężeniowej warstwy granicznej jest zdefiniowana następująco [14]

$$kC(x = 0, t) = C(x = \delta, t) \quad (6)$$

W powyższej definicji $x=0$ na powierzchni membrany. Korzystając z równań (5) i (6) otrzymuje się czasową zależność grubości stężeniowej warstwy granicznej znajdującej się pod membraną

$$\delta = a\sqrt{t} \quad (7)$$

gdzie współczynnik a zależy od D oraz k .

Na rys. 3. kwadraty ilustrują wyniki rekonstrukcji doświadczalnego stężeniowego profilu stężeniowego w stabilnym obszarze przymembranowym, przeprowadzonej na podstawie interferogramów obszarów $l_h^i/M/l_l^i$ dla wodnego roztworu etanolu o stężeniu $C=250 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$ i upływie 20 minut. Linia ciągła ilustruje profil stężeniowy obliczony na podstawie równania (5). Jak widać z rysunku rozbieżności pomiędzy profilami doświadczalnym i teoretycznym są mniejsze niż niepewności pomiarowe.

Na rys. 4 przedstawiono doświadczalną i teoretyczną charakterystykę $\delta = f(t)$, tj. zależność grubości stężeniowej warstwy granicznej od czasu. Owe zależności otrzymano przy pomocy analizy komputerowej interferogramów dla $C=250 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$ rejestrowanych po upływie różnych czasów. Z kolei krzywą teoretyczną uzyskano w dopasowania funkcji (5) do wyników doświadczalnych. Parametrem dopasowania jest $a = 2\sqrt{D}erfc^{-1}k^{-1}$ dla $k=0,03$ oraz $D=1,029\times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$.

PODSUMOWANIE

Membrana z celulozy bakteryjnej z membraną o małej selektywności w odniesieniu do substancji małowczątkowych. Jest natomiast półprzepuszczalna dla mikroorganizmów. Z tego powodu znalazła zastosowanie do leczenia trudno gojących się ran. Ponadto owa membrana ulega silnej polaryzacji stężeniowej, o czym świadczy zakrzywienie prążków interferencyjnych na interferogramach Macha-Zehndera. Ta właściwość może mieć istotne znaczenie w aspekcie medycznych aplikacji membran z celulozy bakteryjnej grubości nie przekraczającej w stanie uwodnionym $50 \mu\text{m}$.

LITERATURA

- [1] BAKER R.: Membrane technology and applications. J Wiley & Sons, New York, 2004.
- [2] KLEMM D., SCHUMANN D., UDHARDT U., MARSCH S.: Bacterial synthesized cellulose – artificial blood vessels for microsurgery. Prog. Polym. Sci. (2001), 26, 1561.
- [3] www.biofill.com.br
- [4] PITANGUY I., SALGADO F., MARACAJA P.F.: Utilization of the cellulose pellicule (Biofill) as a biological dressing. Rev. Bras. Cir. (1988), 78, 317.
- [5] KUCHARZEWSKI M., SKRZEKOWSAK-BARAN I., ŚLĘZAK A.: The cellulose membrane dressing application in treatment of chronic venous crural ulceration. Przeg. Flobolog. (2000), 8, 27.
- [6] ŚLĘZAK A., KUCHARZEWSKI M., FRANEK A, TWARDOKĘS W.: Evaluation of the efficiency of venous leg ulcer treatment with a membrane dressing. Med. Eng. Phys. (2004), 26, 53-60
- [7] ŚLĘZAK A., SIEROŃ A.: Zarys termodynamiki medycznej. α -medica press, Bielsko-Biała, 1998.
- [8] KATCHALSKY A., CURRAN P.F.: Nonequilibrium thermodynamics in biophysics. Harvard Univ. Press, Cambridge, 1965..
- [9] ŚLĘZAK A.: Irreversible thermodynamic model equations of the transport across a horizontally mounted membrane. Biophys. Chem. (1989), 34 91.
- [10] DWORECKI K.: Interferometric investigation of near-membrane diffusion layers. J. Biol. Phys. (1995), 21, 37.
- [11] DWORECKI K., WĄSIK S.: The investigation of time-dependent solute transport through horizontally situated membrane: the effect of configuration membrane system. J. Biol. Phys. (1997), 23,181.
- [12] ŚLĘZAK A., DWORECKI K., JASIK-ŚLĘZAK J., WĄSIK J.: Method to determine the critical concentration Rayleigh number in isothermal passive membrane transport processes. Desalination (2004), 168, 397.
- [13] ŚLĘZAK A., KUCHARZEWSKI M., SIEROŃ A., GOŁDA W., CIEŚLAR G.: Badanie właściwości osmotyczno-dyfuzyjnych opatrunku membranowego Bioproc. Polim Med (1998), 28, 3.
- [14] DWORECKI K., WĄSIK S, ŚLĘZAK A.: Temporal and spatial structure of the concentration boundary layers in a membrane system. Physica A (2003), 326, 360.

Adres autorów

Zakład Biologii i Biofizyki, Politechnika Częstochowska, Al. Armii Krajowej 19B, 42-200 Częstochowa, e-mail: ajslezak@zim.pcz.czest.pl

Tabela 1.

Wartości współczynników przepuszczalności hydraulicznej (L_p), odbicia (σ), przepuszczalności substancji rozpuszczonej (ω) oraz polaryzacji stężeniowej (ζ_s^A , ζ_s^B) membrany BioFill.

Substancja	Współczynnik				
	$L_p \times 10^{11} \text{ (m}^3\text{N}^{-1}\text{s}^{-1}\text{)}$	$\sigma \times 10^3$	$\omega \times 10^9 \text{ (mol}\cdot\text{N}^{-1}\text{s}^{-1}\text{)}$	ζ_s^A	ζ_s^B
Woda	3,6±0,1	-	-	-	-
Glukoza	-	8,6±0,2	6,5±0,2	0,03	0,66
Sacharoza	-	31,0±0,3	2,9±0,1	0,1	0,51
Etanol	-	2,3±0,1	1,5±0,08	0,49	0,16
NaCl	-	7,6±0,1	11,6±0,2	0,11	0,44
KCl	-	0,6±0,01	2,2±0,1	0,09	0,39
Dekstran	-	70,1±3	0,1±0,01	0,2	0,32

Podpisy pod rysunkami

Rys. 1. Interferogramy otrzymane dla roztworów glukozy w $0,2 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ wodnym roztworze etanolu dla konfiguracji A układu jedno-membranowego. Interferogram A otrzymano dla $\Delta C=0,02 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$, B: dla $-\Delta C=0,0325 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$, C: dla $-\Delta C=0,035 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$, D: dla $-\Delta C=0,04 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$. (Opracowano na podstawie [12])

Fig. 1. Interferograms obtained for glucose solutions in $0.2 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ aqueous solution of ethanol for configuration A of single-membrane system. Interferogram A was obtained for $\Delta C=0.02 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$, B: for $-\Delta C=0.0325 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$, C: for $-\Delta C=0.035 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$, D: for $-\Delta C=0.04 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$. (Elaborated on basis of [12])

Rys. 2. Interferogramy otrzymane dla roztworów glukozy w $0,2 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ wodnym roztworze etanolu dla konfiguracji B układu jedno-membranowego. Interferogram A otrzymano dla $\Delta C=0,02 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$, B: dla $-\Delta C=0,0325 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$, C: dla $-\Delta C=0,035 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$, D: dla $-\Delta C=0,04 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$. (Opracowano na podstawie [12])

Fig. 2. Interferograms obtained for glucose solutions in $0.2 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ aqueous solution of ethanol for configuration B of single-membrane system. Interferogram A was obtained for $\Delta C=0.02 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$, B: for $-\Delta C=0.0325 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$, C: for $-\Delta C=0.035 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$, D: for $-\Delta C=0.04 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$. (Elaborated on basis of [12])

Rys. 3. Doświadczalne (\square) i teoretyczne (linia ciągła) profile stężeniowe po czasie 1200 sekund dla różnicy stężeń etanolu $\Delta C=250 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$. (Opracowano na podstawie [14]).

Fig. 3. Experimental (\square) and theoretical (full line) concentrations profiles after 1200 seconds for concentration difference of ethanol $\Delta C=250 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$. (Elaborated on basis of [14]).

Rys. 4. Zależności grubości stężeniowych warstw granicznych (δ) od czasu (t) dla wodnego roztworu etanolu o stężeniu $\Delta C=250 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$: \square – punkty doświadczalne, linia ciągła oznacza zależność teoretyczną obliczoną na podstawie równania (7). (Opracowano na podstawie [14]).

Fig. 4. Time dependencies of the thicknesses concentrations boundary layers, $\delta=f(t)$ for aqueous solutions of ethanol at concentration $\Delta C=250 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$: \square – experimental results, full lines illustrates the theoretical dependence calculated on the basis of equation (7). (Elaborated on basis of [14]).