

# 2

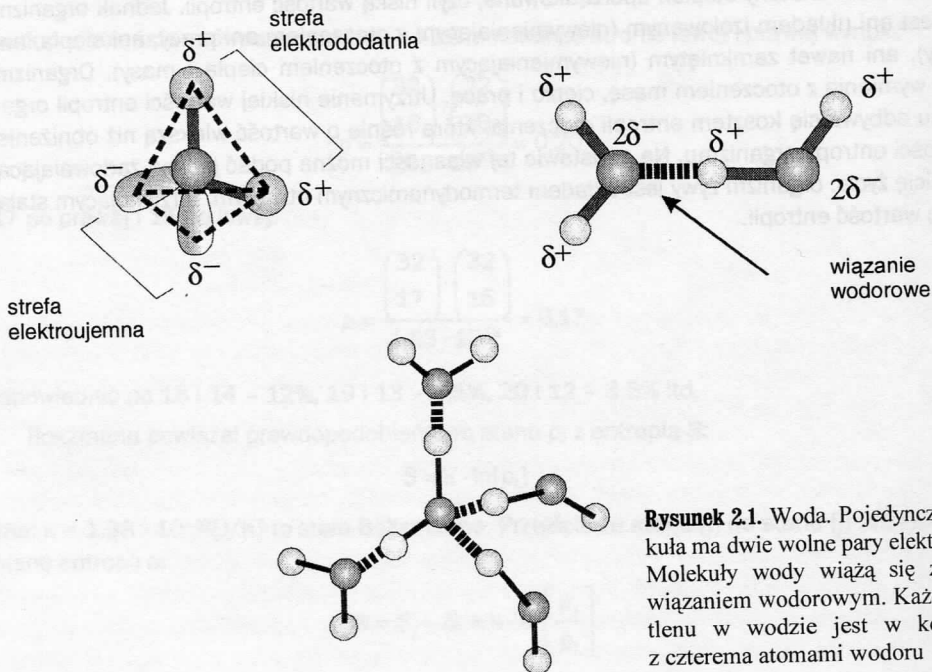
## TRANSPORT WODY I GAZÓW W ORGANIZMIE

### 2.1

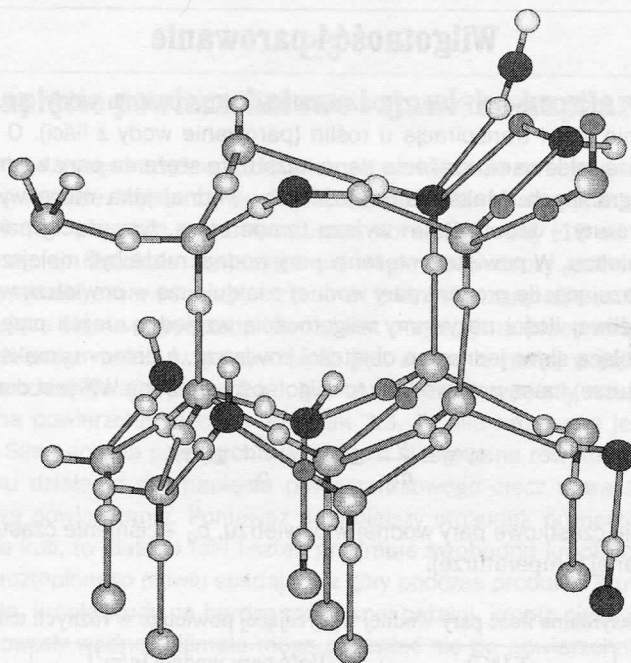
#### Struktura wody

Najpopularniejszą cieczą występującą na powierzchni Ziemi jest woda. Pewne własności wody wyróżniają ją spośród wszystkich innych cieczy. Topnieniu niemal wszystkich substancji towarzyszy powiększenie ich objętości, molekuły bowiem oddalają się od siebie na skutek zwiększenia ruchów termicznych. Woda jest wyjątkiem w tej ogólnej regule.

Anomalne własności wody są związane z jej budową przestrzenną. Atom tlenu wchodzący w skład wody ma dwie pary elektronowe oraz po jednym elektronie na dwu pozostałych orbitalach. Jeżeli wyobrazimy sobie atom tlenu znajdujący się w środku piramidy czworosiennej, to jego cztery pary elektronowe skierowane są w kierunku czterech wierzchołków piramidy. W dwóch wierzchołkach piramidy znajdują się dwa związane kowalencyjnie atomy wodoru, natomiast do wolnych par elektronowych przyłączają się wiązaniami wodorowymi następnne molekuły wody – rysunek 2.1. W wyniku połączenia wiązaniami wodorowymi każdej



molekuły wody z dwiema innymi molekułami tworzy się ażurowa struktura przestrzenna pokazana na rysunku 2.2. Ta ażurowa struktura jest charakterystyczna dla lodu. W miarę topnienia lodu pewne wiązania wodorowe zrywają się, a uwolnione molekuły wody wchodzą do wnętrza struktury. Towarzyszy temu zmiana gęstości z  $0,92 \text{ g/cm}^3 = 920 \text{ kg/m}^3$  dla lodu do  $999,841 \text{ kg/m}^3$  dla wody w  $0^\circ\text{C}$ . Różnica gęstości powoduje, że lód pływa po powierzchni wody. W przypadku większości substancji ciało stałe tonie w cieczy.



Rysunek 2.2. Przestrzenna ażurowa struktura molekuł wody w lodzie

Tabela 5. Zmiana gęstości wody wraz ze zmianami temperatury

T [°C]	Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]	T [°C]	Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]
0° lód	920	8°	999,86
0° woda	999,84	10°	999,70
2°	999,94	20°	998,20
4°	999,97	30°	995,65
6°	999,94	100°	958,35

W miarę wzrostu temperatury wody gęstość rośnie do  $4^\circ\text{C}$ , by dopiero przy temperaturach wyższych zacząć maleć – tabela 5. Ta anomalna własność wody umożliwia utrzymywanie w warstwach przydennych jezior i mórz temperatury  $4^\circ\text{C}$  (zarówno zimniejsza, jak i cieplejsza woda jest lżejsza i unosi się do góry). W miarę wzrostu temperatury ażurowa struktura wody ulega dezorganizacji. Struktura ta ulega również dezorganizacji pod wpływem rozpuszczających się w wodzie substancji, bowiem większość z nich ma zbyt duże rozmiary, aby zmieścić

się wewnątrz ażurowej struktury wody. Istnieją również nieliczne molekuly, które mieszczą się wewnątrz sieci wody stabilizują jej lodopodobną strukturę. Taką substancją jest np. alkohol etylowy. Zmieszanie wody z alkoholem prowadzi do zjawiska kontrakcji, czyli zmniejszenia objętości mieszaniny w porównaniu z sumą objętości substancji ją tworzących.

## 2.2

### Wilgotność i parowanie

Wiele zjawisk zachodzących w przyrodzie zależy od parowania wody, np. termoregulacja u zwierząt (pocenie się) i transpiracja u roślin (parowanie wody z liści). O ile w powietrzu znajduje się zawsze takie samo stężenie tlenu i azotu, to stężenie pary wodnej może wahać się w szerokich granicach. Maksymalna ilość pary wodnej jaka może wysycić powietrze zależy od temperatury – tabela 6. Im wyższa temperatura, tym więcej pary wodnej może znaleźć się w powietrzu. W powietrzu stężenie pary wodnej może być mniejsze od maksymalnego. Liczbę wskazującą, ile procent pary wodnej znajduje się w powietrzu w porównaniu do maksymalnej możliwej ilości nazywamy wilgotnością względną. Jeżeli przez  $m$  oznaczymy masę wody znajdującą się w jednostce objętości powietrza, a przez  $m_0$  maksymalną możliwą (w danej temperaturze) masę pary wodnej, to wilgotność względna  $W\%$  jest dana równaniem:

$$W\% = \frac{m}{m_0} \cdot 100\% = \frac{p}{p_0} \cdot 100\%$$

gdzie:  $p$  – ciśnienie cząstkowe pary wodnej w powietrzu,  $p_0$  – ciśnienie cząstkowe nasyconej pary wodnej (w danej temperaturze).

**Tabela 6.** Maksymalna ilość pary wodnej wysycającej powietrze w różnych temperaturach

T [°C]	Ilość pary wodnej [g/m <sup>3</sup> ]
-10	2,14
0	4,58
10	9,2
20	17,5
30	31,8
40	51,1
50	83,1

Miarę zdolności do parowania możemy zapisać również w formie energii, jaka powstaje w wyniku odparowania jednego mola wody  $\Delta E_{par.}$ :

$$\Delta E_{par.} = -RT \cdot \ln \left[ \frac{p}{p_0} \right]$$

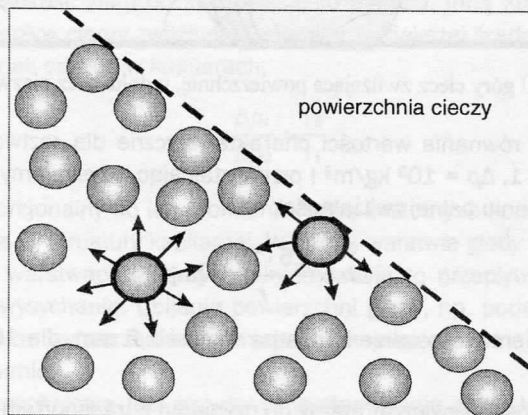
Im większa jest wilgotność względna, tym mniej energii jest wydzielane podczas parowania wody (tym trudniej jest odparować ciecz). Przy 100% wilgotności względnej tyle samo wody jest odparowywane z powierzchni ile się na niej kondensuje.

Jeżeli poddamy nienasyconą parę wodną ochłodzeniu, to wilgotność względna zaczyna rosnąć. Na przykład powietrze, które w temperaturze  $30^{\circ}\text{C}$  ma wilgotność względną 50% (zawierając 15,9 g pary wodnej w metrze sześciennym) po ochłodzeniu do około  $18^{\circ}\text{C}$  staje się nasycone parą wodną. Dalsze oziębianie powoduje, że para wodna staje się przesycona wodą i zaczyna się osadzać w formie kropelek na drobinach kurzu, jonach czy powierzchniach. W ten sposób powstaje rosa, kondensują krople deszczu, powstają chmury.

## 2.3

### Napięcie powierzchniowe i zjawiska kapilarne

Odległości międzycząsteczkowe w cieczach są wielokrotnie mniejsze niż odległości między cząsteczkami w gazie. Wystarczy porównać objętość zajmowaną przez mol pary wodnej ( $22,4\text{ l} - 0,0224\text{ m}^3$ ) i objętość zajmowaną przez mol ciekłej wody ( $18\text{ ml} - 0,000018\text{ m}^3$ ), czyli 1244 razy mniej. Molekuła znajdująca się we wnętrzu cieczy jest przyciągana siłami van der Waalsa symetrycznie ze wszystkich stron przez otaczające ją molekuly. Natomiast molekuła znajdująca się na powierzchni cieczy jest przyciągana przez inne molekuly cieczy o wiele silniej niż przez molekuly gazu, których jest znacznie mniej w jednostce objętości. Nierównomierne oddziaływanie powoduje powstanie wypadkowej siły wciągającej molekuly znajdujące się na powierzchni cieczy – rysunek 2.3. Ta siła nazywana jest napięciem powierzchniowym. Siła napięcia powierzchniowego jest skierowana równoległe do powierzchni cieczy. W wyniku działania siły napięcia powierzchniowego ciecz stara się osiągnąć najmniejszą możliwą powierzchnię. Ponieważ najmniejszy stosunek powierzchni do objętości jest osiągany dla kuli, to dlatego taki kształt przyjmuje swobodna kropla cieczy, np.: kropla deszczu, kropla roztopionego ołowiu spadająca z góry podczas produkcji śrutu, kropla rtęci na powierzchni szkła, kropla wody na bardzo rozgrzanej patelni, kropla cieczy w stanie nieważkości. Niektóre owady wodne i ślimaki mogą poruszać się po powierzchni wody, ponieważ siły napięcia powierzchniowego przeciwdziałające ugięciu powierzchni wody przewyższają nacisk spowodowany ciężarem zwierzęcia.



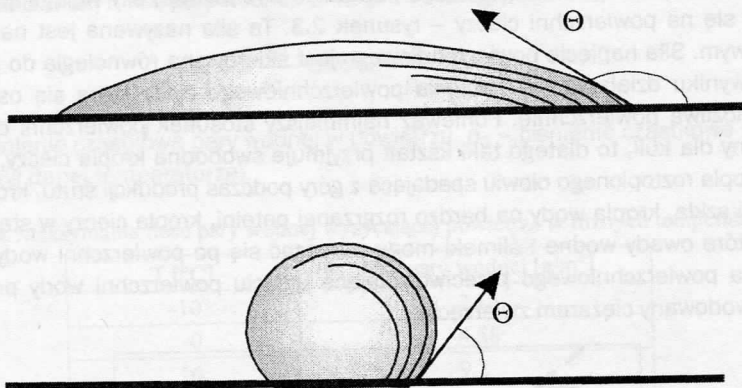
**Rysunek 2.3.** Siła napięcia powierzchniowego. Molekuła znajdująca się na powierzchni cieczy jest wciągana do jej wnętrza

Napięcie powierzchniowe cieczy zależy od budowy chemicznej ich molekuł. Woda ma bardzo wysokie napięcie powierzchniowe. Praktycznie każda substancja dodana do wody obniża jej napięcie powierzchniowe.

Kropla cieczy umieszczona na powierzchni ciała stałego (lub cieczy niemieszającej się) tworzy z tą powierzchnią kąt  $\theta$  – rysunek 2.4. Gdy kąt ten osiąga wartość bliską zeru, mówimy, że ciecz zwilża, a gdy kąt osiąga wartość bliską  $180^\circ$ , że nie zwilża powierzchni ciała stałego. Zwilżanie lub jego brak jest powodem występowania tzw. zjawisk kapilarnych, czyli zjawisk zachodzących w wąskich rurkach. Gdy przyciąganie pomiędzy molekułami cieczy i ciała stałego jest większe niż przyciąganie pomiędzy molekułami cieczy, ciecz w kapilarze wznosi się – rysunek 2.5. Ciśnienie działające w kapilarze o promieniu  $r$  wynosi  $\Delta p$  i jest równoważone ciśnieniem hydrostatycznym:

$$\Delta h = \frac{2\gamma_{cg} \cdot \cos\theta}{r \cdot \Delta\rho \cdot g}$$

gdzie:  $\Delta\rho$  to różnica gęstości cieczy i gazu (w przybliżeniu gęstość cieczy), a  $\Delta h$  wysokość wznoszenia cieczy w kapilarze. Gdy  $\theta > 90^\circ$ , czyli, gdy ciecz nie zwilża ciała stałego,  $\cos\theta < 0$ , a  $\Delta p < 0$ . Ujemna wartość ciśnienia oznacza, że ciecz (niezwilżająca) nie wnika do kapilary lub że wysokość słupa cieczy w kapilarze jest mniejsza niż wysokość cieczy w naczyniu.



**Rysunek 2.4.** Zwilżanie. U góry ciecz zwilżająca powierzchnię, u dołu ciecz niezwilżająca powierzchni

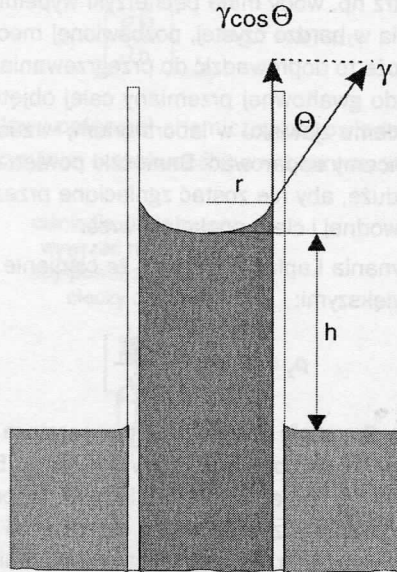
Podstawiając do równania wartości charakterystyczne dla roztworów wodnych:  $\gamma_{cg} = 0,073 \text{ N/m}$ ,  $\cos\theta = 1$ ,  $\Delta\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$  i przekształcając, uzyskujemy wartość wznoszenia kapilarnego przy założeniu pełnej zwilżalności:

$$\Delta h = \frac{1,5 \cdot 10^{-5}}{r} [\text{m}]$$

czyli: dla promienia  $1 \text{ cm}$  wznoszenie kapilarne wynosi  $1,5 \text{ mm}$ , dla  $10 \mu\text{m}$  –  $1,5 \text{ m}$ , a dla  $0,1 \mu\text{m}$  –  $150 \text{ m}$ .

W organizmach roślin i zwierząt mamy do czynienia z transportem cieczy w naczyniach kapilarnych. W organizmach roślin przepływ wody z solami mineralnymi następuje w rurkach ksylemu, które są pozbawionym cytoplazmy układem połączonych komórek. Ich średnica

wynosi od 20 do 400  $\mu\text{m}$ . Z równania możemy wyliczyć, że wznoszenie w kapilarach ksylemu wynosi od 75 mm do co najwyżej 1,5 m. Ponieważ drzewa osiągają znacznie większe wysokości, to możemy bez ryzyka popełnienia błędu stwierdzić, że kapilarność nie odgrywa większej roli w transporcie cieczy w ksylemie.



**Rysunek 2.5.** Właskowatość. Na skutek oddziaływań pomiędzy np. wodą i szkłem ciecz wznosi się wyżej w wąskich rurkach

Nieco inna sytuacja występuje w glebie, gdzie mamy do czynienia ze zbitymi cząstkami mineralnymi i organicznymi o bardzo różnym kształcie i rozmiarach od kilku milimetrów do około  $0,1 \mu\text{m}$ . Na skutek oddziaływań wody z ich powierzchnią woda wznosi się z cieków podziemnych na wysokość kilku do kilkudziesięciu metrów. Inną konsekwencją znoszenia kapilarnego jest przepływ cieczy zwilżającej z kapilar o większej średnicy do kapilar o mniejszej średnicy. Stosunek ciśnień w kapilarach:

$$\frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} = \frac{r_2}{r_1}$$

jest odwrotnie proporcjonalny do ich promieni. Jedną z istotnych konsekwencji przekopania gleby jest naruszenie jej struktury kapilarnej. W górnej warstwie gleby tworzą się pory o większej średnicy niż w warstwach głębszych. Uniemożliwia to przepływ wody do powierzchni gleby i utrudnia jej wysychanie. Ubijanie powierzchni gleby, np. podczas przejazdu maszyn rolniczych, prowadzi do wytworzenia najmniejszych kapilar na samej powierzchni gleby, co powoduje jej wysychanie.

Napięcie powierzchniowe jest przyczyną występowania zjawisk związanych z zakrzywieniem powierzchni. Ciśnienie pod zakrzywioną (wklęsłą) powierzchnią  $p_w$  jest większe niż ciśnienie nad wypukłą powierzchnią  $p_z$ . Zależność tę opisuje równanie Laplace'a:

$$p_w = p_z + \frac{2\gamma}{r}$$

gdzie:  $\gamma$  – napięcie powierzchniowe,  $r$  – promień pęcherzyka. Prawo Laplace'a dotyczy np. baniczek gazów w cieczach i kropelek wody w powietrzu. Zjawisko to powoduje, że bardzo trudno jest utworzyć wewnątrz np. wody małe pęcherzyki wypełnione parą wodną. Wskutek tego zapoczątkowanie wrzenia w bardzo czystej, pozbawionej mechanicznych zanieczyszczeń cieczy jest bardzo trudne. Może to doprowadzić do przegrzewania się cieczy powyżej jej temperatury wrzenia, a później do gwałtownej przemiany całej objętości w gaz, co przypomina wybuch. Przeciwdziałamy takiemu zjawisku w laboratorium, wrzucając kawałek niewypalanej porcelany do cieczy, którą chcemy odparować. Baniczki powietrza znajdujące się wewnątrz porcelany są wystarczająco duże, aby nie zostały zgniecione przez otaczającą ciecz. Do nich dołączają się molekuly pary wodnej i ciecz spokojnie wrze.

Inną konsekwencją równania Laplace'a jest to, że ciśnienie pary nad małymi kroplami cieczy jest większe niż nad większymi:

$$p_z = p \cdot \exp \left[ \frac{2\gamma V_m}{RT r} \right]$$

gdzie:  $V_m$  – objętość molowa,  $R$  – stała gazowa,  $T$  – temperatura w skali bezwzględnej. Nad kroplami o promieniu  $1 \mu\text{m}$  nadwyżka prężności pary wynosi w  $25^\circ\text{C}$  zaledwie  $0,1\%$ , ale nad bardzo małymi, np. o promieniu  $1 \text{ nm}$ , aż  $300\%$ . Takie małe kropelki, nawet jak się utworzą, mają tendencję do wyparowywania. Oznacza to, że czysta para wodna skrapla się bardzo trudno, chyba że początkiem tworzenia się kropli jest drobina kurzu (w deszczu) czy zjonizowana cząstka gazu.

## 2.4

### Ciśnienie osmotyczne

Błony biologiczne są błonami półprzepuszczalnymi, czyli takimi, przez które przechodzą tylko nieliczne molekuly, np. wody. Gdy po dwóch stronach błony stężenie substancji niezdołnych do przejścia przez nią jest różne, występuje zjawisko osmozy, czyli ukierunkowanego przepływu wody przez błonę. Przepływ wody zachodzi tak długo, aż wytworzona zostanie różnica ciśnień hydrostatycznych równoważąca ciśnienie osmotyczne – rysunek 2.6.

Ciśnienie osmotyczne zależy od ilości (stężenia) molekuł lub jonów substancji obecnych w roztworze i dane jest empirycznym równaniem van't Hoffa (1877) przypominającym równanie gazów doskonałych:

$$\pi = RT \sum c_i$$

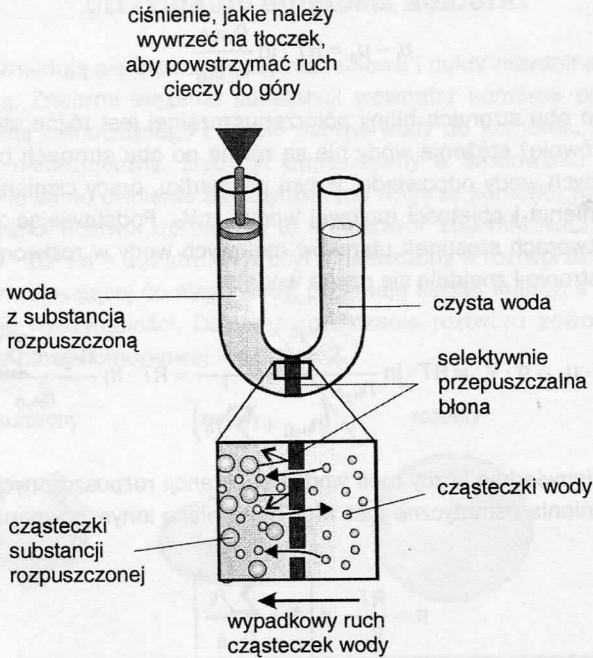
gdzie  $c_i$  to stężenia (dokładniej aktywności) wszystkich molekuł i jonów rozpuszczonych w wodzie.

Z punktu widzenia termodynamiki to nie różnica stężeń substancji rozpuszczonych, lecz różnica stężeń wody jest przyczyną jej przepływu przez błonę. Ścisłe przedstawienie tej zależności wymaga wprowadzenia pojęcia entalpii swobodnej  $\Delta G$ , która w stałej temperatu-

rze i pod stałym ciśnieniem jest równa maksymalnej pracy użytecznej. W zagadnieniach transportu w roztworze i transportu przez błonę istotną rolę odgrywa pojęcie potencjału chemicznego  $\mu$ . Potencjał chemiczny jest funkcją stanu i ma wymiar energii. Najpopularniejsza forma zapisu potencjału chemicznego to:

$$\mu_i = \left( \frac{\partial G}{\partial n_i} \right)_{T,p,n_j} = \mu_i^0 + RT \ln c_i$$

gdzie:  $\mu_i^0$  to tzw. standardowy potencjał chemiczny odpowiadający rozpuszczonej  $i$ -tej substancji w stężeniu (lub precyzyjniej o aktywności)  $c = 1$  mol na liter, a  $R$  to stała gazowa.



**Rysunek 2.6.** Ciśnienie osmotyczne. Przez błonę półprzepuszczalną woda przenika ze środowiska, w którym jest mniej substancji rozpuszczonych, do środowiska, gdzie stężenie jest większe. Napływająca woda powoduje wzrost ciśnienia hydrostatycznego

Dla wystąpienia stanu równowagi transportu w roztworze lub przez błonę jest konieczne, aby w każdym miejscu roztworu istniała równość potencjałów chemicznych dla każdej molekuly lub jonu:

$$\mu_i' = \mu_i''$$

gdzie oznaczenia „'” i „''” oznaczają dwa miejsca w roztworze lub roztwory po obu stronach błony. W warunkach równowagi równość potencjałów chemicznych musi dotyczyć każdego składnika roztworu.



Różnica potencjałów chemicznych  $\Delta\mu$  jest miarą energii odsunięcia układu od stanu równowagi:

$$\Delta\mu_i = \mu_{i1} - \mu_{i2} = RT \ln \frac{c_{i1}}{c_{i2}}$$

Różnica potencjałów chemicznych zanika, gdy stężenia roztworów zrównują się lub gdy różnica energii jest skompensowana mechanicznie przez zmianę ciśnienia ( $V\Delta p$ ), np. osmotycznego, przez zmianę energii powierzchniowej (wytworzenie dodatkowej powierzchni) lub w przypadku cząsteczek naładowanych elektrycznie w formie wytworzenia potencjału elektrycznego.

Różnica potencjałów chemicznych wody po obu stronach błony półprzepuszczalnej jest dana równaniem:

$$\mu_I - \mu_{II} = RT \cdot \ln \frac{c_{I, H_2O}}{c_{II, H_2O}}$$

Gdy w roztworze po obu stronach błony półprzepuszczalnej jest różne stężenie substancji rozpuszczonej, to również stężenia wody nie są równe po obu stronach błony. Różnica potencjałów chemicznych wody odpowiada, w tym przypadku, pracy ciśnienia osmotycznego, czyli iloczynowi ciśnienia i objętości molowej wody -  $\pi V_w$ . Podstawiając zamiast stosunku stężeń wody w roztworach stosunek ułamków molowych wody w roztworach, otrzymujemy (zakładając, że po stronie I znajduje się czysta woda):

$$\mu_I - \mu_{II} = \pi \cdot V_w = RT \cdot \ln \frac{\frac{n_{H_2O}}{n_{H_2O}}}{\frac{n_{H_2O}}{n_{H_2O} + \sum n_i}} = RT \cdot \ln \frac{n_{H_2O} + \sum n_i}{n_{H_2O}}$$

gdzie:  $n$  oznacza odpowiednio liczby moli wody i substancji rozpuszczonych. Dokładne równanie opisujące ciśnienie osmotyczne jest więc dane nieco innym równaniem niż równanie van't Hoffa:

$$\pi = \frac{RT}{V_w} \cdot \ln \left[ 1 + \frac{\sum n_i}{n_{H_2O}} \right]$$

Równania te są jednak bardzo bliskie sobie. Biorąc pod uwagę znaną z matematyki zależność - prawdziwą dla niewielkich wartości  $x$ :

$$\ln[1+x] \approx x$$

oraz że stężenie  $c$  z definicji równe jest:

$$c_i = \frac{n_i}{V_w \cdot n_{H_2O}}$$

otrzymujemy:

$$\pi = \frac{RT}{V_w} \cdot \ln \left[ 1 + \frac{\sum n_i}{n_{H_2O}} \right] \approx \frac{RT}{V_w} \cdot \frac{\sum n_i}{n_{H_2O}} = RT \sum c_i$$

Do opisu transportu wody w roślinach zamiast potencjałów chemicznych wody używane jest pojęcie potencjału wodnego  $\varphi_w$ . Potencjał wodny, ciśnienie osmotyczne i różnica potencjałów chemicznych wody są powiązane między sobą następującym równaniem:

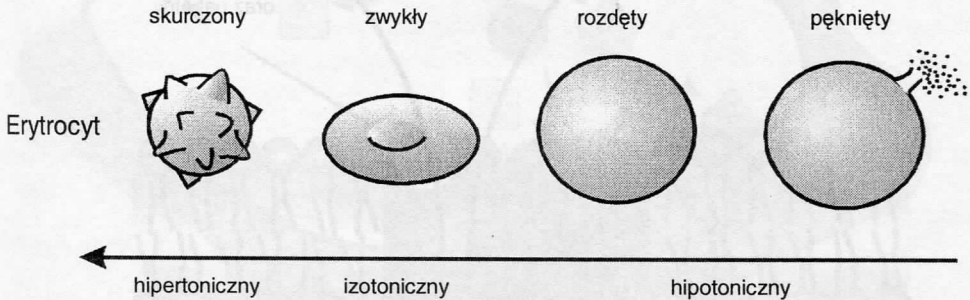
$$\pi = \frac{\Delta\mu}{V_w} = -\varphi_w$$

Potencjał wodny ma wymiar ciśnienia.

## 2.5

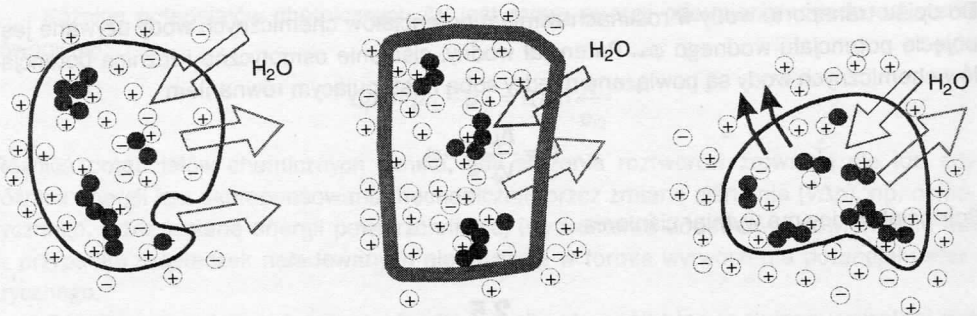
### Utrzymanie objętości komórki

W komórce znajdują się białka, kwasy nukleinowe i cukry niezdolne do przejścia przez błonę komórkową. Znaczne stężenie substancji wewnątrz komórek powoduje powstanie wysokiego ciśnienia osmotycznego i szybki napływ wody do komórek. Napływ wody może być dla komórki niebezpieczny. Erycyt umieszczony w środowisku izotonicznym (czyli posiadającym takie samo ciśnienie osmotyczne jak wewnątrz komórki) ma kształt podwójnie spłaszczonego dysku. Roztwór izotoniczny to np. roztwór 150 mM NaCl, który ma ciśnienie osmotyczne  $3,65 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 3,6 \text{ atm}$ . Erycyt umieszczony w roztworze o stężeniu 100 mM NaCl, na skutek napływającej do niego wody, przyjmuje kształt kulisty, a jego błona staje się napięta do granic wytrzymałości. Dalsze rozcieńczanie roztworu powoduje dalszy napływ wody i rozerwanie błony komórkowej – rysunek 2.7.



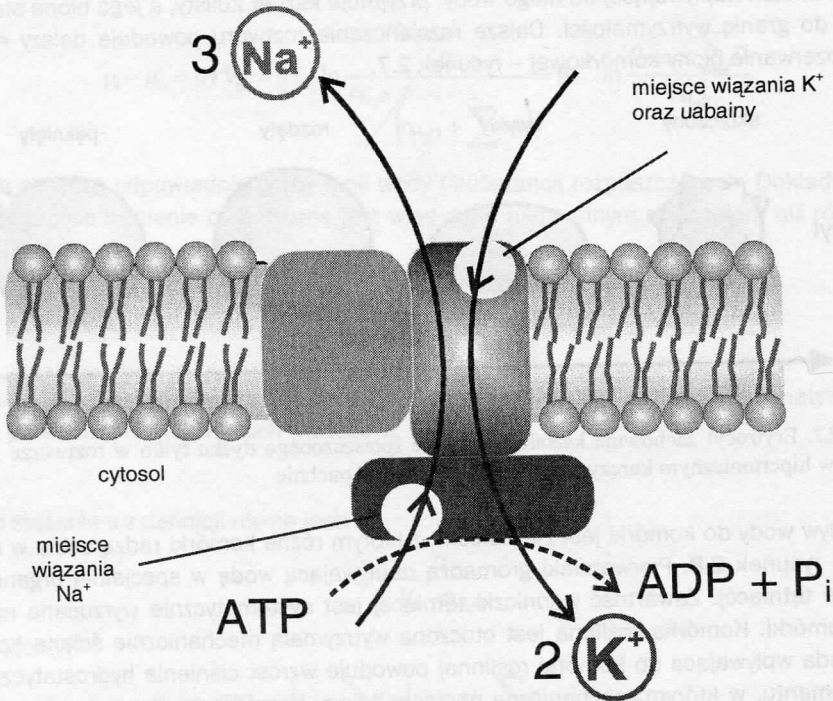
**Rysunek 2.7.** Erycyt zachowuje kształt podwójnie spłaszczonego dysku tylko w roztworze izotonicznym, w hipertonicznym kurczy się, a w hipotonicznym puchnie

Napływ wody do komórki jest zjawiskiem, z którym różne komórki radzą sobie w różny sposób – rysunek 2.8. Pierwotniaki gromadzą napływającą wodę w specjalnej organelli – wodniczce tętniącej. Zawartość wodniczki tętniącej jest systematycznie wyrzucana na zewnątrz komórki. Komórka roślinna jest otoczona wytrzymałą mechanicznie ścianą komórkową. Woda wpływająca do komórki roślinnej powoduje wzrost ciśnienia hydrostatycznego aż do momentu, w którym mechaniczne napięcie ściany komórkowej (turgor) zrównoważy różnicę ciśnień osmotycznych. Komórka zwierzęca wykorzystuje specjalną molekułę wbudowaną w błonę komórkową nazywaną pompą sodowo-potasową.



**Rysunek 2.8.** Komórki przeciwdziałają osmotycznemu napływowi wody: pierwotniaki wyrzucają jej nadmiar wodniczką tętniącą, komórki roślin mają wytrzymałą ścianę komórkową, komórki zwierząt wyrzucają z komórki jony

Pompa sodowo-potasowa - rysunek 2.9 - jest obecna w błonie większości komórek zwierzęcych. Mechanizm jej działania polega na usuwaniu trzech jonów sodu z komórki przy jednoczesnym wpompowaniu do wnętrza komórki dwóch jonów potasu. Taka wymiana jonów jest niekorzystna energetycznie i aby mogła zachodzić, do układu musi być dostarczona energia. Energia potrzebna pompie sodowo-potasowej pochodzi z hydrolizy molekuly ATP

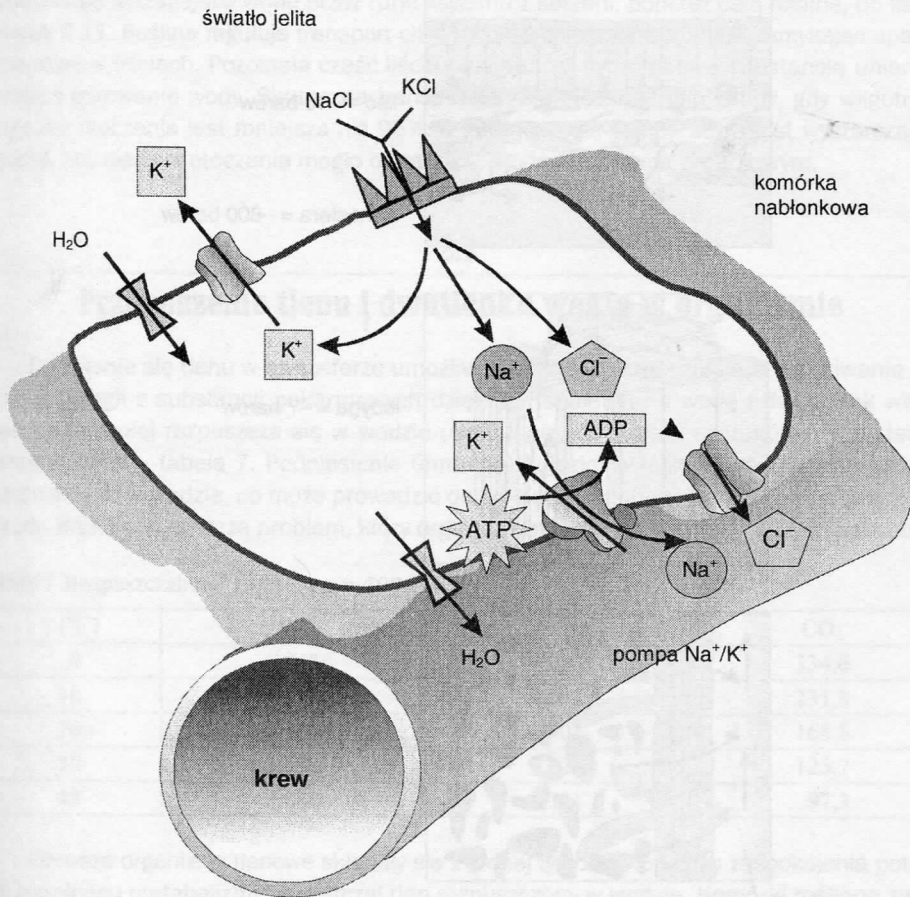


**Rysunek 2.9.** Pompa sodowo-potasowa wyrzuca z komórki, w każdym cyklu, 3 jony sodu w zamian za dwa jony potasu. Energii do tego procesu dostarcza hydroliza jednej molekuly ATP

wiąże  
sodo  
wewn  
-pota  
międ  
w roz  
dzie  
nie p  
  
szero  
ne w  
krwi  
  
Rysun  
jelita  
krwi.

wiążącej się z molekułą pompy w trakcie każdego cyklu pracy. W wyniku działania pompa sodowo-potasowa powoduje (netto) usuwanie jonów z wnętrza komórki, zmniejszając wewnętrzne ciśnienie osmotyczne komórki. Ubocznym skutkiem działania pompy sodowo-potasowej jest wytworzenie dużych różnic w składzie jonowym wnętrza komórki i roztworu międzykomórkowego. W komórce dominują jony  $K^+$ , a jonów  $Na^+$  jest niewiele, podczas gdy w roztworze międzykomórkowym jest dużo więcej jonów sodu niż potasu. Ta różnica w składzie jonowym wnętrza komórki odpowiada za zjawiska współtransportu oraz za powstawanie potencjału dyfuzyjnego na błonie komórkowej.

Wypompowywanie wody za pomocą zmian ciśnienia osmotycznego jest wykorzystywane szeroko w komórkach i tkankach zwierzęcych. W nabłonku jelita grubego jednocześnie aktywne wchłanianie jonów  $Na^+$  i  $Cl^-$  prowadzi do przepompowywania wody ze światła jelita do krwi - rysunek 2.10.

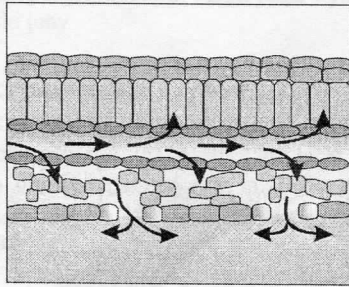


**Rysunek 2.10.** Transport soli i wody z jelita do krwi. Transporter  $NaK_2Cl$  przepompowuje sole ze światła jelita do komórki nabłonkowej. Za solami wędruje woda. Pompa sodowo-potasowa wyrzuca sód do krwi. Jony chloru transportowane są kanałami chlorkowymi. Woda wędruje za wyrzuconymi solami

2.6

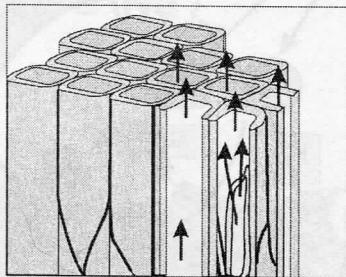
**Transport wody w roślinach**

W organizmach roślin wznoszenie wody z solami mineralnymi zachodzi w rurkach ksylemu, które (z punktu widzenia biofizyki) są pozbawionym cytoplazmy układem połączonych ścian komórkowych pokrytych substancją uszczelniającą. Prędkość przepływu cieczy w rurkach ksylemu można zmierzyć, ogrzewając przepływającą ciecz małą grzałką wprowadzoną do wnętrza rurki i mierząc czas, po jakim ogrzana ciecz dociera do mikrotermometru znajdującego się ponad grzałką. Prędkość przepływu cieczy w rurkach ksylemu wynosi od 0,0001 do 0,04 m/s, co oznacza, że gradient ciśnienia, jakie wymusza ruch cieczy wynosi  $1-2 \cdot 10^4$  Pa/m.

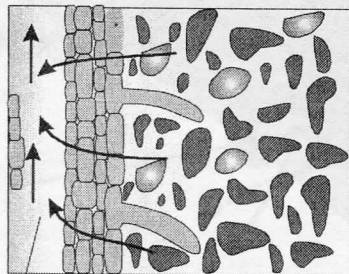


liść = -15 barów

atmosfera = -800 barów



łodyga = -7 barów



roztwór glebowy = -1 bar

korzeń = -4 bary

**Rysunek 2.11.** Do wyciągnięcia wody z gleby oraz jej przetransportowania przez łodygę i liście potrzebna jest energia dostarczana przez parowanie wody z liścia przez aparat szparkowy

W roślinie istnieją dwie siły mogące wygenerować takie ciśnienie – siły osmotyczne powstające w korzeniach oraz siły związane z transpiracją, czyli parowaniem wody z liści. Ciśnienie osmotyczne generowane w korzeniach spowodowane jest rozcieńczeniem zgromadzonego tam cukru wodą. Maksymalne ciśnienie osmotyczne, odpowiadające różnicy stężeń pomiędzy czystą wodą i stężonym roztworem wynosi  $2 \cdot 10^6$  Pa. Wartość ta jest wyższa niż obserwowana wielkość parcia korzeniowego w roślinach –  $1+6 \cdot 10^5$  Pa. Należy sądzić, że ciśnienie osmotyczne wymusza przepływ bogatych w cukier cieczy z liści w dół rośliny przez połączone ze sobą komórki floemu, natomiast osmotyczna metoda transportu wody wykorzystywana jest wyjątkowo na wiosnę (gdy nie ma liści). Do aktywnego pompowania wody za pomocą ciśnienia osmotycznego zużywana jest duża ilość energii, ponieważ rozcieńczony cukier musi być ponownie zateżony, zanim będzie użyty powtórnie. Dlatego roślina wykorzystuje do podnoszenia pobieranej przez korzenie wody transpirację. Do odparowania wody z liścia zużywane jest ciepło pochodzące z otoczenia. Transpiracja wody z liścia wytwarza wielkie podciśnienie wyciągające wodę przez rurki ksylemu z korzeni, poprzez całą roślinę, do liści – rysunek 2.11. Roślina reguluje transport cieczy w ksylemie, otwierając lub zamykając aparaty szparkowe w liściach. Pozostała część liścia pokryta jest hydrofobową substancją uniemożliwiająca parowanie wody. Skuteczna transpiracja jest możliwa tylko wtedy, gdy wilgotność względna otoczenia jest mniejsza niż 95%, a jednocześnie temperatura jest wystarczająco wysoka, aby ciepło z otoczenia mogło odparować wodę w aparacie szparkowym.

## 2.7

### Przenoszenie tlenu i dwutlenku węgla w organizmie

Pojawienie się tlenu w atmosferze umożliwiło znacznie skuteczniejsze uzyskiwanie użytecznej energii z substancji pokarmowych dzięki ich spalaniu na wodę i dwutlenek węgla. Tlen nie najlepiej rozpuszcza się w wodzie (choć lepiej od azotu), szczególnie w wyższych temperaturach – tabela 7. Podniesienie temperatury jezior w lecie powoduje zmniejszenie stężenia tlenu w wodzie, co może prowadzić do śmierci ryb pobierających tlen bezpośrednio z wody. Brak tlenu stwarza problem, który organizmy rozwiązują na wiele różnych sposobów.

Tabela 7. Rozpuszczalność gazów w g w 100 g wody

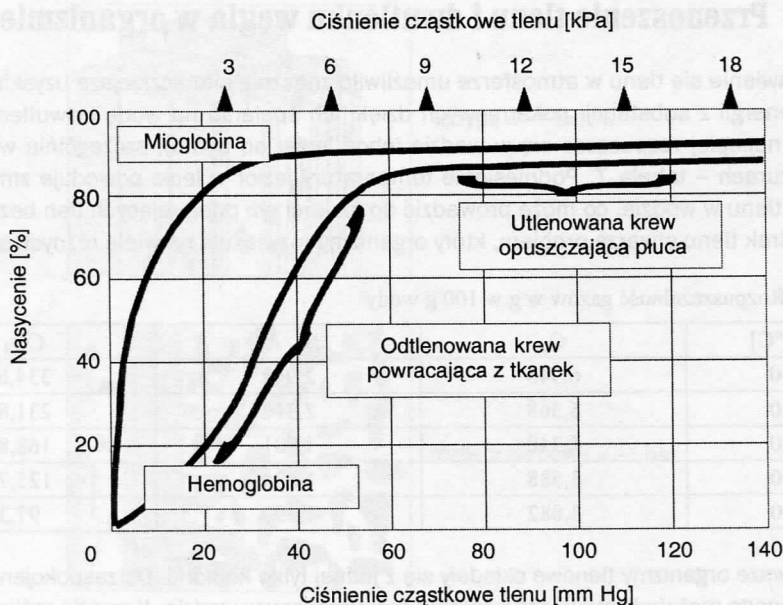
T [°C]	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> , Ar	CO <sub>2</sub>
0	6,945	2,942	334,6
10	5,368	2,312	231,8
20	4,340	1,901	168,8
30	3,588	1,624	125,7
40	3,082	1,391	97,3

Pierwsze organizmy tlenowe składały się z jednej tylko komórki. Do zaspokojenia potrzeb ich powolnego metabolizmu wystarczał tlen rozpuszczony w wodzie. Komórki roślinne zawierające chlorofil w nocy zużywają tlen, który produkują w dzień podczas fotosyntezy. Szybkość metabolizmu roślin jest wolna, a ich zapotrzebowanie na tlen niewielkie. Roślinom wystarcza ilość tlenu docierająca do ich komórek na drodze dyfuzji. Jeżeli jednak roślinę lądową (a czasami

tylko jej korzenie) zanurzymy w wodzie (gdzie stężenie tlenu jest niskie), to ulega ona „utopieniu” i ginie w podobny sposób (choć mniej gwałtowny) jak zwierzęta lądowe.

Pierwsze tlenowe organizmy wielokomórkowe były prawdopodobnie tak małe, że ilość tlenu dyfundująca przez kilka zaledwie warstw komórek była wystarczająca do podtrzymania metabolizmu. Przy dalszym wzroście organizmu ilość tlenu dyfundująca przez powierzchnię ciała staje się niewystarczająca. Oczywiście zwierzęta lądowe mają dostęp do znacznie większego stężenia tlenu niż zwierzęta wodne, ale jeżeli są duże, bardzo aktywne i mają szybki metabolizm, to ilość tlenu docierającego do ich organizmu przez powierzchnię zewnętrzną staje się zbyt mała. Rozwiązaniem ewolucyjnym tego problemu są np. przetchlinki u owadów, doprowadzające powietrze do wnętrza ciała. Innym rozwiązaniem tego zagadnienia są skrzela zwierząt wodnych, przez które przepływa woda bogata w tlen. Najdoskonalszym rozwiązaniem ewolucyjnym służącym dostarczaniu tlenu do organizmu są płuca połączone z krwiobiegiem wymuszonym przez serce.

Tlen słabo rozpuszcza się w wodzie i tylko dzięki hemoglobinie wiążącej się z tlenem może być przenoszony do wnętrza ciała w większym stężeniu. Innym białkiem gromadzącym tlen jest mioglobina znajdująca się w mięśniach, która nasycy się tlenem już przy bardzo małym ciśnieniu parcjalnym tlenu – rysunek 2.12. Przy ciśnieniu parcjalnym wynoszącym 2,7 kPa mioglobina jest nasycona tlenem w 80%. W przeciwieństwie do mioglobiny, hemoglobina nasycy się tlenem przy wyższym ciśnieniu parcjalnym tlenu (w 80% przy ciśnieniu parcjalnym 6,7 kPa).



**Rysunek 2.12.** Hemoglobina z erytrocytów nasycy się tlenem przy dużym ciśnieniu parcjalnym (w płucach) i oddaje tlen (w mięśniach) przy niskich stężeniach parcjalnych. W mięśniach tlen wiązany jest przez mioglobinę

W tabeli 8 podano ciśnienia parcjalne gazów na kolejnych etapach transportu tlenu i dwutlenku węgla w organizmie ludzkim. Tlen dostaje się do organizmu w pęcherzykach płucnych, gdzie krew przepływa odgradzona cienką strukturą błoniastą od powietrza.

Tabela 8. Ciśnienia parcjalne gazów w powietrzu, płynach ustrojowych i tkankach

Gazy	Atmosfera [kPa]	Pęcherzyki płucne [kPa]	Krew tętnicza [kPa]	Krew żylna [kPa]	Tkanki [kPa]
O <sub>2</sub>	21,0	13,3	12,6	5,3	4,0
CO <sub>2</sub>	0,04	5,3	5,3	6,1	6,1

ona „uto-  
e, że ilość  
trzymania  
wierzchnię  
znaczenie  
ne i mają  
zchnię ze-  
rzetchlinki  
zagadnie-  
konalszym  
połączone  
z tlenem  
madzącym  
rzy bardzo  
noszącym  
iny, hemo-  
y ciśnieniu

parcjalnym  
tlen wiąza-