

Wydatki energetyczne a wysiłek fizyczny

Każdy organizm wymaga energii do swego funkcjonowania. **Całkowite wydatki energetyczne, inaczej całkowite tempo metabolizmu**, to ilość energii, jaka jest zużywana na wszystkie czynności wykonywane w ciągu doby. Są to nie tylko procesy przebiegające na poziomie komórkowym, ale również takie procesy jak sen, jedzenie, czy aktywność fizyczna.

Metabolizm to przemiana materii i energii zachodząca w organizmach żywych. Tworzą go procesy anaboliczne i kataboliczne, które się nawzajem warunkują i zachodzą jednocześnie.

Anabolizm to procesy syntezy związków wielkocząsteczkowych z małowcząsteczkowych wymagające dostarczenia energii w postaci ATP; zwykle są to reakcje redukcji.

Katabolizm to procesy rozpadu czyli tworzenia związków małowcząsteczkowych z wielkocząsteczkowych, dostarczające energii w postaci wysokoenergetycznych wiązań czyli związków takich jak: ATP, GTP, CTP, UTP, ITP, fosfokreatyna, koenzym A. Związki te są bezpośrednimi dawcami energii dla procesów życiowych (energia uwalniana jest w trakcie ich hydrolizy) natomiast węglowodany, tłuszcze i białka są dawcami pośrednimi.

Na całkowite wydatki energetyczne składają się:

1/ Podstawowe tempo metabolizmu (Basal Metabolic Rate, BMR): Jest to ilość energii niezbędna do utrzymania podstawowych funkcji życiowych (utrzymanie potencjału spoczynkowego błon komórkowych, zmiany biochemiczne, obrót białek, itp.) Jej ilość należy zmierzyć u osoby znajdującej się w spokoju fizycznym i psychicznym (a więc nie wykonującej pracy fizycznej i umysłowej), w neutralnej temperaturze otoczenia i w stanie post-absorbcyjnym (na czczo). Jeśli warunek temperatury lub stanu post-absorbcyjnego nie jest zachowany to mówimy nie o podstawowym, ale o spoczynkowym tempie metabolizmu (Resting Metabolic Rate; RMR). BMR jest stosunkowo stałe u poszczególnych osób, ale znacznie różni się pomiędzy różnymi osobami, ponieważ zależy m.in. od wieku, płci i beztłuszczowej masy ciała (free fat mass; FFM). Człowiek z wyższą proporcją FFM (a więc niższą zawartością tkanki tłuszczowej) ma wyższe BMR. BMR obniża się też z wiekiem w związku z ubytkiem masy mięśniowej i ogólnym spadkiem aktywności.

2/ Termogeneza indukowana dietą (Diet-Induced Thermogenesis; DIT): Przyjmowanie pokarmu podnosi tempo metabolizmu, ponieważ angażuje wzrost aktywności układu nerwowego oraz procesy związane z trawieniem i wchłanianiem pokarmu. Część energii przyjętej w formie pokarmu jest rozpraszana w formie ciepła, a pozostała przekształcana jest w inne formy energii (np. energię mechaniczną).

3/ Aktywność: jej poziom jest wysoce zmienny i znacząco wpływa na tempo metabolizmu.

Wydatki energetyczne są przeważnie mierzone w kilodżulach (kJ) lub kilokaloriach (kcal; **1 cal = 4,184 J**). Przeciętny człowiek zużywa w ciągu doby 1500 - 3500 kcal (6000 - 13000 kJ). Dla porównania, wydatki energetyczne kolarza Tour de France to 6,000 kcal (24000 kJ). Jeśli wydatki energetyczne przewyższają ilość energii dostarczanej z pokarmem to organizm traci masę ciała; w przeciwnym przypadku zwiększa masę ciała.

Źródła energii

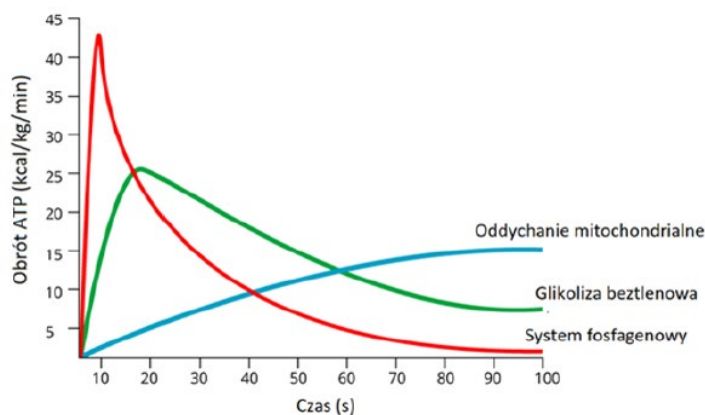
W organizmie człowieka energia może pochodzić z:

- Adenozyno-5'-trifosforanu (ATP)
- Fosforanu kreatyny (fosfokreatyny)
- Glukozy (preferowane źródło energii ośrodkowego układu nerwowego)
- Glikogenu
- Kwasów tłuszczowych (zgromadzonych w trójglicerydach)
- Aminokwasów budujących białka

Organizm uzyskuje energię zarówno w procesach tlenowych, jak i beztlenowych.

Trzy systemy jednocześnie wytwarzające energię zachodzące na siebie i tworzą tzw. **kontinuum energetyczne** (Rycina 1) dzięki czemu bez przerwy dostarczają organizmowi energii potrzebnej do wykonywania codziennych czynności i dodatkowej pracy. Te trzy systemy to:

- System fosfagenowy (ATP, fosfokreatyna)
- Glikoliza (system anaerobowy)
- Oddychanie mitochondrialne (system aerobowy=tlenowy)



Rycina 1. Systemy energetyczne – kontinuum.

Energia pochodząca z tych systemów różni się szybkością uzyskiwania i wydajnością. System fosfagenowy dostarcza energii najszybciej, ale jest jej najmniej i starcza na najkrótszy czas. Z kolei najwięcej energii, ale za to w najwolniejszym tempie, dostarcza oddychanie mitochondrialne.

- W spoczynku komórki mięśniowe zawierają tylko niewielką ilość ATP, która wystarcza na ok. 2 sekundy ćwiczeń.
- Energia uwolniona z szybkiego rozkładu fosforanu kreatyny powoduje odnowę zasobów ATP, które wystarczają na kolejne 10 - 15 sekund pracy.
- Następnie glikoliza beztlenowa dostarcza ATP przez około 60 sekund.
- W miarę kontynuowania ćwiczeń, metabolizm tlenowy przejmuje rolę głównego dostawcy energii we włóknach wolno-kurczliwych (czerwonych, typu I).

Chociaż w czasie metabolizmu tlenowego wytwarzane jest około 18 razy więcej ATP z jednej cząsteczki glukozy niż podczas glikolizy beztlenowej, to jest on wolniejszy. Tym samym metabolizm tlenowy nie nadaje się do sytuacji, w których wymagany jest szybki, wysoki poziom aktywności mięśni.

Wysiłek fizyczny może mieć charakter aerobowy (tlenowy) lub anaerobowy (beztlenowy). Koszt wysiłku tlenowego może być określony za pomocą **kalorymetrii pośredniej**, czyli na podstawie tempa zużycia tlenu (L/min). Dwa kluczowe czynniki wpływające na zużycie tlenu, a tym samym na skład wydychanego powietrza, to zapotrzebowanie tkanek na tlen oraz tempo wentylacji płuc. Mierząc skład i objętość wydychanych gazów możemy określić energetyczny koszt aktywności fizycznej. W czasie maksymalnych wysiłków fizycznych wentylacja płuc wzrasta z 5-6 L/min nawet do 140-200 L/min.

Wydatki energetyczne w czasie wysiłku

Praca mechaniczna w jednostce czasu to moc. Jej jednostką w układzie SI jest wat (**1 W = J/s**). 1 wat (1 W) to moc, przy której praca wykonana w ciągu jednej sekundy (1 s) jest równa jednemu dżulowi (1 J).

Dzięki metodzie kalorymetrii pośredniej możemy określić wydatki energetyczne w czasie tlenowego wysiłku fizycznego. Możliwe jest to dzięki zależności między ilością zużytego tlenu a powstającą energią. Tzw. **równoważnik energetyczny tlenu** mówi, że przy zużyciu 1 litra tlenu powstaje ~20 kJ energii cieplnej, bez względu na rodzaj utlenianej substancji. Należy jednak pamiętać, że do utlenienia 1 g substancji potrzebne są różne ilości tlenu oraz z każdego grama utlenianej substancji powstają różne ilości energii (Tabela 1).

Tabela 1. Zależność między rodzajem substancji a ilością uzyskiwanej energii

Substancja	Ilość wytworzonego ciepła (kJ/L O ₂)	Ilość potrzebnego tlenu (LO ₂ ·g ⁻¹)	Wartość energetyczna (kJ·g ⁻¹)
Węglowodan	20,92	0,84	17,57
Tłuszcz	19,66	2,0	39,33
Białko (mocznik)	18,83	0,96	17,99

Określenie substratów energetycznych

Ponieważ w celu produkcji ATP utleniane są związki dostarczające energii (węglowodany i tłuszcze) to zużycie tlenu rośnie. Znając ilość pobieranego tlenu i ilość wydychanego dwutlenku węgla możemy obliczyć **współczynnik wymiany oddechowej (RER)**. Jest to stosunek objętości wytworzonego dwutlenku węgla (CO₂) do objętości zużytego tlenu (O₂) w jednostce czasu.

$$\text{RER} = \text{VCO}_2 / \text{VO}_2$$

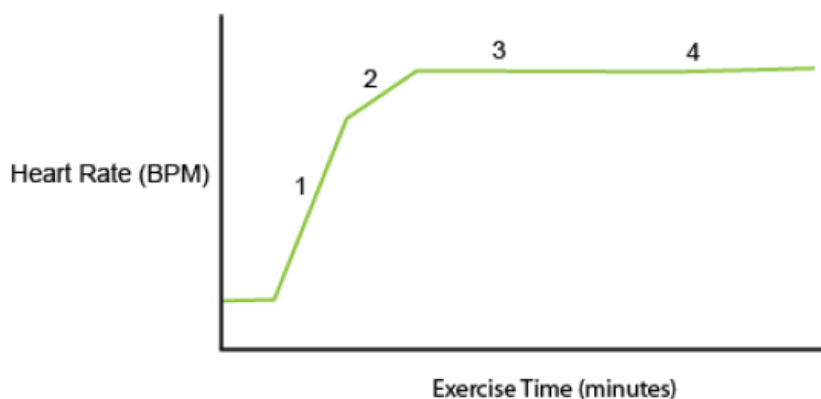
Wartość RER = 1 świadczy o metabolizmie węglowodanów, RER = 0,71 o metabolizmie tłuszczów, zaś RER = 0,82 o metabolizmie białek. Przy normalnej, mieszanej diecie RER przyjmuje wartości między 0,7 a 1.

Wartości RER poniżej 1 wskazują na metabolizm tlenowy, natomiast wartości powyżej 1 wskazują, że w uzyskiwanie energii zaangażowany jest również metabolizm beztlenowy (glikoliza beztlenowa), ponieważ zapotrzebowanie energetyczne przewyższa ilość dostarczanego tlenu.

W miarę wzrostu intensywności wysiłku fizycznego objętość zużywanego tlenu ($\dot{V}O_2$), objętość produkowanego dwutlenku węgla ($\dot{V}CO_2$) oraz RER rosną. Można zaobserwować pewne zależności:

- Dla danego poziomu $\dot{V}O_2$, intensywność wysiłku będzie wyższa u osób wytrenowanych.
- Osoby wytrenowane mogą mieć bardziej stromy początkowy wzrost $\dot{V}O_2$, ponieważ efektywniej wykorzystują tlen dostarczany do organizmu. Osoby niewytrenowane mogą polegać na bardziej pośrednich źródłach energii (ATP-PC i beztlenowych).
- U osób wytrenowanych wartości RER będą niższe we wczesnych etapach ćwiczeń, ponieważ osoby takie wcześniej wykorzystują zapasy tłuszczu. Pozwala to na zachowanie węglowodanów dla ćwiczeń o większej intensywności.
- Kobiety mają tendencję do utleniania większej ilości tłuszczu, co daje im niższy RER.

Aby używać miary zużycia tlenu jako wskaźnika metabolizmu tlenowego należy ćwiczyć w stabilny sposób, zapewniający utrzymanie równowagi organizmu w wysiłku.



Rycina 2. Krzywa przedstawiająca osiągnięcie stanu równowagi podczas wysiłku (na przykładzie tempa pracy serca).

Stan równowagi w czasie wysiłku można określić jako "poziom wysiłku, na którym parametry fizjologiczne pozostają na względnie stałym poziomie przez dłuższy czas" (McArdle, Katch i Katch, 1994).

W czasie wysiłku fizycznego, parametry życiowe takie jak tempo pracy serca, oddychanie, zużycie tlenu czy objętość wyrzutowa serca stopniowo ulegają zmianie. Cztery etapy tych zmian, na przykładzie zapisu tempa pracy serca, są przedstawione są na rycinie 3.

1. Gwałtowny wzrost w czasie pierwszej minuty.
2. Stopniowy wzrost w czasie drugiej minuty.

3. Pomiędzy trzecią a szóstą minutą osiągany jest stan równowagi, który dalej jest utrzymywany przy danym obciążeniu wysiłkiem.
4. Jeśli wysiłek trwa kilka godzin to następują stopniowe zmiany, takie jak np. wzrost temperatury wnętrza ciała.

Czynniki wpływające na osiągnięcie stanu równowagi:

- Dostarczanie O₂ do pracujących mięśni
- Wykorzystanie O₂ przez komórki w czasie metabolizmu tlenowego
- Zdolność do rozpraszania ciepła.

Wydolność tlenowa organizmu

Wydolność fizyczna to maksymalna zdolność organizmu do pokrywania zwiększonego zapotrzebowania na energię w czasie wysiłku oraz zdolność do likwidacji jego skutków. Energia ta może pochodzić z procesów tlenowych i beztlenowych. Wydolność tlenowa to zdolność do długotrwałego, umiarkowanego wysiłku opartego na procesach tlenowych (**pułap tlenowy = $\dot{V}O_2\max$**). Natomiast wydolność beztlenowa to zdolność do krótkotrwałego, intensywnego wysiłku opartego na procesach beztlenowych.

Powszechną metodą określania wydolności tlenowej jest test maksymalnego zużycia tlenu ($\dot{V}O_2\max$). Mierzy on zdolność danej osoby do wykorzystania tlenu (O₂) podczas wysiłku tlenowego (aerobowego). Test $\dot{V}O_2\max$ polega na stopniowym zwiększaniu intensywności ćwiczeń (tempa pracy). Trwa to aż do momentu, gdy dana osoba stwierdzi, że jest całkowicie wyczerpana i nie może kontynuować wysiłku albo gdy osiągnie przewidywane dla wieku maksymalne tempo pracy serca. Wysokie $\dot{V}O_2\max$ wskazuje, że dana osoba jest lepiej przygotowana do zaspokojenia zapotrzebowania organizmu na tlen podczas ćwiczeń.

$\dot{V}O_2\max$ jest określane na podstawie pojemności funkcjonalnej i integracji systemów dostarczających, transportujących i wykorzystujących O₂. Systemy te obejmują:

- Wentylację płuc
- Hemoglobinę
- Objętość krwi i pojemność minutową serca
- Metabolizm tlenowy

$\dot{V}O_2\max$ jest specyficzne dla rodzaju ćwiczeń, ponieważ zaangażowane są różne mięśnie szkieletowe. Na przykład ta sama osoba może uzyskać różne wyniki $\dot{V}O_2\max$ podczas pływania i biegania.

Pomiędzy mocą (intensywnością) ćwiczeń a tempem pracy serca może istnieć zależność liniowa. Przy takim założeniu maksymalne tempo pracy serca można wykorzystać do oszacowania mocy, przy której prawdopodobnie zostanie osiągnięte $\dot{V}O_2\max$. Odbywa się to poprzez ekstrapolację tempa pracy serca względem mocy, aż do osiągnięcia tempa maksymalnego. Jednakże związek ten może nie być tak liniowy. Dzieje się tak, ponieważ osoby wytrenowane mogą nie osiągnąć maksymalnego tempa pracy serca, podczas gdy osoby niewytrenowane mogą je przekroczyć (gdyby pozwolono im kontynuować test).

Bezwzględne i względne $\dot{V}O_2\max$

$\dot{V}O_2\max$ może być zdefiniowane jako bezwzględne (L/min) lub względne (mL/kg/min). Bezwzględne $\dot{V}O_2\max$ odnosi się do ilości O₂ zużywanego przez całe ciało i jest ważne w sportach nieobciążeniowych (np. kolarstwo i wioślarstwo). Względna wartość $\dot{V}O_2\max$ pozwala na porównania między ludźmi poprzez uwzględnienie masy ciała i jest ważna w

sportach obciążeniowych (na przykład bieganie i piłka nożna), w których ciężar ciała sportowca przejmowany jest bezpośrednio przez ciało, przy czym większość głównych grup mięśniowych jest wykorzystywana do zachowania dobrej techniki i prawidłowej postawy (na przykład bieganie). Masa ciała jest więc ważnym czynnikiem, dlatego względne $\dot{V}O_2\max$ (jednostki: mL/kg/min) jest najbardziej odpowiednią miarą wydolności tlenowej. **Ćwiczenie nieobciążeniowe** należy tu rozumieć jako niewymagające pracy wbrew grawitacji czyli dźwigania ciężaru własnego ciała. Ciężar człowieka spoczywa na sprzęcie a więc masa ciała sportowca staje się mniej ważna. Dla tych sportów bezwzględne $\dot{V}O_2\max$ (jednostki: L/min) jest równie dobre jak względne $\dot{V}O_2\max$.

Metabolizm beztlenowy

Przy większej intensywności wysiłku, gdy pojawia się również metabolizm beztlenowy, tempo zużycia tlenu nie odzwierciedla w pełni wydatków energetycznych. Wyniki są wówczas nieco zaniżone, ponieważ metoda kalorymetrii pośredniej nie uwzględnia ATP pochodzącej z glikolizy beztlenowej.

Krótki, ekstremalny wysiłek opiera się w dużej mierze na metabolizmie beztlenowym. W czasie intensywnego wysiłku w mięśniach zaczynają występować również procesy beztlenowe, i z glukozy powstaje **mleczan**. Nie jest on przyczyną "zakwasów", jak się powszechnie uważa. Jest on cennym związkiem wykorzystywanym przez organizm.

- Mleczan jest substratem energetycznym dla serca.
- Mleczan jest substratem energetycznym dla mięśni, w tym mięśni oddechowych.
- Mleczan przenika do krwi, jest wychwytywany przez wątrobę i w procesie glukoneogenezy jest ponownie przekształcany w glukozę. Glukoza jest następnie uwalniana z wątroby i wraz z krwią przenoszona z powrotem do komórek mięśni szkieletowych, gdzie jest ponownie wykorzystywana na szlaku glikolitycznym. Jest to tzw. **cykl Corich**; nazwany tak na cześć Carla i Gerty Cori, którzy jako pierwsi go opisali i którzy wspólnie otrzymali Nagrodę Nobla w dziedzinie fizjologii lub medycyny w 1947 roku w uznaniu ich pracy nad zrozumieniem metabolizmu glukozy.

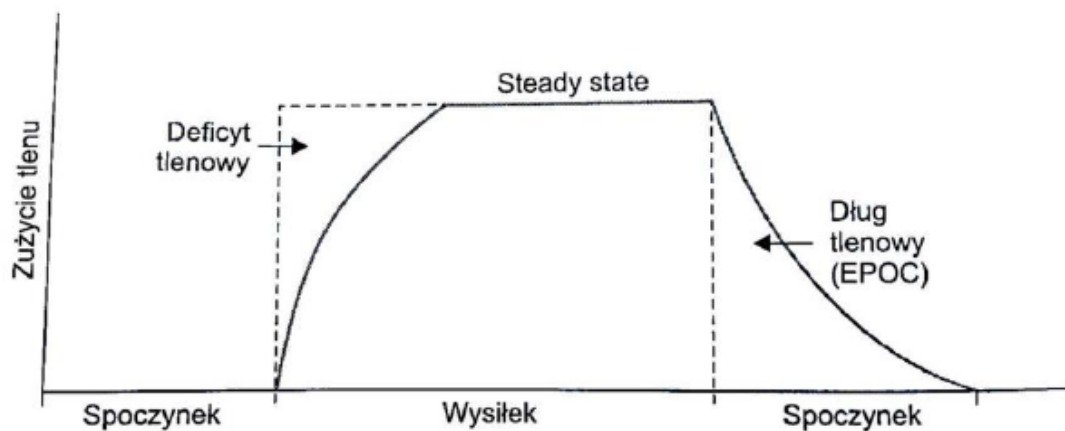
Nadmierne powysiłkowe zużycie tlenu

Przez pewien czas po wysiłku fizycznym utrzymuje się wyższe zużycie tlenu niż w spoczynku. Kiedyś określano je mianem długu tlenowego. Nie jest to nazwa poprawna, ponieważ organizm nie może zaczerpnąć długu. Dlatego stan ten określa się jako nadmierne powysiłkowe zużycie tlenu.

Kiedy zaczynamy ćwiczyć, początkowo zużywamy energię szybciej niż ją produkujemy z metabolizmu tlenowego.

- W tym okresie wykorzystujemy zasoby ATP i fosfokreatyny w mięśniach, produkujemy mleczan w glikolizie beztlenowej i wykorzystujemy O_2 dostępny w pęcherzykach płucnych, hemoglobinie i mioglobinie. We krwi żyłnej opuszczającej ćwiczące mięśnie jest mniej O_2 .
- Po około 2-6 minutach submaksymalnych ćwiczeń o stałej intensywności osiągamy stan równowagi, w którym pobór i wykorzystanie O_2 są zrównoważone.
- Kiedy kończymy ćwiczenia, wchodzimy w okres, w którym zużycie O_2 przekracza stan spoczynku przed treningiem. Okres ten nazywany jest czasem nadmiernego

powysiłkowego zużycia tlenu. W tym czasie następuje stopniowy powrót zużycia O_2 do wartości spoczynkowych.



Rycina 3. Zmiany zużycia tlenu w czasie wysiłku pokazujące różnicę między deficytem tlenowym a nadmiernym powysiłkowym zużyciem tlenu.

Nadmierne powysiłkowe zużycie tlenu można podzielić na trzy fazy:

Faza 1 trwa tylko kilka minut. W tym czasie następuje odbudowa zasobów ATP i fosfokreatyny, zapasów tlenu związanego z mioglobina i tlenu rozpuszczonego w płynie pozakomórkowym w pracujących mięśniach.

Faza 2 trwa około 15 minut. Podwyższone zużycie tlenu wynika z:

- Wzmoczonej pracy mięśni oddechowych w wyniku hiperwentylacji.
- Podwyższonej temperatury ciała po ćwiczeniach.
- Podwyższonego poziom katecholamin, które nadal stymulują metabolizm.
- Przemiana mleczanu w glukozę w wątrobie.

Faza 3 może trwać do 12 godzin lub dłużej. W tym czasie następuje regeneracja tkanki mięśniowej uszkodzonej podczas ćwiczeń, w tym produkcję nowych białek.