

**AKADEMIA WYCHOWANIA FIZYCZNEGO**  
**im. Eugeniusza Piaseckiego**  
**w Poznaniu**

**mgr Jacek Trinschek**

*Konspekt pracy doktorskiej*

**Maksymalne pochłanianie tlenu w przeliczeniu na masę mięśniową  
u sportowców wyczynowych  
a uprawiana dyscyplina, podokres treningowy i płeć**

**Opiekun naukowy:  
prof. AWF dr hab. Krzysztof Kusy**

**Poznań 2019**

## Spis treści

1. Wstęp.....	2
1.1 Maksymalna wydolność tlenowa .....	2
1.2 Masa mięśniowa u sportowców wyczynowych .....	8
1.3 Maksymalna wydolność tlenowa sportowców w odniesieniu do masy mięśniowej - przegląd literatury .....	9
1.4 Uzasadnienie podjętych badań .....	12
2. Cele i hipotezy badawcze .....	14
3. Materiał i metoda.....	15
4. Przykłady .....	21
Piśmiennictwo .....	23

## 1. Wstęp

### 1.1 Maksymalna wydolność tlenowa

#### *Definicja*

Maksymalna wydolność tlenowa określa zdolność do długotrwałego wysiłku fizycznego o dużej lub umiarkowanej intensywności, a w kategoriach fizjologicznych zdolność do pokrywania zapotrzebowania energetycznego aktywnych mięśni przez metaboliczne procesy tlenowe. Stanowi ona odzwierciedlenie tolerancji organizmu na zaburzenia homeostazy wewnątrzustrojowej w wyniku oddziaływania na organizm bodźców wysiłkowych, a także obraz szybkości restytucji określonych wskaźników fizjologicznych organizmu do stanu poprzedzającego wysiłek fizyczny [Jaskólski i wsp. 2006, Ronikier 2008]. Zwiększenie poziomu adaptacji organizmu do obciążeń i związana z tym poprawa maksymalnej wydolności tlenowej pozwala zawodnikowi na wykonanie takiego samego lub większego wysiłku przy niższym zakłóceniu równowagi metabolicznej [Joyner i wsp. 2008, Hawley 2002, Laursen 2009]. Możliwe jest podniesienie lub utrzymanie wysokiego poziomu wydolności fizycznej poprzez odpowiednio zaplanowany trening praktycznie w każdym wieku [Åstrand i wsp. 2003, Cosgrove i wsp. 1999, Kusy i wsp. 2014, Ronikier 2008]. Miarą maksymalnej wydolności tlenowej jest maksymalny pobór tlenu ( $VO_2\max$ ) podczas wysiłku fizycznego o wzrastającej intensywności [Zwiren i wsp. 2013, Dehghan i wsp. 2014, Sadowska i wsp. 2017, Wilmore i wsp. 2004].

#### *Czynniki warunkujące*

Poziom  $VO_2\max$  warunkują czynniki genetyczne, fizjologiczne oraz środowiskowe, w tym aktywny tryb życia [Gibson i wsp. 2013]. Bardzo wcześnie Hill i wsp. [1924] postawili tezę, że wielkość  $VO_2\max$  jest głównie ograniczona przez szybkość, z jaką  $O_2$  może być dostarczany przez układ krążeniowo-oddechowy (serce, płuca i krew). W kolejnych kilkudziesięciu latach wielu wybitnych fizjologów, mając do dyspozycji nowe metody badawcze, zajmowało się tym zagadnieniem. Wnioski z ich badań nadal wspierają hipotezę Hilla i przeważa pogląd, że poziom  $VO_2\max$  jest głównie ograniczony przez szybkość dostarczania  $O_2$ , a nie zdolność mięśni do jego

wykorzystania. Według dostępnej wiedzy, wyróżniamy cztery najważniejsze grupy determinantów  $\text{VO}_2\text{max}$ , z których pierwsze trzy można określić się jako tzw. czynniki centralne, natomiast ostatnią jako czynniki obwodowe [Boushel i wsp. 2011, Hawley 2011, Kenney i wsp. 2012, Rapoport 2010, Gibson i wsp. 2013, Bassett i Howley. 2000, Grassi 2006, McGuire i wsp. 2003]:

- Czynniki związane z funkcjonowaniem układu oddechowego – wentylacja minutowa płuc, pojemność dyfuzyjna płuc, stosunek wentylacji pęcherzykowej do perfuzji [Basset i Howley 2000].
- Maksymalna pojemność minutowa serca – będąca iloczynem częstości skurczów i objętości wyrzutowej serca. Istnieje wiele badań, z których wynika, że wzrost  $\text{VO}_2\text{max}$  wynika przede wszystkim ze wzrostu przepływu krwi warunkowanego maksymalną pojemnością minutową serca [Saltin i wsp. 1968, Bassett i Howley 2000]. Szacuje się, że 70–85% ograniczenia w  $\text{VO}_2\text{max}$  jest związane z tym parametrem [Cerretelli i wsp. 1987].
- Zdolność krwi do przenoszenia tlenu – zawartość hemoglobiny we krwi, różnica tętniczko-żylna zawartości tlenu we krwi, powinowactwo tlenu do hemoglobiny (Eklblom i wsp. 1976).
- Właściwości mięśni szkieletowych – zdolność dyfuzji  $\text{O}_2$  pomiędzy erytrocytem a sarkolemmą, dyfuzja tlenu do mitochondriów, poziom enzymów w mitochondriach, gęstość i wielkość mitochondriów, gęstość kapilar w mięśniu, rodzaj i procentowa zawartość różnych rodzajów włókien mięśniowych [Bassett i wsp. 2000, Short i wsp. 2005]. We włóknach mięśniowych typu I (tzw. czerwonych, tlenowych) wielkość i liczba mitochondriów oraz gęstość kapilar są wyższe niż we włóknach typu IIA (tlenowo-glikolitycznych) i IIX (glikolitycznych), a tym samym przepływ krwi zawierającej  $\text{O}_2$  jest w tych włóknach większy (ponadto trwa dłużej) i dominuje metabolizm tlenowy. Włókna typu I charakteryzują się lepszą ekstrakcją tlenu, większym pochłanianiem tlenu i zwiększoną odpornością na zmęczenie. Ponadto na poziomie komórkowym wyższa jest aktywność enzymów uczestniczących w tlenowej produkcji adenosynotryfosforanu (ATP), np. dehydrogenazy kwasu pirogronowego, oraz pozostałych enzymów biorących udział w cyklu Krebsa, co ma wpływ na zdolność do generowania energii z procesów oksydacyjnych [Sumathilatha i wsp. 2009, Coggan i wsp. 1992, Magel i wsp. 1978]. We włóknach

mięśniowych typu IIA i IIX zdolność do generowania energii z procesów oksydacyjnych jest mniejsza [Hunter i wsp. 2001].

Czynnikami mającymi duży wpływ na wartość  $VO_2\max$  są także:

- Wiek – wraz z wiekiem poziom  $VO_2\max$  sportowców stopniowo maleje, niezależnie od wartości wyjściowych i poziomu sportowego, co odzwierciedla z jednej strony procesy starzenia się, a z drugiej redukcję aktywności fizycznej [Kusy i wsp. 2014]. Wraz z wiekiem następuje stopniowe osłabienie mięśni, utrata masy mięśniowej oraz spadek zawartości mitochondriów w mięśniu, co wpływa na spadek  $VO_2\max$  i zdolności oksydacyjnych mięśni [Aagaard i wsp. 2010, Weiss i wsp. 2006].
- Płeć – kobiety, ze względu na wyższą zawartość tkanki tłuszczowej i mniejszą zawartość tkanki mięśniowej, cechują się z reguły mniejszymi wartościami  $VO_2\max$ , wyrażonymi w standardowych miarach [Bean 2013].
- Wysokość nad poziomem morza –  $VO_2\max$  spada o ok. 10% na każde 1000 m wysokości powyżej 1200 m n.p.m. Wraz z wysokością maleje częstość skurczów i pojemność minutowa serca, spada stężenie mleczanu we krwi oraz zmniejsza się rekrutacja mięśni szkieletowych [Noakes 2011, s. 42–44].
- Trening – kluczowy czynnik zwiększający  $VO_2\max$ . Największy wzrost  $VO_2\max$  można zaobserwować w pierwszych miesiącach treningu, natomiast później trening ma coraz mniejszy wpływ na pułap tlenowy. Uważa się jednak, że  $VO_2\max$  w ograniczonym stopniu poddaje się wytrenowaniu, zwiększając się do 15–25% ponad wartość początkową [Górski 2001].

W kontekście podejmowanego przeze mnie tematu badawczego, wśród czynników środowiskowych najistotniejszy jest wpływ treningu na właściwości mięśni szkieletowych. Generalnie trening wytrzymałościowy jest skuteczną metodą zwiększania zdolności oksydacyjnej mięśni, a tym samym wydolności tlenowej [Boushel i wsp. 2011]. Najbardziej charakterystyczne zmiany właściwości mięśnia szkieletowego pod wpływem treningu wytrzymałościowego można przedstawić następująco [Bassett i wsp. 2000; Boushel i wsp. 2011; Górski 2001, s. 148–152]:

- zwiększenie gęstości i długości kapilar, odpowiadające za sprawniejsze wychwytywanie

O<sub>2</sub> z krwi i dostarczanie go do mięśnia;

- wzrost zawartości mioglobiny we włóknach mięśniowych typu I, co wiąże się z szybszym wykorzystaniem O<sub>2</sub> przy nagłym wzroście jego zużycia oraz sprawniejszym transportem O<sub>2</sub> z powierzchni komórki do mitochondrium;
- zwiększenie procentowego udziału włókien typu IIA i zmniejszenie udziału włókien typu IIX;
- wzrost liczby i rozmiarów mitochondriów (w tym liczby grzebieni, na których zachodzą procesy utleniania); wiąże się to z niekiedy z obserwowanym potreningowym wzrostem ATP i fosfokreatyny;
- wzrost aktywności enzymów biorących udział w wytwarzaniu ATP, w tym dehydrogenazy bursztynianowej, syntazy cytrynianowej i enzymów współdziałających w transporcie wolnych kwasów tłuszczowych do mitochondriów i ich oksydacji, co umożliwia wytwarzanie większej ilości ATP;
- utlenianie tłuszczów w wyższym tempie, co pozwala oszczędzić glikogen mięśniowy, zredukować poziom glukozy we krwi oraz zmniejszyć produkcję mleczanu podczas wysiłku o określonej intensywności;
- zwiększenie zawartości glikogenu w mięśniach;
- niekiedy niewielki wzrost masy mięśniowej, choć u sportowców wyczynowych masa mięśni szkieletowych pozostaje stała lub nawet nieco maleje na skutek treningu wytrzymałościowego (zmniejszenie średnicy włókien typu I i IIA);
- niewielkie obniżenie siły skurczu tężcowego mięśni (na skutek redukcji ilości białek kurczliwych i liczby mostków aktynowo-miozynowych przypadających na pole przekroju poprzecznego), wzrost szybkości skurczu włókien typu I i obniżenie szybkości skurczu włókien typu II (odpowiednio wzrost i spadek aktywności enzymu ATP-azy oraz inne zmiany na poziomie molekularnym).

W badaniu Ronnestad i wsp. [2010] wykazano ponadto, że sesje treningów siłowych w połączeniu z treningiem wytrzymałościowym mają wpływ na hipertrofię mięśnia oraz na

biogenezę mitochondriów i ich aktywność enzymatyczną – czynniki te wpływały pozytywnie na wydolność tlenową. Trening oporowy również może odwrócić efekty związane z upośledzeniem zdolności oksydacyjnej mięśni dzięki zmianom udziału włókien mięśniowych typu glikolitycznego IIX w kierunku tlenowo-glikolitycznych włókien typu IIA poprzez silny wzrost zawartości w mięśniach białek mitochondrialnych [Frank i wsp. 2016]. Powyższe adaptacje funkcjonalne i strukturalne skutkują zwiększeniem zdolności oddechowej mięśni (tzn. zwiększeniem maksymalnej zdolności do pochłaniania  $O_2$ ). Szacuje się, że zdolność ta wynosi ok. 1.5 litra na godzinę na 1g mięśnia u osób rekreacyjnie aktywnych fizycznie (jogging), a u maratończyków ponad 4 l/h/g mięśnia [Górski 2001, s. 444].

### ***Pomiar maksymalnej wydolności tlenowej***

Wyznaczanie  $VO_2\max$  jest jednym z najczęstszych pomiarów wykonywanych w laboratoriach sportowych. Ustalenie  $VO_2\max$  jest przydatnym i wiarygodnym (choć niewystarczającym) wskaźnikiem wytrenowania sportowców oraz adaptacji układu krążeniowo-oddechowego i metabolizmu komórkowego do wysiłku, stosowanym od ponad 50 lat [Åstrand i wsp. 1961]. Ponadto pobór tlenu dostarcza również informacji o efektywności powysiłkowej restytucji organizmu [McGuire i wsp. 2001, Bassett i wsp. 2000, Vogiatzis i wsp. 2007]. Osiągnięcie  $VO_2\max$  odbywa się w czasie wysiłku o wzrastającym obciążeniu, gdy zużycie tlenu przez organizm wzrasta proporcjonalnie do obciążenia, aż do wartości, przy której stabilizuje się i pozostaje na stałym poziomie, pomimo wzrastającego obciążenia. Poziom  $VO_2\max$  określa największą ilość tlenu, jaką organizm jest w stanie wykorzystać przy maksymalnym obciążeniu w jednostce czasu i zależy od sprawnego działania całego łańcucha wyżej omówionych czynników.  $VO_2\max$  wyrażany jest standardowo w wartościach bezwzględnych (ml/min) lub względem całkowitej masy ciała (ml/min/kg). Poziom  $VO_2\max$  wyraża się rzadko w mililitrach  $O_2$  na kilogram masy ciała szczupłego (LBM) na minutę (ml/min/kgLBM), a jedynie sporadycznie w mililitrach  $O_2$  na kilogram masy mięśni szkieletowych (SMM) (ml/min/kgSMM) [Bentley i wsp. 2007, Hoppeler i wsp. 2000, Kenney 2012, McLaughlin i wsp. 2010, Knechtle 2014, Sandbakk i wsp. 2011, Dencker i wsp. 2007, Chaouachi i wps. 2005]. Mała popularność przeliczania  $VO_2\max$  na SMM w praktyce sportowej wynika z jednej strony z trudności metodologicznych i technicznych dokładnego oszacowania SMM, a z drugiej z braku wiedzy na temat informacji jaką

może nieść dla trenera i zawodnika taki sposób przedstawienia tego ważnego parametru fizjologicznego.

## **1.2 Masa mięśniowa u wysokowytrenowanych zawodników**

Obciążenia treningowe, którym podawany jest organizm w trakcie procesu treningowego są jednym z czynników wpływających na skład ciała [Sigmund 2017]. Kluczowym dla sportowca komponentem ciała jest SMM. Największa SMM znajduje się w obrębie kończyn, a w mięśniach szkieletowych występuje znaczna część tkanki beztłuszczowej [Kim 2002]. Szacuje się, że u mężczyzn mięśnie stanowią około 40% masy ciała, a u kobiet 35%, przeciętnie 20–30 kg u kobiet oraz 25–35 kg u mężczyzn [Bańkowski 2005]. Sugeruje się, że wysoki poziom SMM jest cechą najlepszych sportowców. Np. w badaniu Martín-Matillas i wsp. [2014] siatkarki grające w najwyższej lidze hiszpańskiej charakteryzowały się SMM na poziomie  $27.3 \pm 2.9$  kg, co stanowiło 31.6–42.6% masy ciała. Wyniki pokazały, że zawodniczki o wyższej SMM kończyły turnieje ze swoimi drużynami na wyższych pozycjach. W badaniu Andreato i wsp. [2016] u zawodników trenujących jiu-jitsu wykazano podwyższoną ilość SMM  $47.5 \pm 5.8$  kg ( $59.2 \pm 5.0\%$  całkowitej masy ciała) oraz niski procent tkanki tłuszczowej ( $12.7 \pm 4.8\%$ ). Podobne wyniki uzyskano u zawodników płci męskiej, którzy charakteryzowali się również wysoką procentową zawartością SMM, (61%) [Andreato i wsp. 2012].

W zależności od dyscypliny sportu poziom masy mięśniowej u zawodników różni się. W porównaniu zaprezentowanym w tabeli 1 bezwzględna SMM wynosiła od 38.4 kg u biegaczy na dystansach 1500 m i dłuższych do 58.7 kg u kulturystów. Pokazuje to, że w każdej dyscyplinie sportu występuje pewna pożądana wartość absolutna i względna SMM. W skrajnych przypadkach dąży się do maksymalizacji SMM zawodnika (kulturystyka), najczęściej jednak poszukuje się pewnej wartości optymalnej, skorelowanej z uzyskiwaniem najlepszych wyników. Generalnie, większa SMM oczekiwana jest w sportach siłowych, szybkościowo-siłowych lub wytrzymałościowo-siłowych, a mniejsza w sportach wytrzymałościowych. W badaniu dotyczącym różnic między płciami w kontekście rekordów świata wykazano, że u mężczyzn i kobiet trenujących kajakerstwo na dystansach średnich i długich występują znaczne różnice w wynikach i można to w dużej mierze wytłumaczyć większą SMM górnych partii ciała u mężczyzn,



pozwalającą na wytworzenie większej siły, co jest równie ważne dla wyniku sportowego jak czynnik krążeniowo-oddechowy [Sandbakk i wsp. 2018]. Z kolei u zawodników trenujących sporty wytrzymałościowe mniejsza absolutna masa ciała i SMM jest ściśle skorelowana z lepszymi wynikami sportowymi [Gianoli i wsp. 2012]. Oczywiście sportowcy różnych specjalności różnią się nie tylko ilością i procentową zawartością SMM, ale także jej właściwościami wynikającymi z działania czynników opisanych wcześniej, w tym treningu.

Tabela 1. Skład ciała zawodników uprawiających różne dyscypliny sportowe

	Masa ciała	Masa mięśniowa		Metoda szacowania
	kg	kg	%	
Siatkówka <sup>1</sup> (n=148)	72.3±8.4	27.3±2.9	37.8±2.2	Antropometria
Koszykówka <sup>2</sup> (n=10)	89.8±12.5	54.7±8.0	60.9±2.9	Antropometria
Piłka nożna <sup>5</sup> (n=60)	73.8±7.1	39.4±4.3	53.4±1.9	Antropometria
Futsal <sup>6</sup> (n=14)	77.0±6.7	33.8±3.0	33.8	DXA
Sprint <sup>7</sup> (n=37)	65.5±5.1	26.3±1.9	40.4±3.9	Ultrasonograf
Biegi długodystansowe <sup>6</sup> (n=16)	73.4±7.2	32.4±3.2	44.1	DXA
Ultramaraton <sup>3</sup> (n=166)	75.0±9.4	38.9±3.9	51.9	Antropometria
Triathlon <sup>4</sup> (n=83)	77.3±8.9	38.6±4.2	52.8	Antropometria
Kulturystyka <sup>2</sup> (n=10)	89.9 ±12.3	58.7±9.6	65.1±2.0	Antropometria
Gimnastyka <sup>2</sup> (n=10)	68.1±8.6	40.7±6.8	59.5±2.9	Antropometria

<sup>1</sup> Martín-Matillas i wsp. 2014, <sup>2</sup> Spenst i wsp. 1993, <sup>3</sup> Rüst i wsp. 2012, <sup>4</sup> Knechtle 2011, <sup>5</sup> Nikolic i wsp. 2014, <sup>6</sup> Zarębska i wsp. 2018, <sup>7</sup> Abe i wsp. 2018

### 1.3 Maksymalna wydolność tlenowa sportowców w odniesieniu do masy mięśniowej – przegląd literatury

W dostępnej literaturze istnieje niewiele prac zajmujących się maksymalną wydolnością tlenową w odniesieniu do SMM. W dotychczasowych badaniach autorzy zajmowali się problematyką maksymalnej wydolności tlenowej w kontekście całkowitej oraz lokalnej SMM. Wartości VO<sub>2</sub>max mieściły się w przedziale 97–702 ml/min/kg [Neder 1999, Proctor i wsp. 1997, Richardson 1998]. Tak szeroki zakres spowodowany jest takimi czynnikami jak ilość zaangażowanych mięśni, rodzaj ćwiczenia i metoda ustalania ilości masy mięśniowej [Sanada 2005].

W kilku badaniach autorzy próbowali wyodrębnić biorące udział w teście pracujące grupy mięśniowe. Saltin [1985] ustalił, że w pracującym mięśniu czworogłowym  $VO_2max$  wynosi 350 ml/min/kg SMM. W badaniu Sheparda [1988] poziom  $VO_2max$  pracujących kończyn górnych wynosił 702 ml/min/kg SMM oraz 226 ml/min/kg SMM kończyn dolnych. Istotnym czynnikiem, na który należy zwrócić uwagę jest fakt, że w badaniach tych autorzy szacowali masę mięśniową za pośrednictwem metod antropometrycznych, które są mało dokładne, dlatego  $VO_2max$  w przeliczeniu na SMM mógł być obarczony sporym błędem.

W badaniu Farinatti i wsp. [2011] wzięli udział zdrowi mężczyźni, podzielonych na dwie grupy ze względu na ilość masy mięśniowej zaangażowanej w wysiłek, u których zmierzono pochłanianie tlenu w trakcie oraz po zakończeniu ćwiczeń. Mężczyźni z grupy używającej większej ilości masy mięśniowej uzyskali dużo większe wartości absolutne  $VO_2max$ . Tak więc wykazano, że masa absolutna mięśni szkieletowych jest ściśle powiązana z ilością pochłanianego tlenu. Mięśnie, które biorą udział w wysiłku fizycznym, szczególnie duże partie mięśniowe, charakteryzują się pewnym poziomem pojemności oksydacyjnej, która odgrywa istotną rolę. [Ferri-Morales 2018, Proctor 1997].

W badaniu Proctora i wsp. [1997] oceniano wpływ zmniejszającej się z wiekiem masy mięśniowej na poziom  $VO_2max$ . Zbadano mężczyzn i kobiety w dwóch grupach wiekowych, młodszej i starszej (tabela 2).

Tabela 2. Wybrane parametry składu oraz maksymalny poziom wydolności tlenowej [Proctor i wsp. 1997]

	Mężczyźni 24±4 lat	Mężczyźni 64±4 lat	Kobiety 26±4 lat	Kobiety 61±8 lat
Masa ciała (kg)	70.9±7.8	75.5±10.2	60.1±5.5	58.1±6.6
Masa beztłuszczowa (kg)	64.0±8.2	60±6.1	46.4±2.8	41.3±2.3
Masa tłuszczowa (kg)	9.9±2.5	20±6.0	22.5±4.4	28.4±6.3
$VO_2max(ml/kgMC/min)$	62.0±4.1	45.9±4.1	51.5±3.2	40.0±4.8
$VO_2max(ml/kgMM/min)$	159.5±11.9	137.6±9.8	158.8±11.1	137.6±12.5

Na podstawie pomiarów uzyskano kilka znaczących informacji dotyczących  $VO_2max$  w przeliczeniu na SMM. Wykazano niemal taki sam poziom  $VO_2max/SMM$  u mężczyzn i kobiet w jednolitych grupach wieku. Stąd wniosek, że w tym samym wieku i przy podobnym poziomie wytrenowania różnice międzypłciowe w poziomie  $VO_2max$  zależą od składu ciała, w

szczegółności proporcji masy mięśniowej i tkanki tłuszczowej. Dodatkowo, autorzy sugerują, że u osób starszych mało prawdopodobna jest zmniejszona pojemność oksydacyjna mięśni. Twierdzą oni, że większe znaczenie ma zmniejszająca się pojemność minutowa serca, przez co transport tlenu z krwią również jest ograniczony.

W kolejnym badaniu [Sanada i wsp. 2004] udział wzięło 8 pływaków na poziomie amatorskim. Skład ciała oraz SMM zostały wyznaczone za pomocą rezonansu magnetycznego, natomiast  $VO_2max$  uzyskano na podstawie testu do odmowy na bieżni mechanicznej. Poziom  $VO_2max$  wynosił 136.7 ml/min/kgSMM. Autorzy wykazali silną korelację między SMM a poziomem  $VO_2max$  i, co ważniejsze, sugerują, że maksymalna wydolność tlenowa w przeliczeniu na SMM może być bardziej odpowiednim wskaźnikiem niż masa ciała w ocenie siły tlenowej. Argumentują to faktem, że różnice w masie ciała mogą mieć znaczny wpływ na  $VO_2max$ .

W innym badaniu, w którym autorzy zajęli się problemem  $VO_2max$  w przeliczeniu na SMM [Beekley i wsp. 2006], porównano zawodników trenujących sumo z zawodnikami nietrenującymi. Dodatkowo zebrano dane z innych publikacji na temat składu ciała i poziomu  $VO_2max$  różnych dyscyplin sportowych i po przyrównaniu obu wartości porównano je z wartościami uzyskanymi w tym badaniu (tabela 3). Średnie wartości  $VO_2max/SMM$  były znacząco różne między zawodnikami trenującymi sporty wytrzymałościowe ( $164.8 \pm 18.3$  ml/min/kgSMM), sporty walki ( $131.4 \pm 9.3$  ml/min/kgSMM), sporty szybkościowo-siłowe ( $96.5 \pm 5.3$  ml/min/kgSMM) oraz sumo ( $71.4 \pm 5$  ml/min/kgSMM). Autorzy badania sugerują, że aby lepiej porównać  $VO_2max$  wśród uczestników o różnej zawartości tłuszczu i masy ciała należy wyrazić  $VO_2max$  w przeliczeniu na jednostkę SMM, co pozwoli uzyskać dokładniejszą informację o maksymalnej wydolności tlenowej i wydolności mięśni szkieletowych.

Tabela 3. Masa mięśniowa i maksymalne pochłanianie tlenu w różnych dyscyplinach sportu

	n	MC (kg)	SMM (kg)	VO <sub>2</sub> max l/min	VO <sub>2</sub> max ml/min/kgMC	VO <sub>2</sub> max ml/min/kgSMM	Poziom
Sumo	8	117	48.2	3.60	31.1	74.8	Amator
Grupa nietreningująca	8	56.1	20.6	2.50	44.6	121.4	Amator
Judo	19	80.2	35.5	4.61	57.5	129.8	Wyczyn
Judo	22	75.4	34.2	4.49	59.2	131.2	Wyczyn
Karate	7	66.3	28	3.81	57.5	136.4	Amator
Karate	9	60.1	23.4	3.44	57.2	146.9	Amator
Boks	8	77.4	32.6	4.45	57.5	136.3	Amator
Zapasy	25	80.6	37.9	4.49	55.7	118.5	Wyczyn
Zapasy	2	81.1	37.5	5.10	64	136.1	Wyczyn
Kendo	7	71.2	29.9	3.91	54.9	130.6	Amator
Football	32	117.0	53	5.30	45.3	100	Wyczyn
Rzut dyskiem	7	104.7	47.2	4.90	56.8	103.8	Wyczyn
Pchnięcie kulą	5	113	51.6	4.80	42.5	93.0	Wyczyn
Koszykówka	15	96.9	46.6	4.50	46.4	96.6	Wyczyn
Maraton	8	61.9	27.6	4.58	74	166.2	Amator
Biegi długie	8	66.2	28.9	5.19	78.4	179.4	Wyczyn
Biegi średnie	7	67	29.7	5.09	76	171.3	Wyczyn
Wioślarstwo	9	88.7	43.6	5.51	62.5	126.3	Wyczyn
Biegi narciarskie	17	69.3	30	4.42	78.3	180.6	Wyczyn

Legenda: MC – masa ciała, SMM – masa mięśni szkieletowych, VO<sub>2</sub>max – maksymalny pobór tlenu

#### 1.4. Uzasadnienie podjętych badań

Przedstawione rozważania implikują nowe spojrzenie na problem oceny maksymalnej wydolności tlenowej w sporcie oraz jej zmiany wywoływane treningiem. Wg dostępnej wiedzy poziom maksymalnej wydolności tlenowej jest związany z SMM. Poprzez regularny trening mięśnie adaptują się do wysiłków i są w stanie pochłaniać większą ilość tlenu. W dotychczasowych badaniach nie analizowano jednak poziomu VO<sub>2</sub>max i jego zmian w cyklu treningowym w przeliczeniu na SMM u wyczynowych sportowców. Jedną z przyczyn jest trudność w ustaleniu rzeczywistej i optymalnej SMM sportowców za pomocą dotąd stosowanych metod jej szacowania. Dane uzyskane w oparciu o pomiary antropometryczne i równania przewidujące (regresji) czy inne

umiarkowanie trafne i rzetelne metody (np. bioimpedancja) nie pozwalają na wiarygodne porównania i analizy składu ciała, w tym SMM. Metodą o bardzo wysokiej trafności, rzetelności i użyteczności, a jednocześnie coraz bardziej dostępną, jest metoda DXA (ang. *dual x-ray absorptiometry*, absorpcjometria promieniowania rentgenowskiego o dwóch energiach), dla potrzeb sportu w zasadzie równoważna pomiarom za pomocą tomografii komputerowej lub rezonansu magnetycznego, ale nie generująca kłopotów związanych z dostępnością, kosztami czy ryzykiem (np. dawka promieniowania w tomografii).

Co jednak najistotniejsze, wydaje się, że powszechnie stosowany wskaźnik  $VO_2\max$  w przeliczeniu na kilogram masy ciała nie w pełni odzwierciedla status treningowy zawodnika (poprawę lub pogorszenie mechanizmów warunkujących poziom  $VO_2\max$ ), ponieważ nie jest jasne, czy wzrost lub spadek  $VO_2\max$  wynika ze zmian całkowitej masy ciała lub udziału komponentów składu ciała, np. masy tłuszczowej, czy też z faktycznych zmian adaptacyjnych kształtujących mechanizmy  $VO_2\max$ . Dlatego przy ocenie maksymalnej wydolności tlenowej zawodników na wysokim poziomie sportowym należy brać pod uwagę nie tylko  $VO_2\max$  w przeliczeniu na całkowitą masę ciała. Są przesłanki, by twierdzić, że wskaźnik  $VO_2\max$  w przeliczeniu na SMM może dostarczyć dodatkowych informacji na temat poziomu i zmian wytrenowania sportowca [Proctor i wsp. 1997, Beekley i wsp. 2006]. Ponadto wydaje się, że  $VO_2\max/SMM$  inaczej kształtuje się w zależności od charakteru dyscypliny sportu i podokresu roku treningowego niż standardowa miara wydolności tlenowej w odniesieniu do całkowitej masy ciała.

## 2. Cel i hipotezy badawcze

### Cel ogólny

Ocena poziomu i zmian maksymalnego pochłaniania tlenu w przeliczeniu na jednostkę masy mięśniowej u sportowców wyczynowych odmiennych specjalności.

### Cele szczegółowe

1. Ocena różnic w  $VO_2\max/SMM$  u zawodników odmiennych dyscyplin sportu – szybkościowo-siłowych i wytrzymałościowych.
2. Ocena zmian  $VO_2\max/SMM$  w rocznym cyklu treningowym.
3. Ocena różnic  $VO_2\max/SMM$  pomiędzy mężczyznami a kobietami uprawiającymi sport wyczynowy

### Hipotezy:

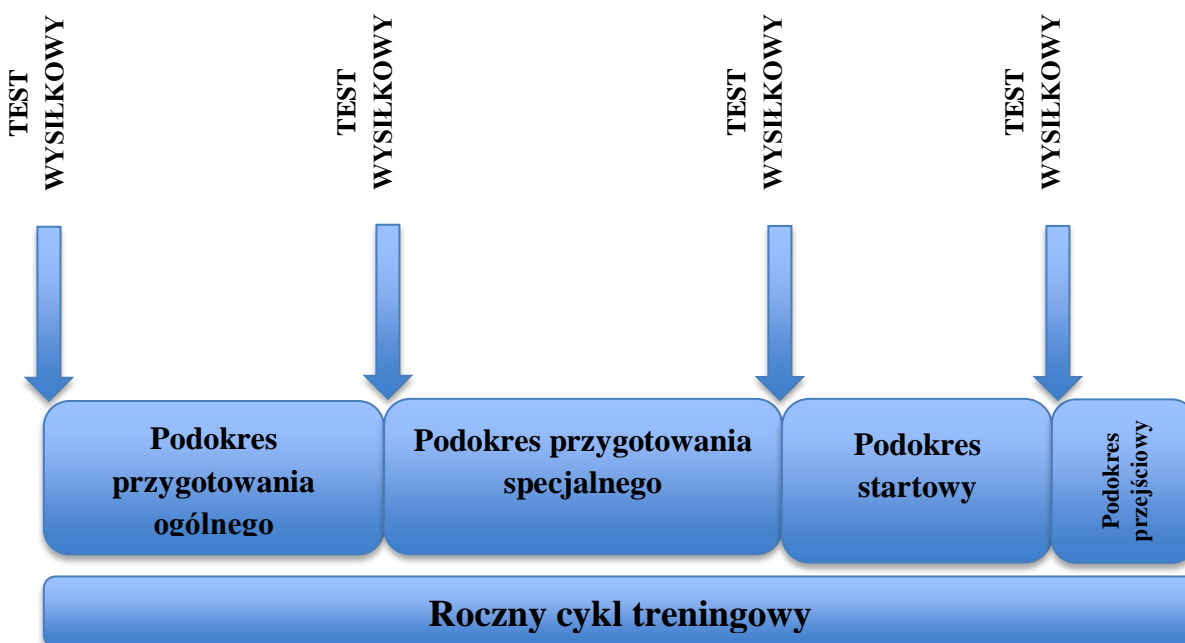
1. Wielkość różnicy w poziomie maksymalnej wydolności tlenowej między zawodnikami sportów wytrzymałościowych i szybkościowo-siłowych jest zależna od rodzaju zastosowanego wskaźnika (przeliczenie na całkowitą masę ciała lub SMM).
2.  $VO_2\max/SMM$  zmienia się w rocznym cyklu treningowym według innego wzorca niż  $VO_2\max/MC$ .
3.  $VO_2\max/SMM$  mężczyzn i kobiet o tej samej specjalności sportowej i podobnym poziomie wytrenowania nie różni się istotnie.

### 3. Materiał i metoda

#### *Zawodnicy*

W badaniach udział wzięli sportowcy wyczynowi specjalizujący się w sprincie lekkoatletycznym (kobiety, n=15; mężczyźni, n=15) (100 i 200 m) oraz sportach wytrzymałościowych (kobiety, n=15; mężczyźni, n=15), którzy reprezentują odmienne struktury obciążeń treningowych. Wszyscy badani zawodnicy są członkami kadr narodowych, dzięki czemu charakteryzują się podobnym poziomem wytrenowania (zawodnicy klasy mistrzowskiej, reprezentanci kraju w zawodach międzynarodowych – Puchary Świata, ME, MŚ, IO). Dodatkowo, dla porównania zbadano grupę kontrolną (mężczyźni, n=15), którą stanowiły osoby w wieku 22–33 lata uprawiające rekreacyjnie biegi.

Wszystkich uczestników przebadano w 4 terminach, które związane były z okresami treningowymi zawodników wyczynowych: (1) początek okresu przygotowania ogólnego, (2) początek przygotowania specjalnego, (3) początek okresu startowego i (4) początek okresu przejściowego rocznego cyklu treningowego (rycina 1). Czas trwania poszczególnych podokresów treningowych wynosił od 1 do 4 miesięcy. Taki czas jest wystarczający, aby spowodować w organizmie istotne zmiany metaboliczne.



Ryc. 1. Terminy badań w rocznym cyklu treningowym (opracowanie własne)

W każdym terminie badań dokonano pomiarów cech somatycznych, składu ciała oraz wysiłkowych wskaźników fizjologicznych i biochemicznych.

Materiał do badań został zebrany w latach 2014–2016 w ramach projektu "Rozwój sportu akademickiego" (nr grantu RSA2 041 52) finansowanego przez MNiSW, zatytułowanego "*Monitoring i optymalizacja procesu treningowego sportowców wysokiej klasy w aspekcie wydolności fizycznej, techniki ruchu i wspomagania psychologicznego. Badania nowoczesnymi metodami w rzeczywistych warunkach treningowych*" (kierownik grantu: dr hab. Krzysztof Kusy). Na realizację badań została wydana zgoda komisji bioetycznej przy Uniwersytecie Medycznym w Poznaniu. Wszyscy badani, zgodnie z Deklaracją Helsińską, zostali poinformowani o celu, przebiegu i ewentualnych ryzykach oraz o możliwości rezygnacji z badań na każdym etapie bez podawania przyczyny. Po zapoznaniu się ze wszystkimi informacjami, badani składali pisemną zgodę na udział w badaniach.

### ***Przygotowanie do badania***

Badania przeprowadzono w Laboratorium Analizy Ruchu Człowieka „LABTHLETICS” Zakładu Lekkiej Atletyki i Przygotowania Motorycznego Akademii Wychowania Fizycznego im. Eugeniusza Piaseckiego w Poznaniu. Podczas wszystkich badań w laboratorium utrzymywana była stała temperatura 20–21°C. Każdorazowo zawodnik przed przystąpieniem do badań proszony był o wypełnienie kwestionariuszy dotyczących aktywności fizycznej, stanu zdrowia, gotowości do badania wysiłkowego. Wykonano badania gęstości kości i składu ciała. Badani informowani byli o procedurze badania densytometrycznego i wysiłkowego, postępowaniu w trakcie oraz tuż po ich zakończeniu, a kilka dni wcześniej o sposobie przygotowania się do badań.

### ***Wysokość i masa ciała***

Masa oraz wysokość ciała zostały zmierzone za pomocą stacji pomiarowej SECA 285 (SECA, Hamburg, Germany). Urządzenie posiada III klasę dokładności i umożliwia zmierzenie wysokości ciała w zakresie od: 30 – 220 cm z dokładnością do 1 mm. Masa ciała mierzona jest z dokładnością do 50g.



### ***Pomiar składu ciała***

U zawodników w każdym terminie badań wykonano pomiar składu ciała metodą DXA (ang. *dual X-ray absorptiometry* – absorpcjometria promieniowania rentgenowskiego o podwójnej energii) przy użyciu densytometru Lunar Prodigy (GE HealthCare, USA). Celem badania było ilościowe ustalenie głównych komponentów ciała – masy tłuszczu, masy ciała szczupłego i masy składników mineralnych – oraz ich pochodnych. Przed badaniem przeprowadzony był wywiad mający na celu wykrycie przeciwwskazań do badania oraz uzyskanie informacji niezbędnych przy interpretacji wyników. Badanie zasadniczo wiąże się z minimalnym ryzykiem, ale nie powinno być wykonane jeśli:

- w ostatnich 2 tygodniach zawodnik miał RTG kontrastowe układu pokarmowego,
- w ostatnim tygodniu badany miał zdjęcie z użyciem izotopu lub kontrastu radioaktywnego,
- u zawodnika stwierdzono wysoki poziom wapnia we krwi (Oleksik i wsp. 2000).

Do badania zawodnicy przystępowali rano. Ponieważ bezpośrednio po badaniu składu ciała następował test wysiłkowy, zawodnicy przystąpili do pomiaru po lekkim śniadaniu. Dzień wcześniej oraz bezpośrednio przed badaniem nie wykonali intensywnego treningu. Zawodnicy przystępowali do badania w białym, bez obuwia i metalowych przedmiotów. Przed badaniem mierzono wysokość i masę ciała. Następnie zawodnicy układali się na łożu aparatu na plecach w wyprostowanej, swobodnej pozycji zgodnej ze standardami zaproponowanymi przez Nana i wsp. [2016]. W czasie skanowania badany spoczywał nieruchomo na łożu urządzenia w pozycji leżącej na plecach (ciało zawodnika znajdowało się pośrodku stołu skanera). Dłonie pacjenta spoczywały na bokach z kciukami skierowanymi ku górze, wewnętrzną stroną w kierunku nóg, a kończyny górne były ułożone wzdłuż ciała. Ręce nie dotykały nóg, a pomiędzy kończynami górnymi i tułowiem występowała mała szczelina powietrzna (ok. 3 cm). Badanie trwało łącznie około 15 minut, w tym skanowanie ciała trwało ok. 7 minut, podczas których ramię aparatu przesunęło się powoli nad ciałem. W czasie pomiaru zawodnik musiał pozostać w bezruchu. Analizy wyników dokonano za pomocą oprogramowania enCORE v12. Główne zmienne i ich pochodne uzyskane w pomiarze to:

- zawartość mineralna kości (BMC, ang. *bone mineral content*),
- masa tłuszczu (FM, ang. *fat mass*),
- masa ciała szczupłego (bez tłuszczu i minerałów kostnych) (LBM, ang. *lean body mass*),
- masa ciała szczupłego kończyn (ALST, ang. *appendicular lean soft tissue*),
- wskaźnik względnego umięśnienia (RSMI, ang. *relative skeletal muscle index*), liczony jako stosunek łącznej masy mięśniowej kończyn górnych i dolnych (kg) do wysokości ciała podniesionej do kwadratu (m<sup>2</sup>).

### ***Wyznaczanie masy mięśniowej***

Do wyliczenia masy mięśniowej wykorzystano wzór Kima i wsp. (2002):

$$SMM = (1.13 * ALST) - (0.02 * \text{wiek}) + 0.61 + 0.97, \text{ gdzie}$$

SMM - masa mięśniowa w kg,

ALST (ang. *appendicular lean soft tissue*) – suma masy ciała szczupłego kończyn górnych oraz kończyn dolnych w kg

$$ALST = LBM \text{ legs} + LBM \text{ arms}, \text{ gdzie}$$

LBM legs (ang. *lean body mass of legs*) – masa ciała szczupłego kończyn dolnych

LBM arms (ang. *lean body mass of arms*) – masa ciała szczupłego kończyn górnych

Wyliczono także wskaźnik względnego umięśnienia RSMI (ang. *relative skeletal muscle mass index*) według wzoru:

$$RSMI = ALST / H^2 \text{ [kg/m}^2\text{]}, \text{ gdzie}$$

ALST – jak wyżej,

H – wysokość ciała.

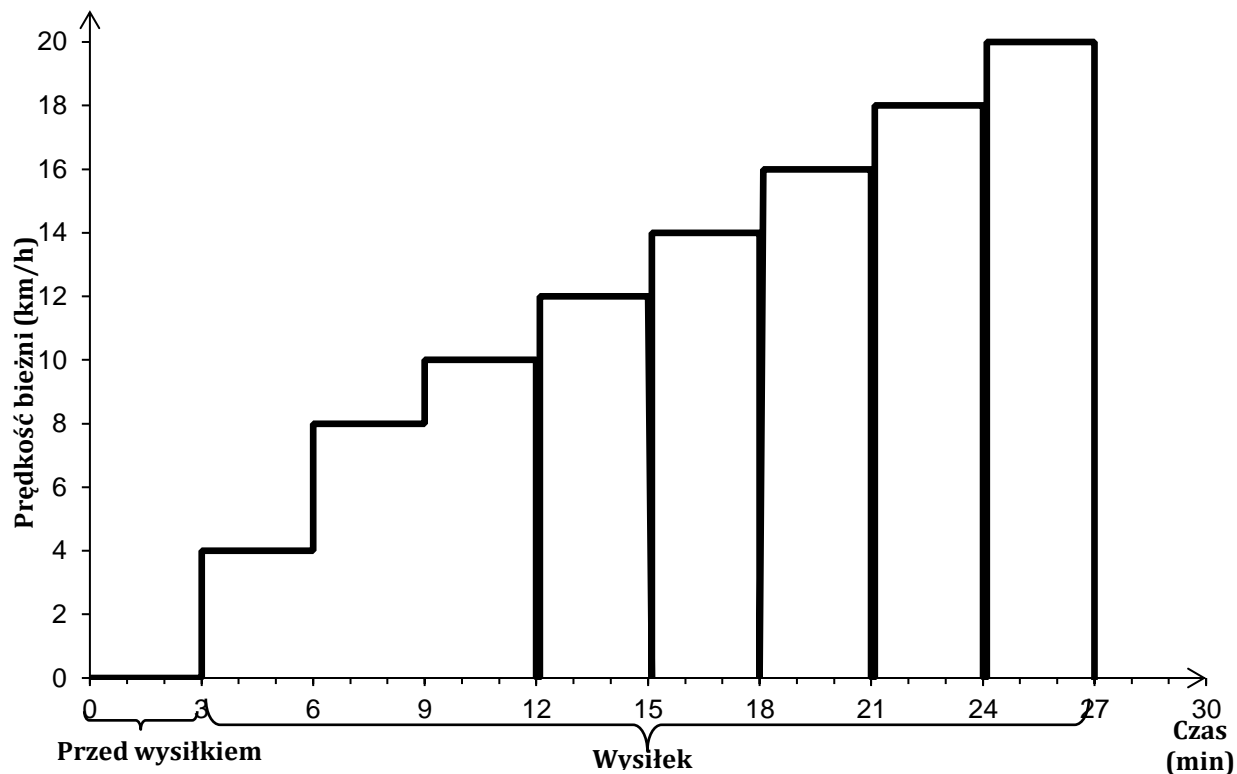
### ***Test wysiłkowy***

Badani zawodnicy poddani byli próbie wysiłkowej o wzrastającej intensywności do odmowy na bieżni mechanicznej (Pulsar 4.0, h/p/cosmos, Niemcy). Badanie wykonano przy użyciu ergospirometru firmy Cortex Medical (Niemcy) z analizatorem gazu MetaMax 3B-R2, który dokonuje analizy parametrów krążeniowo-oddechowych w każdym cyklu oddechowym (ang. *breath by breath*). Ergospirometr, każdorazowo przed rozpoczęciem badań, poddawany był kalibracji w celu zapewnienia rzetelnych wyników. Wszystkie parametry były rejestrowane metodą ciągłą przy użyciu systemu komputerowego z wykorzystaniem oprogramowania Metasoft Studio 5.2.0 SR3 (Cortex, Niemcy).

Każdy z zawodników przed przystąpieniem do badania był wypoczęty i zdrowy, co zapewniło wiarygodną ocenę wydolności. Zawodnicy zostali poinformowani, że na 24h przed badaniem mają nie wykonywać treningu oraz o konieczności zjedzenia bardzo lekkiego posiłku na 2–3 godziny przed przystąpieniem do testu. Badani przystępowali do testu w lekkim stroju biegowym oraz w obuwiu sportowym, co zapewniało im swobodę ruchu. Badanemu zakładano sprzęt pomiarowy: pas pulsometru na klatce piersiowej, maskę zbierającą powietrze na twarz, uprząż z ergospirometrem na klatce piersiowej i kamizelkę bezpieczeństwa. Po tych czynnościach badany stawał na bieżni, a analizatory gazów były każdorazowo kalibrowane względem powietrza toczenia. Wykonywano też kalibrację objętościową. Początkowo badany stał na bieżni przez 3 min. Test polegał na zwiększaniu obciążenia (prędkości biegu) aż do maksymalnego poziomu. Badanie rozpoczynało się od prędkości 4 km/h, następnie zwiększano prędkość do 8 km/h, a potem aż do końca testu o 2 km/h. Każdy etap trwał 3 minuty. Test kończył się przy prędkościach 14–22 km/h, zależnie od poziomu wytrenowania badanego i uprawianej dyscypliny. Oznacza to, że łącznie zawodnik przebywał na bieżni ok. 23–30 minut, z czego właściwa część testu (oprócz pozycji stojącej i rozgrzewki) trwała 11–18 min. Na rycinie 2 pokazano schematycznie zastosowany protokół testowy.

Test kończył się, gdy zawodnik sygnalizował podniesieniem ręki niemożność kontynuacji testu. Pomiar  $VO_2\max$  uznawano za prawidłowy, gdy zostały spełnione dodatkowo przynajmniej dwa z kolejnych kryteriów osiągnięcia wysiłku maksymalnego [Edvardsen i wps. 2014, Kusy i Zieliński 2014]:

- (1) wskaźnik RER na końcu testu  $\geq 1.10$ ,
- (2) HR na końcu testu bliskie ( $\pm 5$  sk.) przewidywanego  $HR_{max}$  dla danego wieku,
- (3) pochłanianie tlenu osiągnęło plateau przy wzrastającej intensywności testu,
- (4) poziom mleczanu we krwi przekroczył po wysiłku poziom 9 mmol/l.



Ryc. 2. Schemat przebiegu badania na bieżni mechanicznej [modyfikacja własna ze źródła: Kantanista i wsp. 2016]

Najważniejsze parametry, które były rejestrowane podczas wysiłku:

- HR - częstość skurczów serca (Polar Electro Bluetooth Smart - H6, Finlandia),
- VE - wentylacja minutowa,
- BF - częstość oddechów,
- TV - objętość oddechowca,
- $VO_2$  - pobór tlenu,
- $VCO_2$  - wydalanie dwutlenku węgla,

- RER - współczynnik oddechowy ( $VCO_2/VO_2$ ),
- $VE/VO_2$  - równoważnik oddechowy dla tlenu,
- $VE/VCO_2$  - równoważnik oddechowy dla dwutlenku węgla,
- $PET_{O_2}$  - ciśnienie parcjalne tlenu na końcu wydechu,
- $PET_{CO_2}$  - ciśnienie parcjalne dwutlenku węgla na końcu wydechu.

Po teście wyznaczono następujące parametry:

- $VO_{2max}$  – maksymalne pochłanianie tlenu w wartościach absolutnych (ml/min),
- $VO_{2max}$  – maksymalne pochłanianie tlenu w przeliczeniu na całkowitą masę ciała (ml/min/kg MC),
- $VO_{2max}$  – maksymalne pochłanianie tlenu w przeliczeniu na masę mięśniową (ml/min/kg SMM).
- LA – poziom mleczanu przed wysiłkiem oraz 3 min po wysiłku.

#### 4. Przykłady

##### *Przykład 1*

W tabeli 4 zostały przedstawione zmiany maksymalnego poboru tlenu sprintera i długodystansowca w rocznym cyklu treningowym, wyrażone w wartościach absolutnych, w przeliczeniu na masę ciała i SMM. Wartości absolutne generalnie wzrastają u obu zawodników od podokresu roztrenowania do startowego. Wzrost ten jest większy u długodystansowca niż u sprintera. Paradoksalnie, w całym roku treningowym u sprintera stwierdzono wyższy poziom absolutnego  $VO_{2max}$ , co wynika z większych rozmiarów ciała (masa, w tym masa mięśniowa, i wysokość ciała). Wartości względne  $VO_{2max}$  w przeliczeniu na całkowitą masę ciała pozostały stałe u sprintera w całym roku treningowym, podczas gdy u długodystansowca nastąpił znaczny wzrost. Wartości te były też znacznie wyższe u długodystansowca.  $VO_{2max}/SMM$  malało nieco w trakcie roku treningowego u sprintera, natomiast zwiększała się w przypadku długodystansowca. Ponadto u długodystansowca wzrost  $VO_{2max}/SMM$  był większy niż wzrost  $VO_{2max}/MC$ . Pokazuje to, że mechanizmy pochłaniania tlenu uległy faktycznej poprawie u długodystansowca, niezależnie od ewentualnych zmian w masie i składzie ciała.

Tab.4. Zmiany maksymalnego poboru tlenu sprintera i długodystansowca w rocznym cyklu treningowym, wyrażone w wartościach absolutnych, w przeliczeniu na masę ciała i masę mięśniową (Źródło: baza danych Zakładu Lekkiej Atletyki i Przygotowania Motorycznego)

	Roztrenowanie	Podokres przygotowania ogólnego	Podokres przygotowania specjalnego	Podokres startowy	Zmiana (%) Roztrenowanie – Start
<i>Sprinter</i>					
VO <sub>2</sub> max (ml/min)	4435	4582	4513	4586	3.4
VO <sub>2</sub> max (ml/min/kg MC)	49	49	49	49	0
VO <sub>2</sub> max (ml/min/kg SMM)	101	97	97	99	-2.0
<i>Długodystansowiec</i>					
VO <sub>2</sub> max (ml/min)	3500	4140	4148	4326	24
VO <sub>2</sub> max (ml/min/kg MC)	56	65	68	70	25
VO <sub>2</sub> max (ml/min/kg SMM)	116	144	148	155	34

MC – masa ciała, SMM – masa mięśniowa, VO<sub>2</sub>max – maksymalny pobór tlenu

### *Przykład 2*

W tabeli 5 zostały przedstawione wstępne analizy dotyczące wartości maksymalnego poboru tlenu kobiet i mężczyzn uprawiających sporty wytrzymałościowe na tle charakterystyk somatycznych. Kobiety i mężczyźni różnili się znacząco wysokością i masą ciała oraz zawartością SMM i masy tłuszczu. Zauważyć można też znaczące różnice w bezwzględnej wartości VO<sub>2</sub>max oraz w przeliczeniu VO<sub>2</sub>max na całkowitą masę ciała, wynikające z większych rozmiarów ciała i większej zawartości SMM oraz mniejszej zawartości tłuszczu u mężczyzn. Natomiast brak jest znaczących statystycznie różnic pomiędzy płciami w wartości VO<sub>2</sub>max na SMM.

Tab. 5. Parametry wydolnościowe badanych mężczyzn i kobiet uprawiających sporty wytrzymałościowe. wyrażone w wartościach absolutnych, w przeliczeniu na masę ciała i masę mięśniową (źródło: baza danych Zakładu Lekkiej Atletyki i Przygotowania Motorycznego)

	Kobiety n=7	Mężczyźni n=19	Różnica	<i>p</i>	$\eta^2$
Wiek (lata)	24.0±6.6	22.7±4.3	1.3	= 0.552	0.015
Wysokość ciała (cm)	169.9±3.3	181.8±6.2	12.2 <sup>#</sup>	< 0.001	0.500
Masa ciała (kg)	57.9±4.5	71.7±6.9	13.8 <sup>#</sup>	< 0.001	0.500
SMM (kg)	23.4±2.9	32±3.15	8.6 <sup>#</sup>	< 0.001	0.628
SMM (%)	40.2±2.3	44.7±1.4	4.5 <sup>#</sup>	< 0.001	0.601
FAT (kg)	10.9±2.0	9.5±2.1	-1.4	= 0.133	0.092
FAT (%)	19±3.9	13.2±2.1	-5.8 <sup>#</sup>	< 0.001	0.505
VO <sub>2max</sub> (ml/min)	3438±473	4808±484	1370 <sup>#</sup>	< 0.001	0.633
VO <sub>2max</sub> (ml/min/kg MC)	59.3±6.0	67.1±3.9	7.8 <sup>#</sup>	< 0.001	0.387
VO <sub>2max</sub> (ml/min/kg SMM)	147.8±14.1	150.4±11.6	2.6	= 0.602	0.011

<sup>#</sup> - różnica istotna statystycznie między kobietami a mężczyznami; *p* - poziom istotności różnicy;  $\eta^2$  - wielkość efektu

Skróty: FAT – masa tłuszczu; MC – masa ciała; SMM – masa mięśniowa; VO<sub>2max</sub> – maksymalne pochłanianie tlenu.

## Piśmiennictwo

1. Aagaard P, Andersen J (2010) *Effects of strength training on endurance capacity in top-level endurance athletes*. Scand J Med Sci Sports, 20(2), 39–47.
2. Abe T, Dankel S, Buckner S, Jessee M, Mattocks K, Mouser G, Bell Z, Loenneke J (2019) *Differences in 100-m sprint performance and skeletal muscle mass between elite male and female sprinters*. J Sports Med Phys Fitness. 59(2), 304-309.
3. Andreato L, Santos J, Esteves J, Panissa V, Julio U, Franchini E (2016) *Physiological, Nutritional and Performance Profiles of Brazilian Jiu-Jitsu Athletes*. J Hum Kinet. 14, 261-271.
4. Åstrand P, Rodahl K, Dahl H, Strømme S (2003) *Textbook of Work Physiology-4th Edition. Physiological Bases of Exercise*. Human Kinetics, Champaign. p. 570-634.
5. Åstrand P, Saltin B (1961) *Maximal oxygen uptake and heart rate in various types of muscular activity* J. Appl. Physiol. 16, 977-981.
6. Bassett Jr, Howley E (2000) *Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance* Med. Sci. Sports Exerc., 32, No. 1, pp. 70–84.
7. Bean A (2013) *The complete guide to sports nutrition*. ZYSK with Bloomsbury Publishing
8. Beekley M, Abe T, Kondo M, Midorikawa T, Yamauchi T (2006) *Comparison of normalized maximum aerobic capacity and body composition of sumo wrestlers to athletes in combat and other sports* J Sports Sci Med. 1(5), 13-20.
9. Bentley D, Newell J, Bishop D (2007) *Incremental exercise test design and analysis: implications for performance diagnostics in endurance athletes*. Sports Med. 37(7), 575-586.
10. Boushel R, Gnaiger E, Calbet J, Gonzalez-Alonso J, Wright-Paradis C, Sondergaard H, Ara I, Helge J, Saltin B (2011) *Muscle mitochondrial capacity exceeds maximal oxygen delivery in humans*. Mitochondrion. 11(2), 303- 307.
11. Boushel R, Gnaiger E, Calbet J, Gonzalez-Alonso J, Wright-Paradis C, Sondergaard H, Ara I, Helge J.W, Saltin B (2011) *Muscle mitochondrial capacity exceeds maximal oxygen delivery in humans*. Mitochondrion. 11(2), 303- 307.
12. Carter J, Heath B (1990) *Somatotyping: development and applications*. Cambridge: Cambridge University Press.
13. Cerretelli P, Di Prampero P (1987) *Gas exchange in exercise*. In: *Handbook of Physiology*. American Physiological Society. 13, 297–339.
14. Chaouachi M, Chaouachi A, Chamari K, Chtara M, Feki Y, Amri M, Trudeau F (2005) *Effects of dominant somatotype on aerobic capacity trainability*. Br J Sports Med. 39, 954–959.
15. Coggan A, Spina R, King D, Rogers M, Brown M, Nemeth P, Holloszy J (1992) *Skeletal muscle adaptations to endurance training in 60- to 70-yr-old men and women*. Appl. Physiol. May; 72(5), 1780-6.
16. Cosgrove M, Wilson J, Watt D, Grant S (1999) *The relationship between selected physiological variables of rowers and rowing performance as determined by a 2000 m ergometer test*. J Sports Sci. 17, 845–52.



17. Dehghan H, Habibi E, Moghiseh M, Hasanzadeh A (2014) *Study of the relationship between the aerobic capacity (VO<sub>2</sub>max) and the rating of perceived exertion based on the measurement of heart beat in the metal industries Esfahan*. J Educ Health Promot. 3, 55.
18. Dencker M, Thorsson O, Karlsson M, Lindén C, Eiberg S, Wollmer P, Andersen L (2007) *Gender differences and determinants of aerobic fitness in children aged 8-11 years*. Eur. J. Appl. Physiol. 99(1), 19-26.
19. Ekblom B, Wilson B, Astrand P (1976) *Central circulation during exercise after venesection and reinfusion of red blood cells*. J. Appl. Physiol. 40, 379–383.
20. Farinatti B, Neto C (2011) *The effect of between-set rest intervals on the oxygen uptake during and after resistance exercise sessions performed with large- and small-muscle mass*. Journal of Strength and Conditioning Research, 25(11), 3181–90.
21. Frank P, Andersson E, Pontén M, Ekblom B, Ekblom M, Sahlin K (2016) *Strength training improves muscle aerobic capacity and glucose tolerance in elderly*. Scand J Med Sci Sports. 26(7), 764-73.
22. Gianoli D, Knechtle B, Knechtle P, Barandun U, Rust CA, Rosemann T (2012) *Comparison between recreational male Ironman triathletes and marathon runners*. Percept Mot Skills. 115, 283–99.
23. Gibson A, Ojiambol R, Konstabel K, Lieberman D, Reilly J, Speakman J, Pitisiladis Y (2013) *Aerobic capacity, activity levels and daily energy expenditure in male and female adolescents of Kenyan Nandi Sub-Group*. PLoS One: 8(6), 1-8.
24. Górski J (2011) *Fizjologiczne podstawy wysiłku fizycznego*, Wydawnictwo Lekarskie PZWL Warszawa 145, 491-506.
25. Grassi B (2006) *Oxygen uptake kinetics: Why are they so slow? And what do they tell us?* J. Physiol. Pharmacol. 57(10), 53-65.
26. Hawley J, Burke L, Phillips S, Spriet L (2011) *Nutritional modulation of training-induced skeletal muscle adaptations*. J. Appl. Physiol. 110(3), 834- 845.
27. Hawley J (2002) *Adaptations of skeletal muscle to prolonged, intense endurance training*. Clin. Exp. Pharmacol. Physiol. 29(3), 218-222.
28. Hill A, Lupton H (1924) *Muscular exercise, lactic acid and the supply and utilisation of oxygen: Parts VII-VIII*. Proc. Roy. Soc. B 97, 155–176.
29. Hoppeler H, Weibel E.R (2000) *Structural and functional limits for oxygen supply to muscle*. Acta Physiol. Scand.168(4), 445-456.
30. Hunter G, Weinsier R, McCarthy J, Larson-Meyer E, Newcomer B (2011) *Hemoglobin, muscle oxidative capacity, and VO<sub>2</sub>max in African-American and Caucasian women*. Med Sci Sports Exerc. 33(10), 1739-43.
31. Jaskólski A, Jaskólska A (2006) *Podstawy fizjologii wysiłku fizycznego z zarysem fizjologii człowieka*. Wydawnictwo AWF, Wrocław.
32. Joyner J, Coyle E (2008) *Endurance exercise performance: the physiology of champions*. The Journal of Physiology 35-44.
33. Kenney W, Wilmore J, Costill D (2012) *Physiology of Sport and Exercise (ed. 5)*. Human Kinetics, Champaign.

34. Kim J, Wang Z, Heymsfield S, Baumgartner R, Gallagher D (2002) *Total-body skeletal muscle mass: estimation by a new dual-energy X-ray absorptiometry method*. American Journal of Clinical Nutrition, 76, 378–83.
35. Knechtle B (2014) *Relationship of Anthropometric and Training Characteristics with Race Performance in Endurance and Ultra-Endurance Athletes*. Asian J Sports Med. 5(2), 73–90.
36. Kusy K, Zieliński J (2014) *Aerobic capacity in speed-power athletes aged 20-90 years vs endurance runners*. Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports, 24(1), 68-79.
37. Kutac P, Sigmund M (2017) *Assessment of body composition of female volleyball players of various performance levels*. Journal of Physical Education and Sport. 8(12):101-110.
38. Laursen P (2010) *Training for intense exercise performance: high-intensity or high-volume training?* Scand. J. Med. Sci. Sports. 20 (2), 1-10.
39. Magel J, McArdle W, Toner M, Delio D (1978) *Metabolic and cardiovascular adjustment to arm training*. J. Appl. Physiol. Jul; 45(1), 75- 9.
40. Malá, L, Malý, T, Zahálka, F, Bunc V (2010) *The profile and comparison of body composition of elite female volleyball players*. Kinesiology. 42(1), 90–97.
41. Martín-Matillas M, Valadés D, Hernández-Hernández E, Olea-Serrano F, Sjöström M, Delgado-Fernández M, Ortega F (2014) *Anthropometric, body composition and somatotype characteristics of elite female volleyball players from the highest Spanish league*. J Sports Sci. 32(2), 137-48.
42. McGuire B, Secomb T (2003) *Estimation of capillary density in human skeletal muscle based on maximal oxygen consumption rates*. Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol. 285(6), H2382-H2391.
43. McGuire J, Secomb W (2001) *A theoretical model for oxygen transport in skeletal muscle under conditions of high oxygen demand*. Journal of Applied Physiology 91(5), 55-65.
44. McLaughlin J, Howley E, Bassett Jr (2010) *Test of the classic model for predicting endurance running performance*. Med Sci Sports Exerc. 42, 991–7.
45. Nana A, Slater G., Hopkins W., Halson S., Martin D., West N., Burke L (2016). *Importance of Standardized DXA Protocol for Assessing Physique Changes in Athletes*. International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism, 26, 259 -267.
46. Nikolic S, Todorovska L, Maleska V, Dejanova B, Efremova L, Zivkovic V, Pluncevic-Gligoroska J (2014) *Analysis of Body Mass Components in National Club Football Players in Republic of Macedonia*. Med Arch. Jun; 68(3), 191–194.
47. Noakes TD (2001) *Lore of running. Human Kinetics*. Oxford University Press Southern Africa. Fourth Edition.
48. Proctor D, Joyner M (1997) *Skeletal muscle mass and the reduction of VO<sub>2max</sub> in trained older subjects*. Journal of Applied Physiology, 82(5), 1411-5.
49. Rapoport B (2010) *Metabolic factors limiting performance in marathon runners*. PLoS Comput. Biol. 6(10).
50. Ronikier A (2008) *Fizjologia wysiłku w sporcie fizjoterapii i rekreacji*. Centralny Ośrodek Sportu, Warszawa.

51. Ronnestad B, Hansen E, Raastad T (2010) *Effect of heavy strength training on thigh muscle cross-sectional area, performance determinants, and performance in well-trained cyclists*. Eur J Appl Physiol. 108, 965–975.
52. Rust C, Knechtle B, Knechtle P, Rosemann T (2012) *Similarities and differences in anthropometry and training between recreational male 100-km ultra-marathoners and marathoners*. J Sports Sci. 30, 1249–57.
53. Sadowska J, Gębczyński A, Konarzewski M (2017) *Selection for high aerobic capacity has no protective effect against obesity in laboratory mice*. Physiology & Behavior. 175, 130-136.
54. Sakthivelavan D, Sumathilatha S (2009) *Aerobic capacity in endurance trained and resistance trained athletes*. Journal of Exercise Science and Physiotherapy 5(2), 126-131.
55. Saltin B, Blomquist B, Mitchell J, Johnson R, Wildenthal K, Chapman C (1968) *Response to submaximal and maximal exercise after bed rest and after training*. Circulation 38(7), 1–78.
56. Sanada K, Kearns C, Kojima K, Abe T (2005) *Peak oxygen uptake during running and arm cranking normalized to total and regional skeletal muscle mass measured by magnetic resonance imaging*. Eur J Appl Physiol. 93, 687-693.
57. Sandbakk Ø, Welde B, Holmberg H (2011) *Endurance training and sprint performance in elite junior cross-country skiers*. J. Strength Cond. Res. 25(5), 1299-1305.
58. Sandbakk Ø, Solli G, Holmberg H (2018) *Sex Differences in World-Record Performance: The Influence of Sport Discipline and Competition Duration*. Int J Sports Physiol Perform. 13(1), 2-8
59. Spent L, Martin A, Drinkwater D (1993) *Muscle mass of competitive male athletes*. J Sports Sci. 11(1), 3-8.
60. Vogiatzis I, Zakynthinos S, Georgiadou O, Golemati S, Pedotti A, Macklem P.T, Roussos C, Aliverti A (2007) *Oxygen kinetics and debt during recovery from expiratory flow-limited exercise in healthy humans*. Eur. J. Appl. Physiol. 99 (3), 265-274.
61. Weiss E, Spina R, Holloszy J, Ehsani A (2006) *Gender differences in the decline in aerobic capacity and its physiological determinants during the later decades of life*. J. Appl. Physiol. 101 (3), 938-944.
62. Wilmore J, Costill D (2004) *Physiology of sport and exercise*. Human Kinetics
63. Zwiren L, Freedson P, Ward A, Wilke S, Rippe J (2013) *Estimation of VO<sub>2</sub>max: A Comparative Analysis of Five Exercise Tests*. Research Quarterly for Exercise and Sport. 62(1), 73-8.