

**Akademia Wychowania Fizycznego i Sportu  
im. Jędrzeja Śniadeckiego w Gdańsku**



**mgr Krzysztof Fostiak**

**Międzywysiłkowe ograniczenie przepływu krwi  
a możliwości siłowe kończyn dolnych**

promotor:

dr hab. Michał Wilk, prof. AWF Katowice

**Gdańsk 2023**

## SPIS TREŚCI

|                                                                                                                                  |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>WPROWADZENIE</b> .....                                                                                                        | <b>4</b>  |
| <b>1. PROBLEMATYKA BADAWCZA W ŚWIELE LITERATURY</b> .....                                                                        | <b>12</b> |
| 1.1. Wpływ ograniczenia przepływu krwi na poziom aktywności mięśniowej.....                                                      | 16        |
| 1.2. Wpływ ograniczenia przepływu krwi na wartości momentu siły mięśniowej .....                                                 | 17        |
| <b>2. METODOLOGICZNE PODSTAWY BADAŃ WŁASNYCH</b> .....                                                                           | <b>19</b> |
| 2.1. Cel pracy .....                                                                                                             | 20        |
| 2.2. Hipotezy badawcze .....                                                                                                     | 21        |
| 2.3. Materiał badawczy .....                                                                                                     | 21        |
| 2.4. Sesja zapoznawcza.....                                                                                                      | 23        |
| 2.5. Sesje eksperymentalne .....                                                                                                 | 23        |
| 2.6. Procedura ograniczenia przepływu krwi.....                                                                                  | 26        |
| 2.7. Elektromiograficzny pomiar aktywności mięśniowej .....                                                                      | 27        |
| 2.8. Dynamometryczny pomiar momentów siły mięśniowej .....                                                                       | 27        |
| 2.9. Narzędzia analizy statystycznej .....                                                                                       | 28        |
| <b>3. WYNIKI BADAŃ</b> .....                                                                                                     | <b>30</b> |
| 3.3. Analizy statystyczne szczytowych wartości momentów siły mięśniowej .....                                                    | 30        |
| 3.4. Analizy statystyczne dla poziomu aktywności mięśniowej .....                                                                | 32        |
| <b>4. DYSKUSJA</b> .....                                                                                                         | <b>34</b> |
| 4.1. Zmiany wartości momentu siły mięśniowej w wyniku zastosowania metody<br>międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi ..... | 35        |
| 4.2. Zmiany poziomu aktywności mięśniowej w wyniku zastosowania metody<br>międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi .....    | 42        |
| <b>5. OGRANICZENIA</b> .....                                                                                                     | <b>47</b> |
| <b>6. DALSZE BADANIA</b> .....                                                                                                   | <b>49</b> |
| <b>7. PODSUMOWANIE</b> .....                                                                                                     | <b>50</b> |
| <b>8. WNIOSKI</b> .....                                                                                                          | <b>51</b> |
| <b>STRESZCZENIE</b> .....                                                                                                        | <b>52</b> |
| <b>SUMMARY</b> .....                                                                                                             | <b>53</b> |
| <b>BIBLIOGRAFIA</b> .....                                                                                                        | <b>54</b> |
| <b>SPIS TABEL</b> .....                                                                                                          | <b>69</b> |
| <b>SPIS RYCIN</b> .....                                                                                                          | <b>69</b> |

## **OZNACZENIA I SKRÓTY UŻYTE W PRACY**

ANOVA - analysis of variance = analiza wariancji

AOP - areterial occlusion pressure = wartość ciśnienia w opasce powodująca całkowite zablokowanie przepływu krwi tętniczej

BFR - blood flow restriction = ograniczenie przepływu krwi

CI - confidence interval = przedział ufności

sEMG - elektromiografia powierzchniowa

MVC - maximum voluntary contraction – maksymalny dowolny skurcz

PAPE - post activation performance enhancement = po-aktywacyjny wzrost sprawności fizycznej

1RM - one repetition maximum = jedno powtórzenie maksymalne

## WPROWADZENIE

Siła mięśniowa odgrywa istotną rolę w wielu dyscyplinach sportowych (Suchomel i wsp. 2016). Kształtowanie tej zdolności motorycznej poprzez trening sportowy korzystnie wpływa na poprawę sprawności fizycznej i wyników sportowych (Pauletto, 1991; Pauletto, 1994; Komi, 2003; Suchomel i wsp. 2016), a także jest skuteczną formą profilaktyki zdrowotnej oraz ogranicza ryzyko występowania kontuzji (Fostiak i wsp., 2015; Zatsiorsky i wsp., 2020). Adaptacja w następstwie treningu siły mięśniowej, związana jest z mechanizmami nerwowo-mięśniowymi oraz zmianami morfologicznymi (Bird i wsp., 2005; Folland i Williams, 2007; Komi, 2003). Adaptacja nerwowo-mięśniowa wynika z usprawnienia pobudzenia odruchowego, modyfikacji wzorca rekrutacji jednostek motorycznych, poprawy synchronizacji jednostek ruchowych oraz zmiany częstotliwości wysyłanych impulsów nerwowych do pracujących obszarów mięśniowych (Folland i Williams, 2007; Komi i wsp. 2003). Z kolei przemiany morfologiczne powstałe w wyniku treningu oporowego, są efektem hipertrofii miofibrylarnej i głównie objawiają się wzrostem przekroju poprzecznego mięśni. Zmiany mogą obejmować również modyfikację proporcji włókien mięśniowych na korzyść szybko kurczliwych w stosunku do wolno kurczliwych (Coffey i Hawley, 2007; Norrbrand i wsp., 2008; Seynnes i wsp., 2007). Wpływ różnych form treningu oporowego na proces adaptacji nerwowo-mięśniowej został szeroko zbadany, na podstawie czego powstały rekomendacje w zakresie optymalnych parametrów treningu kształtującego maksymalną siłę czy hipertrofię mięśniową (Krzysztofik i wsp., 2019; Lacio i wsp., 2021). Badania wykazały, że stosowanie zarówno niskiego jak i wysokiego obciążenia zewnętrznego (30% vs. 80% 1RM; RM - jedno maksymalne powtórzenie) w ramach treningu oporowego, powoduje istotny wzrost przekroju poprzecznego mięśni (Krzysztofik i wsp., 2019; Lacio i wsp., 2021). Jednakże należy zwrócić uwagę na fakt, że w przypadku stosowania niskiego obciążenia zewnętrznego (30% 1RM) do wywołania korzystnych efektów hipertroficzych, konieczne jest wykonywanie serii treningowych do odmowy wysiłkowej. Przeciwnie, w przypadku stosowania wysokiego obciążenia zewnętrznego (powyżej 70% 1RM) w celu uzyskania efektu hipertrofii mięśniowej, nie ma konieczności realizacji wysiłku z maksymalną liczbą powtórzeń w serii. W przypadku, gdy celem treningu oporowego jest kształtowanie maksymalnej siły mięśniowej, dotychczasowe badania wskazały, że wysokie obciążenia zewnętrzne (80 - 100% 1RM) powodują większy wzrost poziomu siły mięśniowej w porównaniu do niższych wartości obciążenia zewnętrznego (Anderson i wsp., 1982; Jenkins i wsp., 2016; Lasevicius i wsp., 2018; Schoenfeld i wsp.,

2015). Pomimo, że badania naukowe szeroko analizują zmiany adaptacyjne w następstwie treningu oporowego, to nadal występuje wiele sprzecznych lub kontrowersyjnych wyników badań naukowych (Tanimoto i wsp., 2006; Lopes i wsp., 2017; Nobrega i wsp., 2018; Lasevicius i wsp., 2019), co wskazuje na dalszą potrzebę naukowej eksploracji w tej dziedzinie. Co więcej, zarówno w sporcie wyczynowym, szeroko rozumianej rekreacji ruchowej, czy profilaktyce zdrowotnej, poszukuje się nowych rozwiązań, które nie tylko wspomogą proces treningowy, ale także pozwolą na przekroczenie dotychczasowych granic możliwości wysiłkowych, a tym samym spowodują wyższe powysiłkowe zmiany adaptacyjne.

Spośród wielu innowacyjnych rozwiązań treningowych, w ostatnich latach szczególnie szeroko badane są zarówno bezpośrednie, jak i długofalowe zmiany adaptacyjne w następstwie różnych form aktywności fizycznej z ograniczonym przepływem krwi. (z ang. BFR (z ang. Blood Flow Restriction - Ograniczenie przepływu krwi) wywołane jest poprzez ucisk zakładanych na proksymalną część kończyn (dolnych lub/i górnych) oraz napompowanych do odpowiedniego ciśnienia opasek/mankietów kompresyjnych. W opaskach tych można wykonywać różne formy wysiłku: bieg (Paton i wsp., 2017), jazda na cykloergometrze (Thomas i wsp., 2018), ćwiczenia oporowe (Yasuda i wsp., 2011), pływanie (Held i wsp., 2023).

Wysiłek fizyczny realizowany z jednoczesnym ograniczeniem przepływu krwi, powoduje wywołanie zmian metabolicznych, niemożliwych do osiągnięcia przy zastosowaniu tradycyjnych środków treningowych, co tym samym potencjalnie przyczynia się do osiągnięcia wyższych zmian adaptacyjnych (Wilk i wsp., 2021a; Loenneke i wsp., 2012). W wyniku zastosowania opasek uciskowych podczas ćwiczeń oporowych, najwyższy wzrost reakcji fizjologicznych zachodzi w części dystalnej kończyny (względem umiejscowienia mankieta kompresyjnego), jednakże efekty adaptacyjne mogą mieć charakter globalny, ogólnoustrojowy (Enko i wsp., 2011; Foster i wsp., 2011; Barbosa i wsp., 2014; Kraus i wsp., 2015). Dodatkowo autorzy badań wskazują, że reakcje występujące bezpośrednio po przywróceniu właściwego krążenia krwi (reperfuzji), również mogą mieć istotne znaczenie w procesie adaptacji (Suzuki i wsp., 2000; Hudlicka i Brown, 2009; Evans i wsp., 2010; Enko i wsp., 2011).

Występuje wiele czynników mających wpływ na poziom i wielkość zmian adaptacyjnych w następstwie stosowania ograniczenia przepływu krwi jednym, z nich jest wartość stosowanego ciśnienia w opasce uciskowej. Hunt i wsp. (2016) oraz Singer i wsp. (2019) podkreślają, że wartość ta ma bezpośredni wpływ na poziom redukcji przepływu krwi

w tętnicach i żyłach. W wielu badaniach, analizujących zmiany adaptacyjne powstałe w następstwie treningu z ograniczeniem przepływu krwi, stosowano stałą wartość ciśnienia w mankiecie kompresyjnym dla wszystkich uczestników, nie zważając na różnice morfologiczne, co z metodologicznego punktu widzenia jest niepoprawne (Fahs i wsp., 2012). W celu optymalnego wykorzystania mankietów uciskowych, należy w pierwszej kolejności indywidualnie każdej osobie określić minimalną wartość ciśnienia w opasce, które spowoduje całkowite zablokowanie przepływu krwi tętniczej (AOP z ang. arterial occlusion pressure; McEwen i wsp., 2018). Wartość AOP stanowi punkt wyjściowy do określania właściwego ciśnienia stosowanego podczas poszczególnych form aktywności fizycznej, indywidualnie i niezależnie dla każdego uczestnika. Czynniki mającymi największy wpływ na wartość AOP są: szerokość opaski uciskowej, obwód kończyny oraz pozycja, w której wykonywany jest pomiar. W celu całkowitego zablokowania przepływu krwi tętniczej w kończynie szersza opaska uciskowa wymaga niższej wartości ciśnienia względem węższego mankieta (Loenneke i wsp., 2011a; McEwen i wsp., 2018). Ponadto, wartość ciśnienia w opasce uciskowej powodująca zablokowanie przepływu krwi jest wyższa, im większy był obwód kończyny (Loenneke i wsp., 2011a). Również wartość AOP uzyskana w pozycji leżącej jest niższa w stosunku do wartości uzyskiwanej w pozycji siedzącej (Hughes i wsp., 2018; Sieljack i wsp., 2018; Karanasios i wsp., 2021). Dodatkowo wyniki najnowszych badań własnych przeprowadzonych w trakcie pisania niniejszej dysertacji wykazały, że wartość AOP może różnić się pomiędzy kończynami osoby badanej (prawa względem lewej kończyny dolnej). Co więcej, także ciśnienie w opasce wymagane do całkowitego zablokowania przepływu krwi może ulec zmianie w następstwie wykonania aktywności fizycznej (Bichowska i Fostiak, 2023). Zmienna wartość AOP pomiędzy prawą a lewą kończyną, jak również wpływ wysiłku fizycznego dotychczas nie były analizowane i brane pod uwagę w badaniach naukowych. W praktyce, pomiar AOP polega na stopniowym zwiększaniu ciśnienia w opasce uciskowej do momentu ustania tętna w odcinku dystalnym kończyny. Pomiaru pulsu w kończynie dolnej wykonuje się na tętnicy piszczelowej tylnej, natomiast w kończynie górnej na tętnicy promieniowej za pomocą urządzenia dopplerowskiego (Bezerra i wsp., 2016, Laurentino i wsp., 2020).

Wykorzystanie ograniczenia przepływu krwi w treningu oporowym powoduje wzmożenie szeregu bezpośrednich reakcji fizjologicznych. Wysiłek wykonywany z niskimi obciążeniami zewnętrznymi (20% 1RM), w warunkach ograniczonego przepływu krwi, może powodować wyższą rekrutację włókien szybko kurczliwych oraz zwiększony stres metaboliczny w dystalnej części kończyny w porównaniu do tradycyjnego wysiłku z

wysokim obciążeniem zewnętrznym (Takarada i wsp., 2000; Manimmanakorn i wsp., 2013). Zgromadzenie dużej ilości metabolitów w kończynie poddanej niedokrwieniu prowadzi do obniżenia pH oraz wzmożonych odpowiedzi układu hormonalnego (Madarame i wsp., 2010; Manini i wsp., 2012; Pearson i wsp., 2015). W efekcie wysiłku z niskim obciążeniem zewnętrznym (20% 1RM) oraz ograniczeniem przepływu krwi, zaobserwowano wyższy powysiłkowy wzrost stężenia hormonu wzrostu (Takarada i wsp., 2000, Suga i wsp., 2009) oraz insulinopodobnego czynnika wzrostu IGF-1 w stosunku do warunków kontrolnych (Takano i wsp., 2005). Co więcej, połączenie wysiłku z niskim obciążeniem zewnętrznym i BFR, powoduje wyższy poziom aktywności jednostek motorycznych (Loenneke i wsp., 2011b, Yasuda i wsp., 2013), zwiększony obrzęk komórek (Loenneke i wsp., 2012), a także wzmożoną syntezę białek mięśniowych (Fujita i wsp., 2007) i proliferację komórek satelitarnych (Nielsen i wsp., 2012) w stosunku do wysiłku bez opasek uciskowych. Należy również wspomnieć, że poziom ekspresji genu miostatyny w wyniku treningu z niskimi obciążeniami zewnętrznymi (20% 1RM) i ograniczeniem przepływu krwi zmniejszył się o 45%, porównywalnie do tego, jaki występuje przy wysiłku z wyższym obciążeniem zewnętrznym (80% 1RM) bez BFR (41%) (Laurentino i wsp., 2012). Wyżej wymienione reakcje, zachodzące pod wpływem zastosowania mankietów uciskowych podczas treningu oporowego, mogą przyczyniać się do wzmożenia zmian hipertroficzych mięśni oraz przyrostu poziomu siły mięśniowej (Loenneke i wsp., 2011b, Pearson i wsp., 2015, Wilk i wsp., 2018). Jednocześnie najnowsze badania wskazują, że nie tylko samo ograniczenie przepływu krwi, ale także reperfuzja, może mieć istotny wpływ na zmiany adaptacyjne. Reperfuzja występująca po przerwaniu ucisku opasek, powoduje rozszerzenie naczyń krwionośnych nie tylko w obszarze bezpośrednio objętym niedokrwieniem, ale także w dystalnych obszarach. Co więcej, wraz ze zwiększeniem liczby stosowanych cykli ograniczenia przepływu krwi, średnica naczyń krwionośnych stopniowo zwiększa się, osiągając maksymalną wielkość po trzecim cyklu (Enko i wsp., 2011). Dlatego też, zasadne wydaje się stosowanie więcej niż jednego cyklu BFR w ramach jednostki treningowej. Stosowany naprzemiennie ucisk opaski i reperfuzja, powodują także zintensyfikowaną produkcję fosfokreatyny (Andreas i wsp., 2011), zmniejszenie poziomu zużycia ATP (Murry i wsp., 1990; Dave i wsp., 2001; Brucklacher i wsp., 2002) oraz glikogenu w mięśniach (Lintz i wsp., 2013), co może mieć wpływ zarówno na wielkość powysiłkowych reakcji i zmian adaptacyjnych, jak i na możliwości wysiłkowe. Fizjologiczne mechanizmy leżące u podstaw reakcji adaptacyjnych w następstwie wysiłku fizycznego z ograniczonym przepływem krwi

nie zostały jeszcze w pełni poznane. Pomimo tego, ta forma treningu staje się coraz bardziej popularna, zarówno wśród sportowców, jak i osób rekreacyjnie trenujących.

Występują różne metody stosowania ograniczenia przepływu krwi w ramach treningu oporowego: przedwysiłkowa (z ang. ischemia pre - conditioning – IPC; Mieszkowski i wsp. 2022), ciągła (z ang. Contionus; Fitschen i wsp. 2014), przerywana (z ang. Intermittent; Fitschen i wsp. 2014), międzywysiłkowa (z ang. intra-conditioning; Wilk i wsp., 2020a; Fostiak i wsp., 2022; Trybulski i wsp., 2022).

Metoda przedwysiłkowego BFR polega na zastosowaniu kilku cykli ograniczenia przepływu krwi przerywanych reperfuzją. Metoda ta stosowana jest najczęściej przed rozpoczęciem jednostki treningowej, jeszcze przed rozgrzewką. De Groot i wsp. (2010) wykazali, że zastosowanie przedwysiłkowego BFR (3 cykle; 5 min BFR; 5 min reperfuzji; ciśnienie 220 mm Hg) spowodowało wzrost poziomu zużycia tlenu oraz generowanej mocy mięśniowej podczas wysiłku do odmowy na cykloergometrze, względem tej samej próby wysiłkowej bez wykorzystania opasek uciskowych. Z kolei, badania przeprowadzone przez Patterson i wsp. (2015) wykazały, że zastosowanie 4 cykli po 5 min BFR i 5 min reperfuzji (ciśnienie - 220 mm Hg) powoduje wzrost poziomu maksymalnej oraz średniej mocy mięśniowej w pierwszych trzech sprintach wykonywanych na cykloergometrze w porównaniu do interwencji placebo. Z przeprowadzonych przez Cheng i wsp. (2021) badań wynika również, że stosowanie przedwysiłkowego ograniczenia przepływu krwi (4 cykle: 5 min BFR; 5 min reperfuzji; ciśnienie - 220 mm Hg) ma wpływ na opóźnienie spadku poziomu mocy mięśniowej podczas trzeciego i czwartego z sześciu 30 m sprintów na cykloergometrze względem warunków kontrolnych, co przełożyło się na zwiększenie poziomu realizowanej pracy całkowitej. Z kolei wykonanie BFR (3 cykle: 5 min BFR; 5 min reperfuzji; ciśnienie 200 mm Hg) przed treningiem oporowym (5 serii; 5 prostowań w stawie kolanowym w warunkach izokinetycznych – maksymalny skurcz mięśnia przy stałej prędkości ruchu; 20°/sek.) spowodowało wzrost wartości maksymalnej siły mięśniowej względem interwencji placebo (Paradis-Deschenes i wsp., 2016). Również długofalowe stosowanie ograniczenia przepływu krwi przynosi pozytywne skutki na zmiany biochemiczne oraz możliwości wysiłkowe. Mieszkowski i wsp., (2020) wykazali, że powtarzane przez 10 dni sesje ograniczenia przepływu krwi i reperfuzji (4 serie; 5 min BFR; 5min reperfuzji; 220mmHg), przyczyniło się do wzrostu stężenia interleukin (IL-6), folistatyny (FSTL-1) i rezystyny, oraz spadku stężenia tkankowego inhibitora metaloproteinazy1 (TIMP-1) po biegu maratońskim względem grupy kontrolnej i placebo. Wyniki ten świadczy o pozytywnym działaniu przeciwwzapalnym badanej procedury BFR. Mieszkowski i wsp. (2019) wykazali także, że IPC

(4serie; 5 minut BFR; 5 minut reperfuzji; 220mmHg; ostatnia sesja 24 godziny przed testem) powtarzane przez 10 dni spowodowało zwiększenie względnej maksymalnej mocy (W/kg) w teście Wingate oraz spowodowało zwiększenie ferrytyny H (FTH) i ferrytyny L (FTL) oraz spadek mRNA receptora transferryiny (TFRC) w komórkach jednojądrzastych krwi obwodowej (PBMC) względem grupy stosującej placebo. Dlatego można przypuszczać, że trening ten może przyczynić się do zwiększonej odporności na wysiłek fizyczny oraz stres oksydacyjny (Mieszkowski i wsp., 2019). Biorąc pod uwagę wyżej wymienione wyniki badań naukowych można wywnioskować, że różne schematy ograniczenia przepływu krwi mogą być skutecznym narzędziem zwiększającym możliwości wysiłkowe sportowców. Jednakże schemat stosowany w powyższych pracach jest czasochłonny (czas trwania 30 - 40 min), co ogranicza możliwość stosowania go w codziennym treningu.

Drugim sposobem, polegającym na ograniczeniu przepływu krwi zarówno podczas wykonywania ćwiczenia, jak i podczas przerwy wypoczynkowej nazywamy metodą ciągłą. Badania naukowe wykorzystujące metodę ciągłego BFR, najczęściej stosują procedurę składającą się z czterech serii zawierających kolejno po 30, 15, 15, 15 powtórzeń wykonywanych z 30 - 60-sekundową przerwą. Badania wykazały, że trening oporowy (30, 15, 15, 15 powtórzeń; 30-sekundowa przerwa wypoczynkowa; 20 - 35% 1RM), składający się ze wspięć na palce w pozycji stojącej oraz wspięć na palce w pozycji siedzącej z nieprzerwanym uciskiem opaski (50% AOP), spowodował wzrost sztywności oraz przekroju poprzecznego ścięgna Achillesa, a także wzrost przekroju poprzecznego mięśni i poziomu siły mięśniowej. Był to rezultat porównywalny do efektów treningu z wysokim obciążeniem zewnętrznym bez ograniczenia przepływu krwi (3 serie; 6 - 12 powtórzeń; 70 - 85% 1RM; Centner i wsp., 2019). Zbliżone zmiany hipertroficzne oraz poziomu siły mięśniowej do efektów tradycyjnego treningu oporowego z wysokim obciążeniem zewnętrznym osiągnięto także w wyniku zastosowania BFR (50% AOP) podczas prostowań w stawie kolanowym (3 serie; 15 powtórzeń; 1-minutowa przerwa wypoczynkowa; 20% 1RM; Laurentino i wsp., 2012). Ponadto, trening oporowy wykonywany z niskim obciążeniem zewnętrznym (20% - 40% 1RM) oraz metodą ciągłego ograniczenia przepływu krwi powoduje niższy poziom powysiłkowych uszkodzeń włókien mięśniowych w stosunku do tradycyjnego treningu oporowego z wysokim obciążeniem zewnętrznym (65% - 85% 1RM; Abe i wsp., 2000, 2005; Fujita i wsp., 2008; Loenneke i wsp., 2014b). Wydaje się to szczególnie korzystne w treningu profilaktycznym oraz u osób, które nie mogą stosować wysokiego obciążenia zewnętrznego (Hughes i wsp. 2017; Domingos i Polito 2018). Oprócz długofalowych zmian adaptacyjnych, stosowanie opasek uciskowych zarówno podczas przerwy, jak i wysiłku powoduje także

istotne zmiany w poziomie bezpośrednich reakcji powysiłkowych (Neto i wsp., 2017). Wilk i wsp. (2022) wykazali korzystny efekt wzrostu mocy mięśniowej w następstwie zastosowywania mankietów kompresyjnych podczas wyciskania sztangi leżąc. Przeciwnie, wykorzystanie metody ciągłego BFR (80% AOP) podczas przysiadów ze sztangą (4 serie; 2 powtórzenia; 3 min przerwy pomiędzy seriami; 40 - 90% 1RM) nie wywołało tak korzystnych zmian. Biorąc pod uwagę wyniki większości badań naukowych można stwierdzić, że ten sposób ograniczenia przepływu krwi może być skuteczną formą kształtowania siły i hipertrofii mięśniowej pomimo stosowania niskiej wartości obciążenia zewnętrznego. Jednakże pomimo wielu zalet tej metody, należy wziąć pod uwagę fakt, że ucisk opaski podczas wykonywanego ćwiczenia może wywoływać duży dyskomfort oraz ból (Fitschen i wsp., 2014; Rossow i wsp., 2012), a mechaniczna praca mankieta może ingerować w technikę wykonywanego ćwiczenia (Rawska i wsp. 2019).

Inną strategią ograniczenia przepływu krwi jest metoda przerywana. Polega ona na wykorzystaniu opasek uciskowych tylko w trakcie wysiłku, natomiast w przerwach wypoczynkowych mankiety kompresyjne są zdejmowane. Wartość wskaźnika RPE (oceny postrzeganego wysiłku) podczas treningu oporowego z obciążeniem zewnętrznym 20% 1RM oraz metodą przerywanego BFR jest niższa niż podczas wysiłku z wykorzystaniem ciągłego ograniczenia przepływu krwi (Neto i wsp., 2017). Także trening z niskimi obciążeniami (20% 1RM) i wykorzystaniem opasek uciskowych tylko podczas wysiłku (160 mm Hg) był mniej bolesny w stosunku do takiego samego wysiłku z ciągłym uciskiem mankietów kompresyjnych (160 mm Hg) (Fitschen i wsp., 2014). Co więcej, trening z niskim obciążeniem zewnętrznym (20% 1RM) i metodą przerywanego ograniczenia przepływu krwi (80% AOP) powoduje taki sam poziom zmian hipertroficznych oraz siły mięśniowej, jak ćwiczenia wykonywane z ciągłym uciskiem opasek (80% AOP; Neto i wsp., 2019). Zastosowanie mankietów kompresyjnych tylko w trakcie wysiłku (przysiady; wyciskanie leżąc; podciąganie; 5 serii; 5 powtórzeń; 70% 1RM; 90-sekundowe przerwy między seriami; 3 min przerwy między ćwiczeniami; ciśnienie 180 mm Hg) spowodowało wzrost poziomu siły i mocy mięśniowej oraz poprawę wyniku w biegu na 30 m względem grupy kontrolnej (Cook i wsp., 2014). Ponadto, zastosowanie metody przerywanego BFR (80% AOP) podczas przysiadów z obciążeniem 40 - 90% 1RM, nie wpływa negatywnie na poziom średniej oraz maksymalnej prędkości ruchu (Wilk i wsp., 2021b).

Czwarty sposób, zwany metodą międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi, polega na stosowaniu ucisku opasek tylko w przerwach wypoczynkowych przed seriami ćwiczeń. Podczas treningu z wykorzystaniem tej metody, opaski uciskowe zdejmowane są na

czas trwania wysiłku, przez co niwelowany jest możliwy, negatywny wpływ mechanicznej pracy opaski uciskowej na technikę wykonywanego ćwiczenia. Stosowanie mankietów kompresyjnych w trakcie ćwiczeń może powodować dyskomfort (de Souza Pfeiffer i wsp., 2019), a nawet ból (Fitschen i wsp., 2014) oraz wzrost wskaźnika subiektywnego odczucia wysiłku (RPE; Hollander i wsp. 2003), dlatego metoda międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi może być ciekawą alternatywą w stosunku do wcześniej wymienionych metod BFR. Wykorzystanie międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi w treningu oporowym powodowało zwiększenie poziomu średniej i maksymalnej mocy oraz prędkość sztangii podczas wyciskania leżąc (5 serii; 3 powtórzenia; 60% 1RM; 5 min przerwy; 80% AOP) w stosunku do interwencji kontrolnej (Wilk i wsp., 2021a). Metoda ta, wpłynęła także na obniżenie spadku mocy podczas przysiadów (5 serii; 2 powtórzenia; 60% 1RM; 5-minutowa przerwa wypoczynkowa; 80% AOP) względem interwencji kontrolnej (Trybulski i wsp., 2022). Przeciwnie, badania wykazały, że wykorzystanie mankietów kompresyjnych tylko podczas przerw wypoczynkowych (60% i 80% AOP) nie powodują istotnej poprawy w biegu sprinterskim na dystansie 30 metrów (Fostiak i wsp., 2022). Co szczególnie istotne, Torma i wsp., (2021) wykazał, że zastosowanie metody międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi w treningu oporowym (przysiady ze sztangą; 7 serii; 10 powtórzeń; 2-minutowa przerwa wypoczynkowa; 1 min BFR; 230 mm Hg) spowodowało wzrost poziomu ekspresji Pax7 oraz obniżenie poziomu miR-206. Mogło się to wiązać ze zwiększoną ekspresją genów angiogenezy i biogenezą mitochondriów wpływając na czas regeneracji mięśni oraz wielkość zmian hipertroficzných mięśni, co z kolei może mieć istotne znaczenie w procesie adaptacji powysiłkowej. Potwierdzeniem tego mogą być także wyniki badań, które wskazują, że ucisk opasek między seriami (3 serie; 8 powtórzeń; 70% 1RM; 1-minutowa przerwa wypoczynkowa; 80% AOP) przyczynia się do wyższego wzrostu poziomu mleczanu w porównaniu do interwencji kontrolnej (Teixeira i wsp., 2018).

## 1. PROBLEMATYKA BADAWCZA W ŚWIETLE LITERATURY

Pomimo że trening z ograniczonym przepływem krwi może przynieść wiele korzyści, to należy także zwrócić uwagę na potencjalne wady poszczególnych metod. W przypadku stosowania opasek kompresyjnych podczas wysiłku, dyskomfort i ból związany z ich uciskiem może mieć negatywny wpływ na technikę wykonywanego ćwiczenia (Fitschen i wsp., 2014; Rawska i wsp. 2019 Rossow i wsp., 2012). Ponadto, nacisk mankietu kompresyjnego podczas wysiłku może negatywnie wpływać na strukturę mięśni znajdujących się bezpośrednio pod nią (Ellefsen i wsp., 2015; Kacin i Strazar, 2011). Dlatego też stosowanie ograniczenia przepływu krwi wyłącznie podczas przerw wypoczynkowych może być rozwiązaniem niwelującym wyżej wymienione wady. Kolejnym, negatywnym czynnikiem, który może uniemożliwiać stosowanie metody przedwysiłkowego BFR podczas codziennego treningu, jest czas potrzebny na jej realizację. Optymalnym rozwiązaniem może być ograniczenie przepływu krwi sposobem międzywysiłkowym, ponieważ nie zmienia on długości trwania jednostki treningowej. Co więcej, zdejmowanie opasek uciskowych na okres trwania wysiłku pozwala na komfortowe, swobodne oraz poprawne technicznie wykonanie ćwiczenia. Jednakże wyżej wymieniona metoda jest nowatorska, a jej wpływ na zmiany adaptacyjne nie jest dobrze poznany.

Według wiedzy autora, istnieje zaledwie kilka publikacji naukowych na poziomie światowym, opisujących wpływ stosowania opasek uciskowych w przerwach wypoczynkowych na zmiany poziomu możliwości wysiłkowych, reakcji fizjologicznych oraz zmiany adaptacyjne. Jednakże dotychczasowe wyniki badań nie są jednoznaczne. Badania przeprowadzone przez Wilka (2021a) wykazały, że zastosowanie metody międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi powoduje wzrost poziomu mocy oraz średniej prędkości sztangi podczas wyciskania w leżeniu (5 serii; 3 powtórzenia; 60% 1RM; 5-minutowa przerwa wypoczynkowa; 80% AOP). Przeciwnie, wyniki badań Jarosza i wsp. (2021) (2 powtórzenia; 20% - 90% 1RM; 3-minutowa przerwa wypoczynkowa; 80% AOP) nie ukazały istotnego wzrostu średniej prędkości sztangi na żadnym z analizowanych obciążeń zewnętrznych. Jednakże w tym samym badaniu w warunkach niedokrwienia zaobserwowano wzrost szczytowej prędkości sztangi podczas wyciskania sztangi leżąc z obciążeniem zewnętrznym o wartości 20% 1RM oraz 50% 1RM w porównaniu do warunków kontrolnych (Jarosz i wsp., 2021). Tym samym, wyniki badań Wilka i wsp. (2021a) oraz Jarosz i wsp. (2021) pokazały, że wartość stosowanego obciążenia zewnętrznego może być czynnikiem oddziałującym na efektywność stosowania tego sposobu BFR. Dodatkowo, samo

wpływ ograniczenia przepływu krwi może inaczej oddziaływać na zmiany średniej i szczytowej prędkości. Należy zwrócić uwagę także na fakt, że w badaniach Wilka i wsp. (2021a) oraz Jarosza i wsp. (2021) występowały także różnice w czasie trwania ucisku opaski oraz reperfuzji, co wymaga dalszych badań. Z kolei z obserwacji Trybalskiego i wsp. (2022) wynika, że zastosowanie mankietów kompresyjnych w przerwach wypoczynkowych, nie powodowało zwiększenia maksymalnego poziomu mocy podczas przysiadów (5 serii; 3 powtórzenia; 60% 1RM; 5-minutowa przerwa wypoczynkowa; 60% AOP) w porównaniu do warunków kontrolnych. Jednakże, co szczególnie istotne, zastosowanie BFR w wyżej wymienionym badaniu spowodowało zmniejszenie poziomu spadku mocy mięśniowej w seriach 3 – 5, co także z punktu widzenia treningu sportowego, należy określać jako pozytywny efekt. W badaniach Trybalskiego i wsp. (2022), największe różnice w poziomie mocy zaobserwowano w seriach 3 - 5 (na korzyść BFR), co pozwala stwierdzić, że metoda międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi, umożliwia utrzymanie poziomu generowanej mocy mięśniowej. Korzystny wpływ BFR wykazano także w wysiłkach realizowanych do odmowy (Barbosa i wsp., 2015). Barbosa i wsp. (2015) ukazali wzrost czasu trwania powtarzanych uścisków dłoni z obciążeniem 60% 1RM, poprzedzonych serią przerywanych ucisków opaskami kompresyjnymi (3 cykle; 5-min BFR; 5 min reperfuzji; 200 mm Hg). Jednakże pozytywny efekt wykazany w badaniu Barbosa i wsp. (2015) nie był poparty zmianami fizjologicznymi (zwiększonym poziomem przepływu krwi i zużyciem tlenu). Podobnie Marocolo i wsp. (2016), wykazali, że zastosowanie metody przedwysiłkowego ograniczenia przepływu krwi (4 cykle; 5 min BFR; 5 min reperfuzji; 220 mm Hg) spowodowało zwiększenie liczby powtórzeń prostowań nogi w stawie kolanowym (100% 12 RM) w porównaniu do interwencji kontrolnej. Pomimo, iż w wyżej wymienionych badaniach nie zastosowano metody międzywysiłkowego, a tylko przedwysiłkowego ograniczenia przepływu krwi, to i tak można wskazać korzyści wynikające ze stosowania niedotlenienia w spoczynku. Należy zwrócić uwagę na fakt, że stosując opaski uciskowe w przerwach wypoczynkowych, pierwszy cykl BFR stosuje się przed pierwszą serią wysiłkową, czyli podobnie, jak ma to miejsce w metodzie przedwysiłkowej, dlatego porównywanie wyników badań wykorzystujących te dwie techniki wydaje się być naukowo uzasadnione, tym bardziej, że Wilk i wsp. (2021a) oraz Trybalski i wsp. (2022) stwierdzili, że korzystne zmiany w poziomie mocy mięśniowej w wyniku wykorzystania mankietów kompresyjnych podczas wypoczynku mogą być związane z tymi samymi reakcjami fizjologicznymi, jakie zaobserwowano w wyniku stosowania BFR przed wysiłkiem. Główne czynniki wpływające na korzystne zmiany w efekcie stosowania ograniczenia przepływu krwi mogą być związane

ze wzmożeniem uwalniania tlenu azotu (Kimura i wsp., 2007; Li i wsp., 2012), aktywacji receptorów adenozyiny (Liu i wsp., 1991; Lee i wsp., 1996), wzmożenia ekstrakcji tlenu przez mięśnie (Paradis-Deschenes i wsp., 2016) oraz uruchomienia kanałów potasowych, które powodują wzrost poziomu magazynów energetycznych po niedokrwieniu (Lawson i Downey, 1993; Pang i wsp., 1995). Dodatkowo Trybulski i wsp. (2022) zasugerowali, że dłuższe utrzymanie wysokiego poziomu mocy w następstwie BFR może być związane ze zmianami w kinetyce wchłaniania O<sub>2</sub>, systemowego VO<sub>2</sub>, deoksygenacji mięśniowej Hb/Mb (Paganelli i wsp., 1989; Paradis-Deschenes i wsp., 2016;), otwarciem kanałów potasowych (Pang i wsp., 1995) oraz rozszerzeniem naczyń krwionośnych w mięśniach (Kimura i wsp., 2007). Pozytywny wpływ metody międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi na poziom mocy podczas kolejnych serii treningu oporowego można także powiązać z efektem wzmocnienia poaktywacyjnego (z ang. PAPE – post-activation performance enhancement; Wilk i wsp., 2021a; Trybulski i wsp., 2022). Wzmocnienie poaktywacyjne powoduje krótkotrwały wzrost możliwości mięśni do generowania wyższych wartości siły i mocy mięśniowej, wywołany wcześniejszą aktywacją skurczową (Krzysztofik i wsp., 2020ab, 2021, 2022b; Wilk i wsp., 2020b). Efekt wzmocnienia poaktywacyjnego może też wystąpić pomiędzy poszczególnymi seriami, powodując wzrost poziomu generowanej mocy mięśniowej w serii drugiej, trzeciej w stosunku do serii pierwszej (Wilk i wsp., 2020c). Tak więc, utrzymanie poziomu mocy podczas 3 - 5 serii, jak miało to miejsce w badaniach Trybulskiego i wsp. (2022), w efekcie zastosowania międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi może mieć związek nie tylko z czynnikami przez nie indukowanymi, ale także wystąpieniem efektu wzmocnienia poaktywacyjnego (Wilk i wsp., 2021a, Trybulski i wsp., 2022). Tym bardziej, że w wyniku badań Wilka i wsp. (2020b) wykazano, że efekt ten występuje także w warunkach stosowania BFR. Jednakże podobnie, jak ma to miejsce w przypadku efektu wzmocnienia poaktywacyjnego, także w przypadku ograniczenia przepływu krwi, nie tylko parametry treningowe mogą mieć istotne znaczenie (Gossen i wsp., 2000; Chaouachi i wsp., 2011;), ale także stosunek czasu trwania wysiłku do czasu trwania BFR podczas przerwy wypoczynkowej (Wilk i wsp., 2020c; Trybulski i wsp., 2022). Wysiłek w badaniach przeprowadzonych przez Wilka i wsp. (2021a) oraz Trybulskiego i wsp. (2022) składał się z małej liczby powtórzeń (2-3), których czas trwania wynosił łącznie około 3-5 sekund. Głównym źródłem energii był glikogen oraz fosfokreatyna (Bird i wsp., 2005), których zasoby w większości zostały uzupełnione podczas 5-minutowej przerwy wypoczynkowej (Bogdanis i wsp., 1998; Dawson i wsp., 2007), co może mieć duże znaczenie w ocenie efektywności międzywysiłkowego BFR (Wilk i wsp., 2021a). Z kolei w badaniach

przeprowadzonych przez Fostiaka i wsp., (2022), w których zastosowanie opasek uciskowych podczas przerw wypoczynkowych nie wpłynęło bezpośrednio na poprawę czasu w biegu na 30 m, istotny jest fakt, że nie spowodowała ona także obniżenia możliwości szybkościowych. Tak więc BFR, nawet jeśli nie powoduje wzrostu mocy mięśniowej czy szybkości, to może być dodatkowym narzędziem zwiększającym bezpośrednie reakcje fizjologiczne, stres metaboliczny i pośrednio zwiększającym rekrutację włókien mięśniowych oraz sygnalizację wewnątrz mięśniową, co z punktu widzenia adaptacji wydaje się korzystne (Fostiak i wsp., 2022). Wzrost stresu metabolicznego w wyniku stosowania międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi został wykazany w badaniach Teixeira i wsp. (2018; prostowanie stawu kolanowego; 3 serie; 8 powtórzeń; 70% 1RM; 1-minutowa przerwa wypoczynkowa; 80% AOP). Podczas eksperymentu zaobserwowano również spadek maksymalnej ilości powtórzeń, co jest sprzeczne z najnowszymi badaniami Trybalskiego i wsp. (2023) które wykazały, że wykorzystanie opasek uciskowych podczas przerw wypoczynkowych nie powoduje spadku maksymalnej ilości powtórzeń. Różnice w wynikach badań Teixeiry i wsp. (2018) oraz Trybalskiego i wsp. (2023) mogą wynikać z faktu, że w jednym badaniu stosowano BFR na kończyny górne a w drugim na dolne. Podobne różnice we wpływie ograniczenia przepływu krwi pomiędzy kończynami górnymi i dolnymi można zaobserwować w rezultatach badań Wilka i wsp. (2021b; 2022). Co istotne, jak sugerują wyniki badań Gepfert i wsp. (2020), w przypadku stosowania mankietów kompresyjnych na kończyny dolne należy stosować zdecydowanie wyższe wartości ciśnienia ucisku w porównaniu do tego, jakie stosowane jest w kończynach górnych. Kolejnym czynnikiem mogącym mieć wpływ na bezpośrednie reakcje wywołane międzywysiłkowym ograniczeniem przepływu krwi jest reperfuzja, a w szczególności czas od momentu przerwania ucisku opaski do momentu rozpoczęcia wysiłku. Jednakże obecnie nie ma danych naukowych, które dokonałyby oceny wpływu czasu reperfuzji na skuteczność stosowania międzywysiłkowego BFR. Oprócz zmian metabolicznych, dotychczasowe wyniki badań wykazują możliwość wystąpienia istotnych zmian poziomu aktywności mięśniowej wywołanych ograniczeniem przepływu krwi.

### **1.1. Wpływ ograniczenia przepływu krwi na poziom aktywności mięśniowej**

Badanie elektromiografii powierzchniowej (sEMG) pozwala na określenie poziomu aktywności mięśniowej podczas danego ruchu. Wysoki poziom aktywności mięśniowej podczas wysiłku wskazuje na dużą ilość zaangażowanych jednostek motorycznych. Natomiast spadek poziomu aktywności mięśniowej w trakcie wysiłku może świadczyć o narastającym zmęczeniu (Cifrek i wsp., 2009). Loenneke i wsp. (2015) zaobserwowali, że ograniczenie przepływu krwi o wartości 50% AOP (20 - 30% 1RM) spowodowało wzrost aktywności mięśniowej, względem grupy stosującej ciśnienie o wartości 40% AOP oraz względem grupy niestosującej opasek uciskowych. Yamada i wsp. (2004) wykazali wyższy poziom aktywności mięśniowej podczas skurczu izometrycznego o wartości 30% MVC (z ang. Maximum Voluntary Contraction - maksymalny dowolny skurcz izometryczny) i 50% MVC z jednoczesnym BFR (100 mm Hg) w porównaniu do eksperymentu kontrolnego. Yasuda i wsp. (2009) również zaobserwowali zwiększenie poziomu aktywności mięśniowej po zastosowaniu metody ciągłego ograniczenia przepływu krwi podczas zgięć w stawie łokciowym (3serie; 10 powtórzeń; 20% 1RM) w porównaniu do interwencji kontrolnej. Jednakże wykorzystanie opasek podczas przerwy wypoczynkowej oraz wysiłku z niskim obciążeniem zewnętrznym (20 - 30% 1RM), nie spowodowało różnic w poziomie aktywności mięśniowej w stosunku do pomiaru uzyskanego podczas wysiłku z obciążeniem zewnętrznym 70% 1RM bez mankietów kompresyjnych (Cook i wsp., 2013; Loenneke i wsp., 2015). Należy zwrócić uwagę na fakt, że wszystkie wyżej wymienione badania dotyczyły oceny aktywności mięśniowej podczas lub po zastosowaniu metody ciągłego ograniczenia przepływu krwi. Stosowanie BFR podczas wysiłku i jednoczesny wzrost poziomu aktywności mięśniowej może być związany ze zwiększoną akumulacją metabolitów w mięśniach oraz większą liczbą zaangażowanych włókien mięśniowych (Loenneke i wsp., 2015). Jednakże zastosowanie metody przerywanego ograniczenia przepływu krwi z jednocześnie wysokim obciążeniem zewnętrznym (100 mm Hg; skurcz izometryczny 10 sek. z 70% MVC oraz 3 serie; 8 powtórzeń; 70% 1RM) nie powoduje wzrostu poziomu aktywności mięśniowej względem interwencji kontrolnej (Yamada i wsp., 2004; Teixeira i wsp., 2018). Sam skurcz mięśniowy podczas wysiłku z wysokim obciążeniem zewnętrznym (70% 1RM) może powodować ograniczenie przepływu krwi, niwelując efekt indukowany przez opaskę uciskową (Teixeira i wsp., 2018; Yamada i wsp., 2004). Dlatego też zastosowanie międzywysiłkowego BFR podczas ćwiczeń z wysokim obciążeniem zewnętrznym może powodować dodatkowe zmiany poziomu aktywności mięśniowej. Potwierdzają to wyniki

badan przeprowadzonych przez Teixeirę i wsp. (2018), w których analizowano aktywność mięśniową podczas prostowania w stawie kolanowym (3serie; 8 powtórzeń; 70% 1RM) w trzech warunkach: bez opasek uciskowych, z zastosowaniem metody przerywanego BFR oraz międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi. Poziom aktywności mięśniowej spadał w każdej kolejnej serii we wszystkich interwencjach badawczych, natomiast zastosowanie opasek uciskowych wyłącznie podczas przerw wypoczynkowych spowodowało jego największy spadek (Teixeira i wsp., 2018). Wykorzystanie mankietów kompresyjnych między seriami wykonywanego ćwiczenia spowodowało zwiększoną akumulację metabolitów ( $H^+$ , mleczanu) oraz mogło uniemożliwić odpowiednią resyntezę substratów energetycznych (Teixeira i wsp., 2018). Efektem tego mogło być zahamowanie motoneuronów alfa oraz/lub obniżyć zdolność organizmu do pobudzenia jednostek motorycznych, zaburzając rekrutację jednostek motorycznych oraz obniżając poziom aktywności mięśniowej (Teixeira i wsp., 2018). Jednakże obecnie, tylko w pojedynczych pracach badawczych dokonano oceny wpływu międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi na zmiany poziomu aktywności mięśniowej, co wymaga dalszych badań.

## **1.2. Wpływ ograniczenia przepływu krwi na wartości momentu siły mięśniowej**

W większości badań dokonujących oceny wpływu stosowania ograniczenia przepływu krwi procedurę realizowano z wykorzystaniem pracy izometrycznej lub izotonicznej. Istnieje niewiele publikacji opisujących zmiany spowodowane uciskiem opasek kompresyjnych podczas treningu w warunkach izokinetycznych. Ocena izokinetyczna jest często wykorzystywana w diagnostyce możliwości wysiłkowych sportowców, ponieważ umożliwia rzetelną ewaluację ewentualnych zmian. Dodatkowo, jedynie warunki izokinetyczne umożliwiają ocenę maksymalnego skurczu mięśni w całym zakresie ruchu o stałej, kontrolowanej przez urządzenie prędkości kątowej (Smith i Melton, 1981). Badania przeprowadzone przez Fujita i wsp. (2008) wykazały, że ograniczenie przepływu krwi (200 mm Hg) podczas 30 izokinetycznych prostowań w stawie kolanowym z prędkością kątową  $180^\circ/\text{sek.}$  spowodowały szybszy spadek poziomu mocy mięśniowej w kolejnych powtórzeniach względem grupy kontrolnej (Fujita i wsp., 2008). Z kolei 4-tygodniowy trening oporowy w warunkach izokinetycznych (2 sesje w tygodniu; 3 serie; 10 prostowań i zgięć w stawie kolanowym; z prędkością kątową  $300^\circ/\text{sek.}$  lub  $90^\circ/\text{sek.}$ ) z zastosowaniem metody ciągłego BFR (200 mm Hg) wywołał większy efekt hipertrofii mięśniowej oraz wyższy wzrost poziomu siły mięśniowej względem grupy kontrolnej (Sakuraba i Ishikawa,

2009). Autorzy zaobserwowali także, że wyższe obciążenie zewnętrzne (~80% MVC) wynikające z mniejszej prędkości kątowej (90°/sek.) nie spowodowało większego efektu hipertrofii mięśni oraz wzrostu poziomu siły mięśniowej względem niższego obciążenia zewnętrznego (~54,6% MVC; 300°/sek.). Zastosowanie metody przedwysiłkowego ograniczenia przepływu krwi (3 serie; 5 min BFR; 5 min reperfuzji; 220 mm Hg) przed izokinetycznymi prostowaniami w stawie kolanowym (5 serii; 5 powtórzeń; prędkość kątowa 20°/sek.) spowodowało wzrost poziomu siły mięśniowej względem próby, w której zastosowano placebo (20 mm Hg; Paradis-Deschenes i wsp., 2016). Przeciwnie, w badaniach Huang i wsp. (2020) wykorzystanie opasek uciskowych (3 serie; 5 min BFR; 5 min reperfuzji; 170 mm Hg) przed izokinetycznymi prostowaniami w stawie kolanowym (3 powtórzenia 30°/sek.; 3 powtórzenia 150°/sek.; 3 powtórzenia 270°/sek.; 30 powtórzeń 180°/sek.) nie wpłynęła na zmiany poziomu siły mięśniowej oraz wytrzymałości siłowej względem interwencji placebo (10 mm Hg).

Wyżej wymienione badania dotyczyły metod ciągłego oraz przedwysiłkowego BFR. Według wiedzy autora nie istnieją żadne badania nad wpływem zastosowania metody międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi podczas treningu w warunkach izokinetycznych. Dodatkowo, nie ma danych naukowych dokonujących oceny zmian aktywności mięśniowej podczas ćwiczeń w warunkach izokinetycznych w wyniku zastosowania międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi.

## 2. METODOLOGICZNE PODSTAWY BADAŃ WŁASNYCH

Dotychczasowe wyniki badań z zakresu oceny wpływu międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi nie pozwalają na wskazanie zarówno optymalnych parametrów w zakresie wartości ciśnienia opaski uciskowej, czasu trwania ograniczenia oraz optymalnego czasu reperfuzji. Nie można jednoznacznie określić, czy jeden z wymienionych parametrów determinuje bezpośrednio zmiany powysiłkowe bądź czy wskazane parametry są względem siebie współzależne. Co więcej, nie ma wytycznych i naukowych danych w zakresie oceny zależności pomiędzy parametrami stosowanego międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi, a rodzajem wysiłku fizycznego, szczególnie w zakresie intensywności i objętości. W związku z tym występuje uzasadniona potrzeba prowadzenia dalszych badań mających na celu ocenę wpływu międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi na bezpośrednie zmiany zarówno możliwości wysiłkowych, jak również zmian fizjologicznych i biochemicznych. Jednocześnie brak dostatecznej ilości danych naukowych dotyczących optymalnych parametrów zarówno międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi jak i wysiłku, które prowadziłyby do bezpośrednich zmian adaptacyjnych, stanowi ograniczenie dla przeprowadzenia długoterminowych badań w tej dziedzinie.

Dotychczasowe badania zrealizowane przez Wilk i wsp. (2021a) oraz Trybulski i wsp. (2022) wykazały korzystny efekt zastosowania międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi na poziom mocy generowanej podczas przysiadów ze sztangą i wyciskania sztangi leżąc. Natomiast wyniki badań przeprowadzonych przez Jarosza i wsp. (2021) nie potwierdziły takiego korzystnego efektu. Jednakże należy zwrócić uwagę na fakt, że w badaniach tych do pomiarów wykorzystywano nielaboratoryjne urządzenia pomiarowe takie jak Tendo Sport czy Keiser Squat Machine. W związku z tym chcąc zweryfikować skuteczność wcześniej stosowanych procedur ograniczenia przepływu krwi, a jednocześnie dążąc do najwyższego poziomu jakości prowadzenia badań jak i rzetelności wykorzystanych urządzeń pomiarowych, w niniejszym eksperymencie wykorzystano dynamometr izokinetyczny Biodex 4 Pro oraz wykonano pomiarów aktywności mięśniowej za pomocą elektromiografu Noraxon Telemyo DTS. Urządzenia te stanowią najwyższy standard w odniesieniu do rzetelności i dokładności uzyskiwanych danych (Ahmadi i Uchida 2021). Dodatkowo wyniki badań wykorzystujące międzywysiłkowe BFR w ramach procedury badawczej nie dokonywały oceny wpływu efektu placebo, który może także mieć istotne znaczenie w ocenie skuteczności tej metody. W związku z tym w badaniach własnych zastosowano interwencję obejmującą także pozorowane ograniczenie przepływu krwi.

Według wiedzy autora przeprowadzona procedura badawcza jest innowacyjna w skali światowej. Dotychczas żadne badania naukowe w zakresie oceny międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi nie wykorzystywały w ramach procedury badawczej pomiaru izokinetycznego z jednoczesną analizą zmian poziomu aktywności mięśniowej. Biorąc pod uwagę dotychczasowe badania z zakresu międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi na możliwości siłowe, w niniejszej procedurze badawczej postanowiono zastosować parametry ograniczenia przepływu krwi zbliżone do procedury badawczej realizowanej w badaniach Wilk i wsp. (2021a) i Trybulski i wsp. (2022).

## **2.1. Cel pracy**

Celem pracy badawczej była ocena wpływu międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi (5 min; 1 min reperfuzji; 80% AOP i 20 mm Hg) na możliwości siłowe kończyn dolnych (zmiany wartości momentu siły mięśniowej oraz zmiany poziomu aktywności mięśniowej) podczas prostowań w stawie kolanowym w warunkach izokinetycznych (5 serii; 3 powtórzenia; 180°/sek.). Realizację tak sformułowanego celu badań sprowadzono do poszukiwania odpowiedzi na poniższe pytania:

1. Czy zastosowanie międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi (80% AOP) ma istotny wpływ na zmiany momentu siły mięśniowej i poziomu aktywności mięśniowej podczas prostowań w stawie kolanowym w warunkach izokinetycznych?
2. Czy liczba cykli ograniczenia przepływu krwi ma istotny wpływ na zmiany momentu siły mięśniowej i poziomu aktywności mięśniowej podczas prostowań w stawie kolanowym w warunkach izokinetycznych?
3. Czy zastosowanie pozorowanego ograniczenia przepływu krwi (ucisk ciśnieniem 20 mm Hg) wpłynie na zmiany momentu siły mięśniowej i poziomu aktywności mięśniowej podczas prostowań w stawie kolanowym w warunkach izokinetycznych?

## **2.2. Hipotezy badawcze**

1. Zastosowanie metody międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi spowoduje istotny wzrost wartości momentów siły mięśniowej oraz aktywności mięśniowej podczas prostowań w stawie kolanowym w warunkach izokinetycznych.
2. Liczba cykli ograniczenia przepływu krwi będzie miała istotny wpływ na wzrost wartości momentów siły mięśniowej oraz zmiany aktywności mięśniowej podczas prostowań w stawie kolanowym w warunkach izokinetycznych.
3. Zastosowanie pozorowanego ciśnienia w ramach metody międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi nie spowoduje zmian wartości momentu siły mięśniowej oraz aktywności mięśniowej podczas prostowań w stawie kolanowym w warunkach izokinetycznych.

## **2.3. Materiał badawczy**

Wielkość próby określono za pomocą programu G\*Power w wersji 3.1.9.2 (Düsseldorf, Niemcy), przyjmując następujące parametry testu statystycznego: „ANOVA dla powtarzanych pomiarów, w schemacie wewnątrzczynnikiem” (jedna grupa uczestników, trzy czynniki eksperymentalne i pięć pomiarów). Moc statystyczna została przyjęta na poziomie 0,8, poziom istotności wynosił 0,05, a wielkość efektu ustalono na 0,3-0,4 na podstawie wcześniejszych badań, w których analizowano bezpośredni wpływ międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi na zmiany parametrów siły mięśniowej (Teixeira i wsp. 2018; Torma i wsp. 2021; Trybulski i wsp. 2022; Wilk i wsp. 2021a). Analiza wykazała, że wymagana minimalna wielkość próby wynosi 12-15 uczestników. Jednakże należy zwrócić uwagę, że urządzenia pomiarowe wykorzystane w badaniach nad międzywysiłkowym ograniczeniem przepływu krwi, na podstawie których wykonano ocenę wielkości próby, różniły się od tych zastosowanych w niniejszej dysertacji. Dotychczasowo nie przeprowadzono eksperymentów naukowych z zakresu międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi z wykorzystaniem pomiaru EMG i izokinetycznego. Dostępne publikacje analizujące wpływ międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi na możliwości wysiłkowe opierały się na grupie badawczej od 7 do 12 osób. Istnieje jedna publikacja (Fostiak i wsp. 2022), w której grupa badawcza liczyła aż 34 osoby, jednakże składała się z przedstawicieli obydwu płci. Biorąc pod uwagę tylko mężczyzn, to w eksperymencie przeprowadzonym przez Fostiaka i wsp. (2022) zbadano 12 uczestników.

Biorąc pod uwagę powyższe dane, w celu zwiększenia rzetelności badań zdecydowano się zrekrutować 20 uczestników, którzy ukończyli wszystkie niezależne procedury badawczej. Kryteriami włączenia do grupy badanych były: aktywność fizyczna 3 razy w tygodniu przez min. 1 godzinę, przez min. 3 miesiące przed eksperymentem, brak chorób układu krążenia (m. in. migotania przedsionków, nadciśnienia tętniczego, zakrzepicy, niewydolności serca) oraz urazów układu mięśniowo-szkieletowego przez co najmniej 6 miesięcy przed rozpoczęciem badania (osobista deklaracja). Podczas badań wykonano analizę składu ciała badanych aparaturą InBody 720 firmy Biospace (Korea) wykorzystującą metodę wieloczęstotliwościowej bioelektrycznej impedancji. Badania analizy składu ciała wykonane zostały podczas pierwszej wizyty sesji eksperymentalnej przed rozgrzewką. Charakterystyka uczestników badania została przedstawiona w tabeli 1.

**Tabela 1.** Charakterystyka uczestników badania [n=20]

| <b>Wiek<br/>[lata]</b> | <b>Masa ciała<br/>[kg]</b> | <b>Wysokość ciała<br/>[cm]</b> | <b>100% AOP<br/>[mm Hg]</b> | <b>80% AOP<br/>[mm Hg]</b> |
|------------------------|----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 22.7 ± 6.7             | 83.0 ± 15.9                | 180.8 ± 8.3                    | 204.0 ± 30.1                | 163.2 ± 24.0               |

AOP – minimalne ciśnienie w opasce uciskowej powodujące całkowite zablokowanie przepływu krwi tętniczej.

Próby testowe przeprowadzono w Laboratorium Wysiłku Fizycznego Akademii Wychowania fizycznego i Sportu w Gdańsku. Badanych poproszono o niewykonywanie żadnego intensywnego wysiłku w ciągu 24 godzin przed każdym eksperymentem. Uczestnicy zostali poinstruowani, żeby przez okres badań nie zmieniali nawyków żywieniowych oraz nie stosowali suplementów oraz środków pobudzających. Przed rozpoczęciem badań uczestników poinformowano o potencjalnym ryzyku uczestnictwa w eksperymencie oraz o możliwości rezygnacji w każdym momencie. Badani wypełnili pisemne zgody na udział w eksperymencie. Uczestnicy nie znali oczekiwanych wyników oraz nie otrzymali informacji o dokładnym przebiegu badań. W celu zwiększenia rzetelności eksperymentu, sesje przeprowadzane były indywidualnie, a uczestnicy nie otrzymywali informacji o osiągniętych wynikach. Każdy uczestnik otrzymał numer, a kolejność warunków testowych została zrandomizowana za pomocą generatora randomization.com. Projekt badawczy został zaakceptowany przez Komisję Bioetyczną przy Okręgowej Izbie Lekarskiej w Gdańsku (KB - 11/ 22), a wszystkie procedury były zgodne z zasadami etyki standardu Deklaracji Helsińskiej, 2013.

## 2.4. Sesja zapoznawcza

Tydzień przed rozpoczęciem testów właściwych, badani wykonali sesję zapoznawczą. Przed przystąpieniem do prób wysiłkowych uczestnicy wykonali rozgrzewkę składającą się z: 5-minutowej jazdy na cykloergometrze (60 obrotów na minutę, obciążenie zewnętrzne 60 W), ćwiczenia rozciągającego mięsień czworogłowy uda w pozycji stojącej (3 serie po 10 powtórzeń po 2 sek. każde), 2 serie po 10 przysiadów, 4 wyskoki z półprzysiadu oraz trzy 5-sekundowe izometryczne prostowania w stawie kolanowym (izometryczne prostowanie w stawie kolanowym wykonywane było z odczuwalną siłą kolejno 25%, 50%, 75% maksymalnego skurczu; Lisee i wsp., 2019). Po rozgrzewce badani odpoczywali 5 minut, a następnie wykonywali dwie serie po jednym 5-sekundowym izometrycznym prostowaniu w stawie kolanowym (MVC) z 30-sekundową przerwą wypoczynkową. Po wysiłku uczestnicy odpoczywali przez 10 minut (5 minut w pozycji siedzącej). Następnie badani przystąpili do próby wysiłkowej składającej się z 3 serii po 3 powtórzenia izokinetycznych prostowań w stawie kolanowym z prędkością 180°/sek. Pomiędzy każdą próbą wysiłkową uczestnicy odpoczywali przez 6,5 minuty (5 min w pozycji siedzącej). Podczas pierwszej, drugiej i trzeciej przerwy wypoczynkowej na nogę dominującą zastosowano 5-minutowe ograniczenie przepływu krwi ciśnieniem 100 mm Hg.

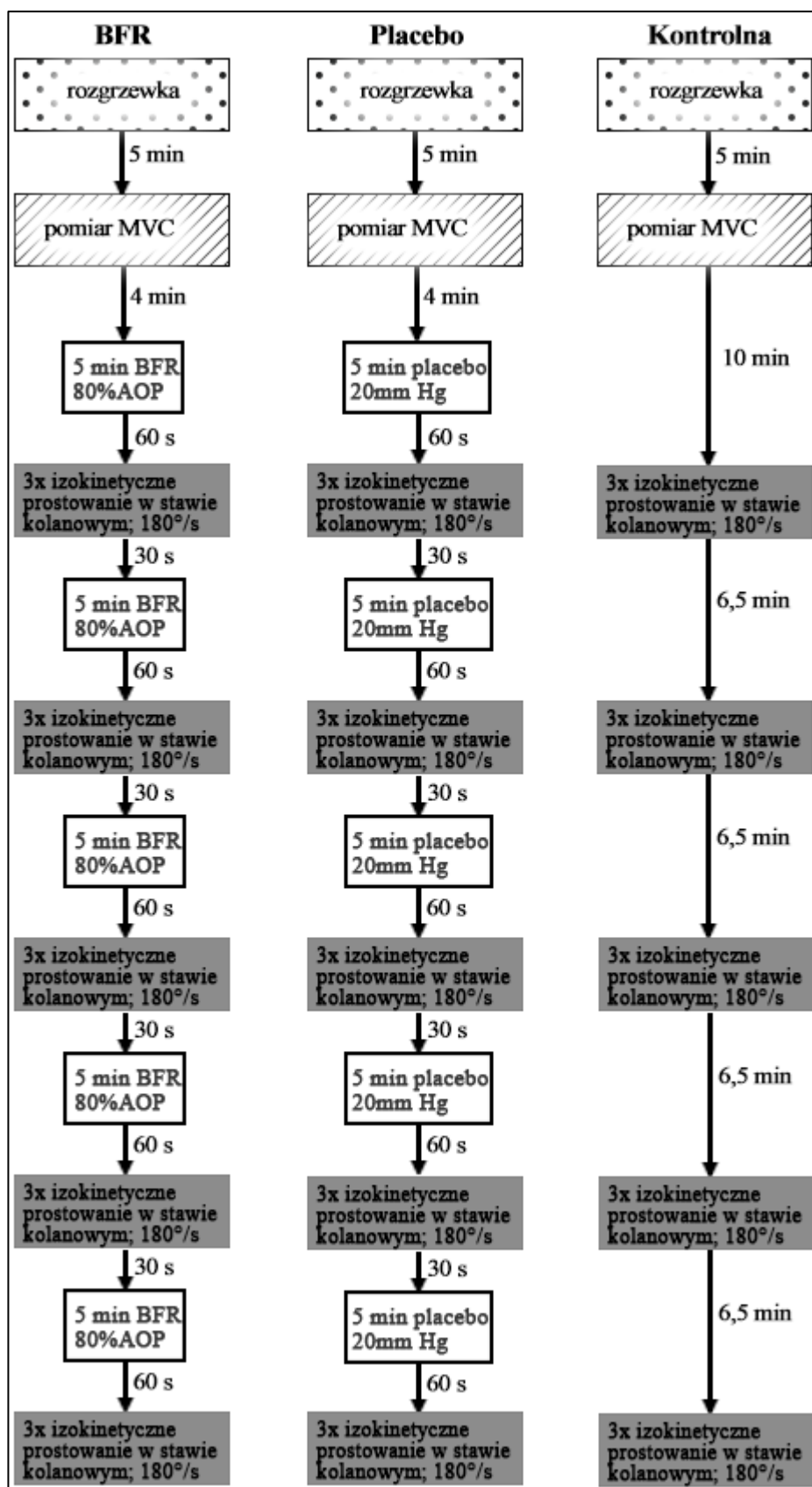
## 2.5. Sesje eksperymentalne

Sesje eksperymentalne odbywały się w odstępie min. 72 godzin (Skorski i wsp., 2019), za każdym razem w tym samym przedziale czasowym. Na początku pierwszej sesji eksperymentalnej uczestnicy zostali poddani badaniom analizy składu ciała. Przed próbami wysiłkowymi osoby badane wykonały rozgrzewkę, taką samą, jak podczas sesji zapoznawczej. Po rozgrzewce każdej sesji eksperymentalnej badani wykonywali dwie serie po jedno 5-sekundowe izometryczne prostowanie w stawie kolanowym (MVC) z 30-sekundową przerwą wypoczynkową, w celu zbadania poziomu aktywności mięśnia prostego uda. Rezultaty MVC wykorzystano do normalizacji sygnału elektrycznego, który został poddany analizie. Następnie uczestnicy odpoczywali 10 minut (5 min w pozycji siedzącej). Po odpoczynku badani wykonywali część zasadniczą procedury eksperymentalnej, która składała się z 5 serii po 3 powtórzenia izokinetycznych prostowań w stawie kolanowym z prędkością 180°/sek. z przerwą 6,5-minutową (5 min w pozycji siedzącej) między seriami. Każdy uczestnik badań został poddany trzem interwencjom według losowej kolejności:

- BFR - ograniczenie przepływu krwi (80% AOP),
- Placebo - pozorowane ograniczenie przepływu krwi (20 mm Hg),
- Kontrolna - warunki kontrolne, bez ograniczenia przepływu krwi (Rycina 1).

Przed pierwszą serią prostowań w stawie kolanowym w warunkach izokinetycznych, a także w trakcie każdej przerwy wypoczynkowej podczas interwencji BFR oraz placebo zastosowano ograniczenie przepływu krwi (80% AOP; 5min) lub pozorowane ograniczenie przepływu krwi (20 mm Hg; 5 min).

W przypadku pomiarów EMG, izokinetycznych a także w celu dostosowania parametrów ograniczenia przepływu krwi do cech indywidualnych osób badanych występuje wiele czynników mogących mieć zakłócający wpływ na wynik końcowy badania. Do czynników tych zalicza się między innymi: skład masy ciała (Norander i wsp., 2003), ilość tkanki mięśniowej (Loenneke i wsp., 2014a), ilość i rozmieszczenie tkanki tłuszczowej (Nordander i wsp., 2003), obwód kończyny, ciśnienie krwi (Loenneke i wsp., 2014a), wartość ciśnienia BFR powodującego całkowite zamknięcie przepływu krwi (Loenneke i wsp., 2011a), pozycja ciała, w której stosowane jest BFR (Hughes i wsp., 2018; Sieljack i wsp., 2018; Karanasios i wsp., 2021), umieszczenie elektrody EMG (Wong i wsp., 2006). Dla tego też oprócz zastosowania w przedstawionej procedurze badawczej najwyższej klasy laboratoryjnych urządzeń pomiarowych w celu wyeliminowania istotnych czynników mogących zakłócać uzyskane wyniki poszczególnych etapów badawczych, zastosowano układ krzyżowy badania.



Rycina 1. Schemat poszczególnych etapów procedury badawczej.

## 2.6. Procedura ograniczenia przepływu krwi

W celu poprawności wykonywanego BFR i eliminacji ryzyka wpływu czynników osobniczych oraz zewnętrznych (szerokość opaski) na stopień ograniczenia przepływu krwi, każdy uczestnik badania został poddany pomiarom AOP (Loenneke i wsp., 2011a; McEwen i wsp., 2018). Wyniki wykorzystano do obliczenia indywidualnego ciśnienia dla każdego z badanych. Co więcej pozycja ciała (leżąca; siedząca; stojąca) osoby, która poddawana jest interwencji ograniczenia przepływu krwi także ma duże znaczenie (Hughes i wsp., 2018; Sieljack i wsp., 2018; Karanasios i wsp., 2021). Dla tego pomiar AOP jak i ograniczenie przepływu krwi lub placebo w trakcie sesji eksperymentalnych wykonywane były w pozycji siedzącej. Ograniczenie przepływu krwi zastosowano tylko na kończynę dominującą (deklaracja uczestnika badań). W celu wywołania ograniczenia przepływu krwi wykorzystano opaski uciskowe (FitCuffs Leg Cuffs V3.1; szerokość 10,5 cm; Denmark), które założono na proksymalną część dominującej kończyny dolnej. Chcąc określić wartość ciśnienia w mankiecie, przed rozgrzewką podczas sesji eksperymentalnej, w której zastosowano interwencję BFR lub placebo, wykonano pomiar AOP. W celu ustalenia wartości AOP, po przyjęciu przez badanego pozycji siedzącej, zakładano na badaną kończynę opaskę uciskową tak, aby dokładnie przylegała do skóry. Następnie, mankiet pompowano do ciśnienia 70 mm Hg, które następnie zwiększano co 5 mmHg, do momentu zablokowania przepływu krwi tętniczej (zatrzymanie tętna: Sieljacks i wsp., 2018). Pomiar pulsu wykonywano na tętnicy piszczelowej tylnej przy kostce przyśrodkowej za pomocą dopplera ręcznego z sondą 8 MHz (Edan SD3, Sonoline C, Contec, China) (Behringer i wsp., 2017). W celu dokładnego określenia wartości AOP pomiar wykonywany był dwukrotnie w odstepie 5 min (Sieljacks i wsp., 2018). Niższa z otrzymanych wartości ciśnienia w opasce uciskowej została wykorzystana jako 100% AOP (Sieljacks i wsp., 2018). Ciśnienie w opasce w procedurze ograniczenia przepływu krwi wynosiło 80% AOP ( $163,2 \pm 24,0$  mm Hg) w protokole BFR oraz 20 mm Hg w sesji placebo. W procedurze BFR i placebo zastosowano 5-minutowe ograniczenie przepływu krwi oraz 1-minutową reperfuzję przed każdą serią prostowań w stawie kolanowym w warunkach izokinetycznych (Rycina 2). Założenie oraz napompowanie opaski po każdej serii wysiłku trwało 30 sekund. Ciśnienie w opasce ograniczającej przepływ krwi było stale kontrolowane za pomocą manometru.

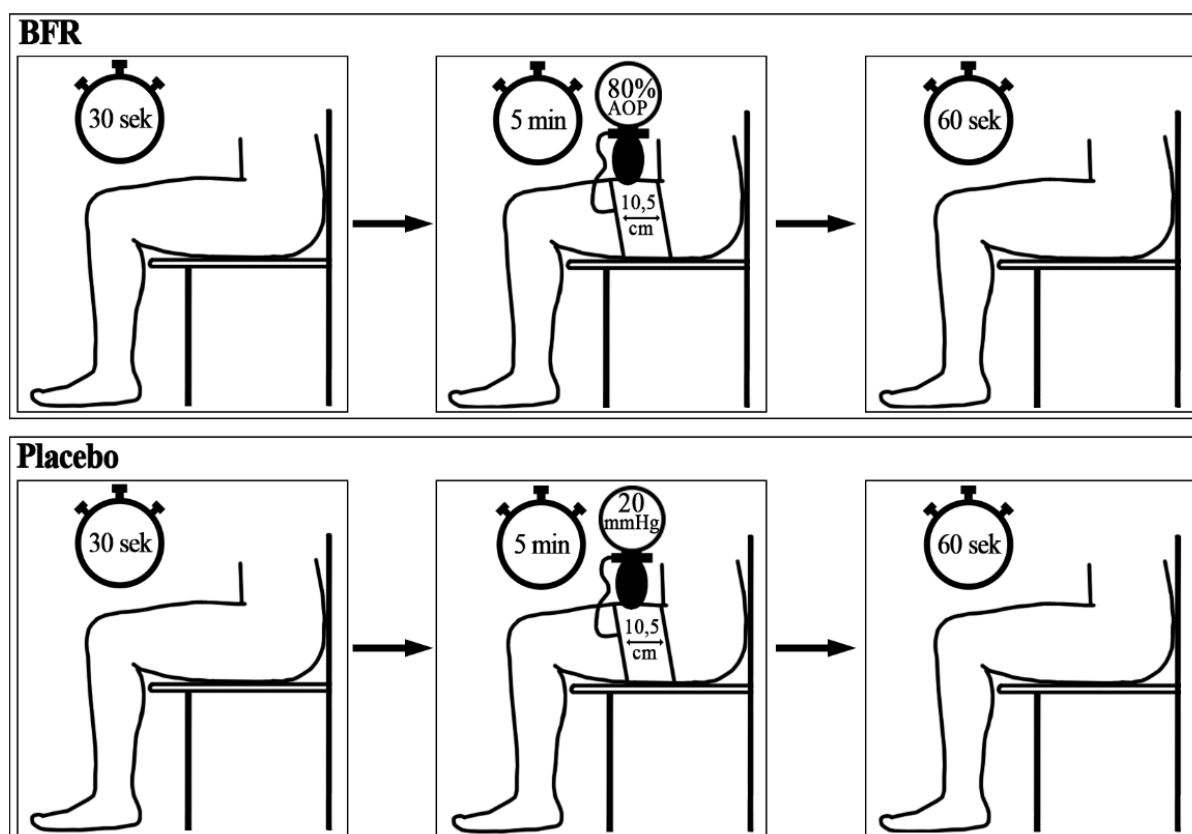
## **2.7. Elektromiograficzny pomiar aktywności mięśniowej**

Aktywność mięśnia prostego uda nogi dominującej podczas prostowania w stawie kolanowym została poddana analizie za pomocą techniki elektromiografii powierzchniowej (sEMG). Dwie elektrody (45 x 42 mm, Sorimex EK-S 45 PSG, Polska, Toruń), zgodnie z wytycznymi Międzynarodowego Towarzystwa Elektromiografii i Kinezyjologii (Merletti, 1999; Hermens i wsp., 1999), po uprzednim usunięciu owłosienia i odtłuszczeniu skóry alkoholem umiejscowiono na wysokości brzośca mięśnia prostego uda nogi dominującej, wzdłuż oczekiwanego przebiegu włókien mięśniowych. Elektrody umocowano po ukończeniu rozgrzewki pozostały w tym samym miejscu do momentu zakończenia ostatniej serii ćwiczenia w warunkach izokinetycznych. Do pomiaru aktywności mięśnia prostego uda wykorzystano elektromiograf powierzchniowy TeleMyo DTS firmy Noraxon (Scottsdale, AZ, USA). Pomiar sEMG wykonywany był podczas każdego skurczu koncentrycznego mięśnia prostego uda. Uzyskany sygnał został przetworzony oraz przeanalizowany za pomocą oprogramowania MyoResearch 1.08 firmy Noraxon. Następnie wyniki sEMG poddano rektyfikacji, wygładzeniu oraz normalizacji względem aktywności mięśniowej podczas maksymalnego dowolnego skurczu izometrycznego (MVC) wykonywanego przed częścią zasadniczą każdej sesji eksperymentalnej. W ten sposób otrzymano poziom aktywności mięśniowej w postaci wartości procentowej MVC (%MVC) podczas każdego skurczu koncentrycznego mięśnia prostego uda.

## **2.8. Dynamometryczny pomiar momentów siły mięśniowej**

Do pomiaru momentów siły mięśniowej prostowników stawu kolanowego wykorzystano dynamometr izokinetyczny Biodex System 4 Pro (Biodex Shirley Company, USA). Fotel urządzenia pomiarowego ustawiony był tak, aby kąt w stawie biodrowym oraz kolanowym wynosił 90°. Tułów, biodra oraz udo nogi dominującej zostały zamocowane do fotela za pomocą pasów w celu uniknięcia dodatkowych ruchów ciała, natomiast podudzie do ramienia dynamometru. Oś obrotu dynamometru znajdowała się na wysokości osi obrotu stawu kolanowego badanej kończyny. Uczestnicy wykonywali prostowanie w stawie kolanowym w warunkach izometrycznych (MVC) oraz izokinetycznych. Próba MVC wykonywana była w celu pozyskania sygnału sEMG do dalszej analizy aktywności mięśniowej. Podczas ćwiczenia w warunkach izometrycznych kąt w stawie kolanowym wynosił 90°. Natomiast podczas prób w warunkach izokinetycznych ruch realizowany był od

kąta  $90^\circ$  w stawie kolanowym do pełnego wyprostu ze stałą prędkością kątową  $180^\circ/\text{sek}$ . Wysiłek w warunkach izokinetycznych wykonywany był w celu uzyskania wartości momentów siły mięśniowej, które posłużyły do dalszej analizy. Pomiarom podlegała tylko faza koncentryczna ćwiczenia. Faza ekscentryczna ćwiczenia była pasywna (odpoczynek).



Rycina 2. Procedura ograniczenia przepływu krwi

## 2.9. Narzędzia analizy statystycznej

Wszystkie analizy statystyczne przeprowadzono przy użyciu programu Statistica 9.1. Wyniki dla szczytowej wartości momentu siły mięśniowej uzyskanej w pomiarach izokinetycznych oraz poziomy aktywności mięśniowej (%MVC) przedstawiono jako średnie wraz z odchyleniami standardowymi. Do oceny normalności rozkładu danych użyto testu Kołmogorowa-Smirnowa, a sferyczność wariancji przeanalizowano testem Mauchly'ego. Analizę statystyczną dla wartości momentów siły oraz poziomu aktywności mięśniowej pomiędzy poszczególnymi interwencjami zbadano stosując dwuczynnikową analizę wariancji

ANOVA [3 interwencje (Kontrolna vs. Placebo vs. BFR) x 5 serii]. Dodatkowo w celu oceny różnic pomiędzy seriami (serie 1-5), niezależnie w obrębie poszczególnych interwencji (Kontrolna; Placebo; BFR), zastosowano jednoczynnikową analizę wariancji ANOVA. Do określenia wielkości efektu (ES) obliczono wartości eta kwadrat. Zostały one sklasyfikowane jako małe w zakresie 0.01–0.059, 0.06– 0.137 jako umiarkowane i  $> 0.137$  jako duże. W przypadku wystąpienia istotności dla wyniku analizy interakcji lub istotności wyniku dla efektu głównego, przeprowadzono testy post hoc Tukeya. Ponadto w celu porównania wielkości efektu pomiędzy wynikami w poszczególnych seriach, wykorzystano wielkość efektu  $d$  ES Cohena (efekt duży  $d > 0.8$ ; średni  $d 0.5–0.8$ ; mały  $d 0.2–0.5$ ; trywialny  $d < 0.2$ ).

### 3. WYNIKI BADAŃ

#### 3.3. Analizy statystyczne szczytowych wartości momentów siły mięśniowej

Dwuczynnikowa ANOVA dla średniej szczytowych wartości momentów siły mięśniowej nie wykazała istotnie statystycznych różnic ( $p = 0.696$ ;  $\eta^2 = 0.035$ ) dla wyniku analizy interakcji (3 interwencje  $\times$  5 serii; tabela 2). Dwuczynnikowa ANOVA dla średniej szczytowych wartości momentów siły mięśniowej nie wykazała istotnych różnic dla analizy efektu głównego „interwencji” ( $p = 0.489$ ;  $\eta^2 = 0.036$ ; tabela 3). Dwuczynnikowa ANOVA dla średniej szczytowych wartości momentów siły mięśniowej także nie wykazała istotnego wpływu efektu głównego „serii” ( $p = 0.272$ ;  $\eta^2 = 0.064$ ; tabela 4). Wielkość efektu  $d$  ES Cohena dla średniej szczytowych wartości momentów siły mięśniowej przedstawiono w tabeli 5. Jednoczynnikowa ANOVA dla średniej szczytowych wartości momentów siły mięśniowej nie wykazała istotnie statystycznych różnic pomiędzy seriami 1-5 w obrębie interwencji kontrolnej ( $p = 0.578$ ;  $\eta^2 = 0.037$ ); w obrębie interwencji placebo ( $p = 0.268$ ;  $\eta^2 = 0.065$ ); w obrębie interwencji BFR ( $p = 0.394$ ;  $\eta^2 = 0.051$ ).

Tabela 2. Średnia i odchylenie standardowe dla szczytowych wartości momentów siły mięśniowej, mierzonych podczas prostowania w stawie kolanowym w warunkach izokinetycznych

| Interwencja      | Momenty siły mięśniowej [Nm]        |                                      |                                      |                                     |                                      |
|------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
|                  | Seria 1<br>(95% CI)                 | Seria 2<br>(95% CI)                  | Seria 3<br>(95% CI)                  | Seria 4<br>(95% CI)                 | Seria 5<br>(95% CI)                  |
| <b>Kontrolna</b> | 189.4 $\pm$ 47.4<br>(99.3 do 267.2) | 190.0 $\pm$ 48.9<br>(99.8 do 272.5)  | 186.4 $\pm$ 47.1<br>(101.9 do 256.1) | 188.3 $\pm$ 50.1<br>(98.3 do 262.2) | 189.0 $\pm$ 49.8<br>(100.2 do 267.3) |
| <b>Placebo</b>   | 189.9 $\pm$ 45.9<br>(96.8 do 267.7) | 191.4 $\pm$ 48.0<br>(95.9 do 269.5)  | 187.4 $\pm$ 46.6<br>(99.1 do 264.6)  | 189.2 $\pm$ 46.7<br>(95.2 do 270.7) | 187.7 $\pm$ 46.7<br>(97.2 do 268.0)  |
| <b>BFR</b>       | 191.3 $\pm$ 45.3<br>(93.3 do 266.3) | 193.0 $\pm$ 45.3<br>(100.1 do 264.7) | 190.6 $\pm$ 46.7<br>(96.0 do 264.4)  | 189.9 $\pm$ 44.8<br>(98.1 do 259.8) | 193.8 $\pm$ 46.0<br>(101.0 do 263.1) |

CI – przedział ufności; interwencja: Kontrolna – bez ograniczenia przepływu krwi, Placebo –pozorowane ograniczenie przepływu krwi wynoszące 20 mm Hg, BFR - ograniczenie przepływu krwi

Tabela 3. Średnia szczytowych wartości momentów siły mięśniowej dla wartości efektu głównego interwencji, mierzonych podczas prostowania w stawie kolanowym w warunkach izokinetycznych

| <b>Interwencja</b> | <b>Moment siły mięśniowej [Nm]</b> |
|--------------------|------------------------------------|
| <b>Kontrolna</b>   | 188.63                             |
| <b>Placebo</b>     | 189.14                             |
| <b>BFR</b>         | 191.73                             |

Interwencje: Kontrolna – bez ograniczenia przepływu krwi, Placebo – pozorowane ograniczenie przepływu krwi wynoszące 20 mm Hg, BFR - ograniczenie przepływu krwi

Tabela 4. Średnia szczytowych wartości momentów siły mięśniowej dla wartości efektu głównego serii, mierzonych dla poszczególnych serii podczas prostowania w stawie kolanowym w warunkach izokinetycznych

| <b>Seria</b> | <b>Moment siły mięśniowej [Nm]</b> |
|--------------|------------------------------------|
| <b>1</b>     | 190.21                             |
| <b>2</b>     | 191.49                             |
| <b>3</b>     | 188.13                             |
| <b>4</b>     | 189.16                             |
| <b>5</b>     | 190.17                             |

Tabela 5. Wielkość efektu d Cohena dla średniej szczytowych wartości momentów siły mięśniowej, mierzonych podczas prostowania w stawie kolanowym w warunkach izokinetycznych

| <b>Interwencja</b>           | <b>Seria 1</b> | <b>Seria 2</b> | <b>Seria 3</b> | <b>Seria 4</b> | <b>Seria 5</b> |
|------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>Kontrolna vs. Placebo</b> | 0.01           | 0.03           | 0.02           | 0.02           | 0.04           |
| <b>Kontrolna vs. BFR</b>     | 0.04           | 0.06           | 0.02           | 0.03           | 0.10           |
| <b>Placebo vs. BFR</b>       | 0.03           | 0.03           | 0.09           | 0.02           | 0.13           |

ES Cohena (efekt duży  $d > 0.8$ ; średni  $d 0.8-0.5$ ; mały  $d 0.49-0.20$ ; trywialny  $d < 0.2$ ).

Interwencje: Kontrolna – bez ograniczenia przepływu krwi, Placebo – pozorowane ograniczenie przepływu krwi wynoszące 20 mm Hg, BFR - ograniczenie przepływu krwi

### 3.4. Analizy statystyczne dla poziomu aktywności mięśniowej

Dwuczynnikowa ANOVA dla poziomu aktywności mięśniowej nie wykazała istotnie statystycznych różnic ( $p = 0.124$ ;  $\eta^2 = 0.007$ ; tabela 6) dla wyniku analizy interakcji (3 interwencje x 5 serii). Ponadto dwuczynnikowa ANOVA nie wykazała istotnego statystycznie wpływu dla efektu głównego „interwencji” ( $p = 0.836$ ;  $\eta^2 = 0.009$ ; tabela 7). Dwuczynnikowa ANOVA nie wykazała także istotnego wpływu ( $p = 0.973$ ;  $\eta^2 = 0.006$ ; tabela 8) dla efektu głównego „serii”. Wielkość efektu d ES Cohena dla poziomu aktywności mięśniowej przedstawiono w tabeli 9. Jednoczynnikowa ANOVA dla poziomu aktywności mięśniowej nie wykazała istotnie statystycznych różnic pomiędzy seriami 1-5 w obrębie interwencji: kontrolnej ( $p = 0.651$ ;  $\eta^2 = 0.031$ ), placebo ( $p = 0.161$ ;  $\eta^2 = 0.081$ ), BFR ( $p = 0.355$ ;  $\eta^2 = 0.055$ ).

Tabela 6. Średnia i odchylenie standardowe dla poziomu aktywności mięśniowej, mierzonej podczas prostowania w stawie kolanowym w warunkach izokinetycznych

| Interwencja      | Poziom aktywności mięśniowej [%MVC] |                                 |                                 |                                 |                                 |
|------------------|-------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
|                  | Seria 1<br>(95% CI)                 | Seria 2<br>(95% CI)             | Seria 3<br>(95% CI)             | Seria 4<br>(95% CI)             | Seria 5<br>(95% CI)             |
| <b>Kontrolna</b> | 98.8 ± 16.9<br>(59.4 do 124.6)      | 100.2 ± 25.5<br>(65.8 do 153.8) | 93.1 ± 29.9<br>(90.6 do 148.1)  | 100.2 ± 31.4<br>(54.6 do 205.1) | 96.3 ± 22.7<br>(55.7 do 136.2)  |
| <b>Placebo</b>   | 102.4 ± 17.2<br>(76.7 do 129.3)     | 99.0 ± 20.8<br>(61.5 do 141.7)  | 101.7 ± 20.0<br>(72.5 do 148.5) | 93.1 ± 31.0<br>(90.0 do 158.8)  | 101.9 ± 16.1<br>(69.6 do 125.3) |
| <b>BFR</b>       | 99.5 ± 25.6<br>(57.4 do 180.7)      | 97.9 ± 16.5<br>(62.7 do 135.6)  | 101.2 ± 28.5<br>(76.8 do 187.4) | 106.9 ± 35.8<br>(61.6 do 237.4) | 97.9 ± 20.0<br>(61.1 do 144.0)  |

Interwencje: Kontrolna – bez ograniczenia przepływu krwi, Placebo –pozorowane ograniczenie przepływu krwi wynoszące 20 mm Hg, BFR - ograniczenie przepływu krwi

Tabela 7. Średnia poziomu aktywności mięśniowej dla efektu głównego interwencji, mierzonych podczas prostowania w stawie kolanowym w warunkach izokinetycznych

| <b>Interwencja</b> | <b>Poziom aktywności mięśniowej [%MVC]</b> |
|--------------------|--------------------------------------------|
| <b>Kontrolna</b>   | 97.71                                      |
| <b>Placebo</b>     | 99.59                                      |
| <b>BFR</b>         | 100.67                                     |

Interwencje: Kontrolna – bez ograniczenia przepływu krwi, Placebo –pozorowane ograniczenie przepływu krwi wynoszące 20 mm Hg, BFR - ograniczenie przepływu krwi

Tabela 8. Średnia poziomu aktywności mięśniowej dla efektu głównego serii, mierzonego podczas prostowania w stawie kolanowym w warunkach izokinetycznych

| <b>Seria</b> | <b>Poziom aktywności mięśniowej [%MVC]</b> |
|--------------|--------------------------------------------|
| <b>1</b>     | 100.22                                     |
| <b>2</b>     | 99.02                                      |
| <b>3</b>     | 98.67                                      |
| <b>4</b>     | 100.04                                     |
| <b>5</b>     | 98.67                                      |

Tabela 9. Wielkość efektu d ES Cohena dla średniej aktywności mięśniowej mierzonej podczas prostowania w stawie kolanowym w warunkach izokinetycznych

| <b>Interwencja</b>           | <b>Seria 1</b> | <b>Seria 2</b> | <b>Seria 3</b> | <b>Seria 4</b> | <b>Seria 5</b> |
|------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>Kontrolna vs. Placebo</b> | 0.21           | 0.05           | 0.34           | 0.23           | 0.28           |
| <b>Kontrolna vs. BFR</b>     | 0.03           | 0.11           | 0.27           | 0.20           | 0.07           |
| <b>Placebo vs. BFR</b>       | 0.13           | 0.06           | 0.02           | 0.41           | 0.22           |

Interwencje: Kontrolna – bez ograniczenia przepływu krwi, Placebo –pozorowane ograniczenie przepływu krwi wynoszące 20 mm Hg, BFR - ograniczenie przepływu krwi

## 4. DYSKUSJA

Głównym celem pracy była ocena wpływu międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi na zmiany wartości momentu siły mięśniowej oraz poziomu aktywności mięśnia prostego uda podczas prostowań w stawie kolanowym w warunkach izokinetycznych (5 serii; 3 powtórzenia; 180°/sek.). W efekcie analizy wyników przeprowadzonych badań nie zaobserwowano istotnych zmian wartości momentów siły mięśniowej oraz istotnych zmian poziomu aktywności mięśniowej w efekcie zastosowania metody międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi w porównaniu do interwencji kontrolnej. Nie wykazano także istotnych różnic wartości momentu siły mięśniowej oraz zmian poziomu aktywności mięśniowej pomiędzy interwencjami BFR a Placebo. Jednakże należy zwrócić uwagę na fakt, że metoda międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi badana jest stosunkowo niedługo. Wiąże się to z brakiem precyzyjnych wytycznych i danych naukowych co do zależności parametrów stosowanego BFR oraz ich potencjalnego wpływu na bezpośrednie powysiłkowe reakcje, zmiany adaptacyjne. Według wiedzy autora prezentowana dysertacja jest pierwszą pracą naukową badającą wpływ metody międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi na zmiany wartości momentów siły mięśniowej oraz poziom aktywności mięśniowej w warunkach izokinetycznych. Uzyskane wyniki badań tzn. brak istotnych zmian zarówno wartości momentów siły, jak i aktywności mięśniowej w następstwie zastosowanych interwencji podważają wcześniejsze doniesienia prezentowane w badaniach Wilka i wsp. (2021a) oraz Trybalskiego i wsp. (2022). Wyniki dysertacji są o tyle istotne, że w prezentowanej pracy wykorzystano urządzenia badawcze o najwyższym standardzie (Biodex 4 Pro, Tele Myo DTS Noraxon) w przeciwieństwie do nielaboratoryjnych urządzeń pomiarowych (Tendo Unit, Keiser Squat Machine) stosowanych we wcześniejszych eksperymentach. Należy także zwrócić uwagę na fakt, że dotychczasowe badania z wykorzystaniem międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi nie oceniały wpływu efektu placebo. Zastosowanie procedury zawierającą placebo pomaga określić czy ewentualne zmiany są efektem reakcji fizjologicznych czy oddziaływania strefy psychologicznej, motywacji uczestnika badania. Wcześniejsze badania z zakresu oceny wpływu przedwysiłkowym ograniczeniem przepływu krwi (Sabino-Carvalhoi wsp., 2017, Marocolo i wsp., 2016) potwierdziły istotny wpływ efektu placebo na osiągnięte wyniki, jednakże dotychczas żadne wcześniejsze badania z wykorzystaniem międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi nie dokonały takiej analizy. Tym samym wyniki niniejszej dysertacji istotnie poszerzają aktualny stan wiedzy, a jednocześnie fakt zaprzeczenia wynikom wcześniejszych

badania czyni tą pracę unikatową. Mała ilość danych naukowych z zakresu międzywysiłkowego BFR ogranicza możliwość bezpośredniego porównania uzyskanych wyników względem innych badań. Dlatego też dyskusja częściowo będzie opierała się na porównaniu uzyskanych wyników względem badań realizowanych z wykorzystaniem skurczów izotonicznych lub izometrycznych.

#### **4.1. Zmiany wartości momentu siły mięśniowej w wyniku zastosowania metody międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi**

Uzyskane wyniki badań nie wykazały istotnych różnic analizowanych parametrów pomiędzy poszczególnymi eksperymentami badawczymi, co jest sprzeczne z dotychczasowym stanem wiedzy w tej dziedzinie. W jednym z nielicznych badań naukowych, w których wykorzystano metodę międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi, Wilk i wsp. (2021a) wykazali, że zastosowanie ciśnienia w opasce uciskowej o wartości 80% AOP podczas wyciskania leżąc (5 serii; 3 powtórzenia; 60% 1RM) spowodowało wzrost poziomu mocy w porównaniu do interwencji kontrolnej. Jednakże przeprowadzone badania własne nie ujawniły wzrostu momentów siły mięśniowej w warunkach izokinetycznych. Należy jednak zwrócić uwagę na istotne różnice w procedurze badań własnych a Wilka i wsp. (2021a). W eksperymencie przeprowadzonym przez Wilka i wsp. (2021a) opaski uciskowe założono na kończyny górne, natomiast w przedstawionej procedurze eksperymentalnej, na dominującą kończynę dolną. Wpływ zastosowania procedury międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi na zmiany poziomu mocy mięśniowej kończyn dolnych dotychczas zbadali jedynie Trybulski i wsp. (2022). Wykazali oni istotne różnice w wartości generowanej mocy mięśniowej pomiędzy interwencją BFR a kontrolną, co także jest sprzeczne z wynikami niniejszej dysertacji. Jednakże należy zwrócić uwagę na fakt, że Trybulski i wsp. (2022) wykazali efekt ograniczenia spadku poziomu mocy mięśniowej (w seriach 3-5) w następstwie ograniczenia przepływu krwi przeciwnie do Wilka i wsp. (2021a), którzy zaobserwowali wzrost tego parametru. Różnice wyników badań wynikać mogły z wartości ciśnienia ograniczenia przepływu krwi. W badaniach Trybulski i wsp. (2022) zastosował ciśnienie wynoszące 60% AOP, natomiast Wilk i wsp. (2021a) użyli ciśnienia 80% AOP. Wartość ciśnienia opaski uciskowej mogła mieć istotny wpływ na charakter zmian i ich wielkość (ograniczenie spadku mocy lub jej wzrost w kolejnych seriach). Jednakże prezentowane badania nie wykazały, zarówno istotnego spadku czy też wzrostu analizowanych parametrów w żadnej z zastosowanych interwencji. Brak istotnych zmian wartości momentów siły w

kolejno wykonywanych seriach badań własnych (niezależnie od interwencji) pośrednio wskazuje na brak wystąpienia kumulacji zmęczenia, co w przypadku stosowania ograniczenia przepływu krwi może mieć istotne znaczenie. Brak wystąpienia zmęczenia może być związany ze zbyt krótkim czasem trwania wysiłku (serii) wynoszącym  $\sim 2.3$  ( $\sim 1.15$  sek. czas skurczu koncentrycznego;  $\sim 1.15$  sek. czas skurczu ekscentrycznego). Zgodnie z sugestią Trybalskiego i wsp. (2022) wydaje się, że skuteczność międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi występuje w chwili, gdy narasta wysiłkowe zmęczenie, co prawdopodobnie nie wystąpiło w niniejszych badaniach. Oprócz stosunkowo krótkiego czasu trwania wysiłku znaczenie mogła mieć także długość przerwy wypoczynkowej pomiędzy seriami, która wynosiła 6.5 min co pozwalało na uzyskanie pełnej resyntezy źródeł energetycznych przed realizacją kolejnej serii wysiłkowej. Wspomniane wcześniej badania Trybalskiego i wsp. (2022) oraz Wilka i wsp. (2021a) zakładały stosowanie krótszej przerwy wypoczynkowej, wynoszącej 5 min. Kolejnym istotnym czynnikiem procedury badawczej, który mógł mieć wpływ na fakt, że zastosowanie ograniczenia przepływu krwi nie spowodowało istotnych zmian momentów siły była realizacja wysiłku tylko jedną kończyną. Tym samym obszar mięśniowy poddany wysiłkowi fizycznemu był o co najmniej połowę mniejszy niż w badaniu Trybalskiego i wsp. (2022), czy Wilka i wsp. (2021a). Dodatkowo uczestnicy prowadzonego eksperymentu realizowali wysiłek w pozycji siedzącej, izolując i angażując do pracy jedynie prostowniki stawu kolanowego, podczas gdy w badaniu Trybalskiego i wsp. (2022) zastosowano przysiady na maszynie Keiser, które aktywują do pracy zdecydowanie większy obszar mięśniowy. Dodatkowo zarówno Trybalski i wsp. (2022) oraz Wilk i wsp. (2021a) wskazywali, że utrzymanie lub wzrost poziomu mocy w kolejnych seriach wykonywanego ćwiczenia mógł mieć związek z możliwym wystąpieniem efektu wzmocnienia poaktywacyjnego. Efekt ten występuje zarówno w warunkach tradycyjnego treningu oporowego, jak również, gdy wysiłek jest wykonywany w warunkach ograniczenia przepływu krwi (Wilk i wsp., 2020a).

W literaturze naukowej przedstawiono kilka istotnych czynników mających wpływ na wystąpienie efektu wzmocnienia poaktywacyjnego: rodzaj stosowanych ćwiczeń aktywacyjnych, rodzaj testu oceniającego potencjalne zmiany poziomu mocy mięśniowej, czas wysiłku, liczba serii wysiłku, czas przerwy wypoczynkowej, wielkość obciążenia zewnętrznego oraz rodzaj skurczu (Tillin i Bishop, 2009; Seitz i Haff, 2016). Brak istotnych zmian w wartości momentów siły mięśniowej pomiędzy poszczególnymi seriami wysiłku w badaniach własnych świadczy, że efekt wzmocnienia poaktywacyjnego nie wystąpił. Co więcej, nie zaobserwowano zmian w żadnej z badanych interwencji, niezależnie czy było

stosowane ograniczenie przepływu krwi i jaka stosowana była wartość ciśnienia w opasce uciskowej. Istotnym czynnikiem determinującym wywołanie efektu wzmocnienia poaktywacyjnego jest stosunek objętości wysiłku do czasu trwania przerwy wypoczynkowej. W badaniach własnych zastosowano 6.5-minutową przerwę wypoczynkową, co jest zgodne z wytycznymi Seitz i Haff (2016), ale czas trwania wysiłku był istotnie niższy. Należy także brać pod uwagę rodzaj skurczu realizowany w procedurze badań własnych. W badaniach przeprowadzonych przez Krzysztofika i wsp. (2020), wykazano istotnie wyższe korzyści wynikające z wywołania efektu wzmocnienia poaktywacyjnego wywołanego skurczem ekscentrycznym w porównaniu do efektu osiągniętego poprzez oddziaływanie skurczem koncentrycznym. Należy podkreślić, że procedura prezentowanych badań zakładała stosowanie tylko skurczu koncentrycznego, co mogło być jedną z przyczyn zarówno braku wystąpienia efektu wzmocnienia poaktywacyjnego, ale także braku korzyści powstałych w wyniku stosowania opasek uciskowych. Badania Salagasa i wsp. (2022), jako jedyne w światowej literaturze, dokonały oceny i porównania klasycznej procedury wywołania efektu wzmocnienia poaktywacyjnego oraz procedury przedwysiłkowego BFR. Ograniczenie przepływu krwi wykonane było przed wysiłkiem (IPC; 5 min; 100% AOP; 5 min reperfuzji), natomiast w ramach ćwiczenia aktywacyjnego wykorzystano wyciskanie sztangi leżąc (3 powtórzenia; 90% 1RM). Dodatkowo zastosowano także połączenie ćwiczenia aktywacyjnego i metody przedwysiłkowego BFR (PAPE+IPC). Po zastosowaniu PAPE zaobserwowano wzrost średniej prędkości sztangi podczas wyciskania leżąc w seriach 2 - 4 (4 serie; 12 sek.; 60% 1RM) względem interwencji kontrolnej. Natomiast po wykonaniu PAPE + IPC zaobserwowano wzrost średniej prędkości tylko w pierwszej serii wysiłku względem interwencji kontrolnej. Najskuteczniejsze jednak okazało się zastosowanie wyłącznie metody przedwysiłkowego ograniczenia przepływu krwi, które spowodowało wzrost średniej prędkości sztangi już w pierwszej serii, a efekt ten utrzymywał się przez 4 serie ćwiczenia, co jest niezgodne z uzyskanymi wynikami badań własnych. Brak wzrostu momentów siły mięśniowej w badaniu własnym, pomimo wykorzystania opaski uciskowej także przed pierwszą serią może być związany także ze zbyt niskim ciśnieniem w mankiecie kompresyjnym (80% AOP), bądź zbyt krótkim czasem reperfuzji. Czas trwania reperfuzji w badaniu własnym wynosił 1 minutę, podczas gdy w badaniu Salagasa i wsp. (2022) 5 minut, co mogło mieć istotny wpływ na uzyskane wyniki badania własnego. Trybulski i wsp. (2022) również zwrócili uwagę na fakt, że czas trwania reperfuzji może mieć istotne znaczenie podczas stosowania ograniczenia przepływu krwi. Przypuszczenie to potwierdziliśmy w wyniku badań przeprowadzonych w trakcie pisania niniejszej dysertacji (badania w trakcie

publikacji). Czas reperfuzji może być także zależny od wartości ciśnienia oraz czasu ograniczenia przepływu krwi. Jednakże brak dostatecznej ilości badań naukowych na ten temat nie pozwala na dokładniejszą analizę.

Wartość momentu siły mięśniowej uzyskana podczas ćwiczenia wykonywanego w warunkach izokinetycznych może być zależna od prędkości kątowej w stawie (Thorstensson i wsp., 1976). Biorąc pod uwagę wysiłek w warunkach izokinetycznych przy zastosowaniu różnych wartości prędkości kątowych, Huang i wsp. (2020) nie zaobserwowali istotnych zmian w wartości momentów siły (3 powt. 30°/sek.; 3 powt. 150°/sek.; 3 powt. 270°/sek.) w grupie stosującej metodę przedwysiłkowego ograniczenia przepływu krwi (3 serie; 5min BFR; 5 min reperfuzji; 170 mm Hg) względem grupy kontrolnej, co jest zgodne z wynikami badań własnych. Pomimo że w badaniach własnych wykorzystano metodę międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi, to w przypadku pierwszej serii pomiarowej zastosowano jeden przedwysiłkowy cykl BFR. Jednakże nawet niezależna analiza zmian w obrębie tylko pierwszej serii także nie wykazała istotnych różnic pomiędzy interwencjami badawczymi, co jest zgodne z wynikami Huanga i wsp. (2020) ale jednocześnie niezgodnie z rezultatami uzyskanymi przez Paradis-Deschenes i wsp. (2016). Zaobserwowali oni wzrost wartości momentów siły po zastosowaniu metody przedwysiłkowego ograniczenia przepływu krwi (3 serie; 5min BFR; 5 min reperfuzji; 220 mm Hg) przed prostowaniem w stawie kolanowym w warunkach izokinetycznych (20°/sek.) względem grupy kontrolnej. Jednakże należy zwrócić szczególną uwagę na fakt, że badania Paradis-Deschenes i wsp., (2016) wykorzystywały trzy przedwysiłkowe cykle ucisku opaskami kompresyjnymi oraz reperfuzji, co wydaje się być szczególnie istotne, zdecydowanie wyższą wartość ciśnienia 220 mm Hg w stosunku do zastosowanych w badaniach własnych 163 mm Hg (wartość uśredniona). Ponadto, zastosowane przez Paradis-Deschenes i wsp. (2016) ciśnienie ucisku (220 mm Hg) prawdopodobnie całkowicie ograniczało przepływ krwi, co podobnie jak w badaniu Salagasa i wsp. (2022) mogło wywołać efekt wzmocnienia poaktywacyjnego już przed pierwszą serią ćwiczenia. Opisane wyżej zależności sugerują także, że brak istotnych zmian momentów siły w wynikach badań własnych mógł być spowodowany zastosowaniem zbyt niskiego ciśnienia w opasce uciskowej (80% AOP). Dotychczasowe wyniki badań dotyczących wpływu ciśnienia w opasce uciskowej na poziom bezpośrednich zmian kinetycznych, analizowały najczęściej wartości 40 - 80% AOP, ale podczas stosowania mankietów kompresyjnych w trakcie wysiłku. Stosowanie międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi pozwala na zastosowanie wyższych wartości ciśnienia ucisku, nawet do 100% AOP. Dodatkowo, Gepfert

i wsp. (2020) mocno podkreślili w swojej pracy (szczególnie w zakresie analiz zmian mocy mięśniowej) konieczność zastosowania wyższych wartości ciśnienia w opasce uciskowej w kończynach dolnych w porównaniu do kończyn górnych, w celu wywołania korzystnych zmian w wyniku stosowania BFR. Prawdopodobnie zastosowane ciśnienie w mankiecie uciskowym (80% AOP) w połączeniu z krótkim czasem trwania wysiłku, nie było dostatecznie wysokie do wywołania zmian fizjologicznych, zbliżonych do tych, spowodowanych metodą przedwysiłkowego lub metodą ciągłego ograniczenia przepływu krwi, w tym aktywacji receptorów adenozyiny (Liu i wsp., 1991; Lee i wsp., 1996), wzmożenia ekstrakcji tlenu przez mięśnie (Paradis-Deschênes i wsp., 2016; Tanaka i wsp., 2016) oraz uruchomienia kanałów potasowych, które powodują zwiększenie poziomu magazynów energetycznych po niedokrwieniu (Lawson and Downey, 1993; Pang i wsp., 1995). W zależności od metody BFR w obszarze kończyn dolnych, w celu zwiększenia możliwości wysiłkowych lub wywołania wzmożonych reakcji fizjologicznych, dotychczasowo w badaniach wykorzystywano różne wartości ciśnienia w opaskach uciskowych. Loenneke i wsp. (2015) określili, że w celu wywołania wzmożonych reakcji fizjologicznych podczas prostowań w stawie kolanowym z obciążeniem 30% 1RM (metoda ciągłego ograniczenia przepływu krwi), optymalne było ciśnienie w opasce uciskowej o wartości 50% AOP. Wartości 40% oraz 60% AOP, pomimo że różniły się tylko o 10%, to nie powodowały tak korzystnych zmian jak wartość 50% AOP. Z kolei, Fatela i wsp. (2016), najwyższy poziom reakcji fizjologicznych zaobserwowali podczas zastosowania ciśnienia w opasce wynoszące 80% AOP, a wartości niższe 40% i 60% AOP powodowały zmniejszenie poziomu obserwowanych reakcji fizjologicznych. Należy podkreślić, że stosowanie mankietów kompresyjnych podczas wysiłku jest dodatkowo wzmocnione przez wewnątrzmięśniowe ograniczenie przepływu krwi wynikające ze skurczu mięśniowego. W przypadku stosowania BFR w spoczynku pomiędzy wysiłkami, występuje tylko jednoczynnikowe ograniczenie przepływu krwi wywołane opaską uciskową. Dlatego też, w celu wywołania odpowiedniego poziomu reakcji fizjologicznych przy wykorzystaniu mankietów kompresyjnych między wysiłkami, prawdopodobnie należy stosować wyższe wartości ciśnienia ucisku niż zastosowane w procedurze badań własnych ( $163,2 \pm 24$  mmHg; 80% AOP). Przypuszczenie to potwierdzają wyniki Salagasa i wsp. (2022), które wykazały istotny wzrost wartości generowanej mocy mięśniowej po zastosowaniu tylko jednego cyklu BFR wynoszącego 100% AOP. Biorąc pod uwagę podobieństwo metod przedwysiłkowego i międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi (zastosowanie ucisku opasek oraz reperfuzja przed pierwszą serią ćwiczenia) na podstawie dotychczasowych badań naukowych,

można zauważyć, że tylko w sytuacji stosowania wysokiej wartości ciśnienia ucisku uzyskano korzystny wzrost możliwości wysiłkowych. Korzystny efekt wywołany przedwysiłkowym BFR z wartością ciśnienia 220 mm Hg obserwowany był w badaniach Marocolo i wsp. (2016), Chenga i wsp. (2015), de Groota i wsp. (2010), Pattersona i wsp. (2015), a po zastosowaniu wartości ciśnienia 200 mm Hg w badaniach Paradis-Deschenesa i wsp., (2016). Jednakże autorzy wyżej wymienionych eksperymentów zastosowali stałe dla wszystkich badanych wartości ciśnienia w opasce bez uwzględnienia cech indywidualnych, a procedury zakładały stosowanie różnych szerokości opasek (odpowiednio: 21cm; 13cm; 14cm; brak danych), co pod względem metodologicznym jest błędne i nie pozwala na subiektywne określenie poziomu ograniczenia przepływu krwi. Ponadto, analiza dotychczasowych wyników badań wskazuje, że wartość ciśnienia 200 - 220 mm Hg może stanowić równowartość 100% AOP, czyli wartość ciśnienia, która powoduje całkowite zamknięcie przepływu krwi. Biorąc pod uwagę sam czynnik szerokości opaski uciskowej, w przeprowadzonych badaniach zastosowano węższą opaskę uciskową (10.5 cm) w porównaniu do powyższych eksperymentów (21cm; 13cm; 14cm; brak danych), co także ma znaczenie w ocenie wpływu bezwzględnej wartości ciśnienia na poziom zmian kinetycznych. Zgodnie z dotychczasowym stanem wiedzy, węższa opaska uciskowa wymaga wyższego ciśnienia w celu wywołania zbliżonego poziomu ograniczenia przepływu krwi w porównaniu do szerszych opasek. Dlatego zastosowane ciśnienie w opasce uciskowej, które w badaniu własnym wyniosło średnio 163 mm Hg, powodowało zdecydowanie niższy poziom zmniejszenia przepływu krwi względem ciśnienia stosowanego w badaniach Marocolo i wsp. (2016), Cheng i wsp. (2015), de Groot i wsp. (2010), Patterson i wsp. (2015), Paradis-Deschenes (2016) (220 mm Hg, szerokość opaski 14 cm i 13 cm; 200 mm Hg, szerokość opaski 21 cm), a tym samym potencjalnie powodowało niższy poziom reakcji fizjologicznych. Dodatkowo w ostatnim czasie zwrócono uwagę także na punkt czasowy, w którym wykonywany jest pomiar AOP, który stanowi podstawę indywidualnego doboru wartości ciśnienia opaski. W niniejszej dysertacji pomiar minimalnego ciśnienia AOP wykonywany był przed rozgrzewką, podobnie jak miało to miejsce w badaniach Wilk i wsp. (2021a) i Trybulski i wsp. (2022). Na podstawie wyniku pomiaru spoczynkowego AOP wyliczono wartość 80% AOP zastosowaną podczas procedury eksperymentalnej. Jednakże co szczególne istotne podczas realizacji kolejnych badań prowadzonych w trakcie pisania niniejszej dysertacji wraz z zespołem wykazałem, że minimalna wartość ciśnienia powodująca zablokowanie przepływu krwi może ulec zmianie w następstwie przeprowadzenia rozgrzewki czy aktywności fizycznej. Fakt ten nie był brany pod uwagę

zarówno w dotychczasowej literaturze jak i w procedurze niniejszej dysertacji. Zmiany wartości AOP w następstwie wysiłku fizycznego mogły być czynnikiem mającym istotny wpływ na faktyczną wartość ograniczenia przepływu krwi w trakcie kolejnych cykli, co także mogło przyczynić się do niewystąpienia istotnych zmian momentów siły oraz zmian aktywności mięśniowej pomiędzy poszczególnymi interwencjami. Można przypuszczać, że zastosowana wartości 80% AOP wyliczona na podstawie spoczynkowego pomiaru, mogła nie wywoływać faktycznej pożądanej wartości ograniczenia przepływu krwi pomiędzy kolejnymi seriami pomiarowymi. Dodatkowo w trakcie realizacji projektu naukowego pozyskanego z Ministerstwa Sportu i Turystyki pt.: „Ocena wpływu ograniczenia przepływu krwi na poziom mocy mięśniowej u zawodników kadry narodowej w skokach narciarskich” wykazałem, że wartość AOP może ulec zmianie pomiędzy każdą serią wysiłku, co potwierdziło moje wcześniejsze przypuszczenia. Przyczyny tego zjawiska nie są przebadane, jednakże mogą mieć istotny wpływ na wynik badań, ponieważ wartość AOP mierzona w spoczynku, stanowiąca podstawę do obliczania ograniczenia przepływu krwi może nie być tożsama z wartością, która występuje podczas lub pomiędzy różnymi formami wysiłku. Dlatego procedura pomiaru indywidualnego AOP może wymagać zmian zarówno względem punktu czasowego pomiaru jak i rodzaju stosowanego wysiłku, co należy uwzględnić w przyszłych pracach badawczych.

Podsumowując, niezgodny z dotychczasowym stanem wiedzy naukowej brak istotnych zmian parametrów siły mięśniowej w wyniku zastosowania ograniczenia przepływu krwi, potencjalnie ma związek zarówno z czasem trwania wysiłku podczas serii, obszarem mięśniowym poddanym ograniczeniu przepływu krwi, ale także z wartością zastosowanego ciśnienia w opasce uciskowej. Również zastosowane w procedurze eksperymentów parametry treningowe mogły nie być optymalne, aby wywołać efekt wzmocnienia poaktywacyjnego w kolejnych seriach ćwiczenia. Zbyt niska wartość objętości poszczególnych serii ćwiczenia w stosunku do długiego czasu przerwy wypoczynkowej, nie powodowała indukowania reakcji, mogących stanowić podstawę do wywołania zmian analizowanych parametrów kinetycznych. Ponadto brak zmian wartości momentów siły mięśniowej w pierwszej serii wysiłku, mógł wynikać także ze zbyt niskiego ciśnienia w opasce uciskowej (80% AOP), ale także ze zbyt krótkiego czasu trwania reperfuzji (czasu od przerwania ucisku opasek do chwili przystąpienia do ćwiczenia). Warto zaznaczyć, że podczas realizacji sesji eksperymentalnych z wykorzystaniem metody międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi (5min; 1min reperfuzji; 80% AOP), również nie zaobserwowano wystąpienia efektu wzmocnienia poaktywacyjnego. W tym wypadku przyczyną również mogło być zbyt małe ciśnienie w

opasce uciskowej bądź czas reperfuzji, co wymaga dalszych badań. Jednakże należy zwrócić uwagę na fakt, że choć nie zaobserwowano istotnych zmian w momentach siły mięśniowej, to międzywysiłkowe ograniczenie przepływu krwi może przyczynić się do zintensyfikowania procesów metabolicznych i biochemicznych, prowadząc do podwyższonej ekspresji genów związanych z angiogenezą oraz biogenezą mitochondriów, wpływając na tempo regeneracji mięśni i skali zmian hipertroficzych. Te aspekty mogą odgrywać istotną rolę w adaptacji organizmu do wysiłku, jak zaznaczono w pracach Teixeira i wsp. (2018) oraz Torma i wsp. (2021).

#### **4.2. Zmiany poziomu aktywności mięśniowej w wyniku zastosowania metody międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi**

Przeprowadzone badania, oprócz braku istotnych zmian momentu siły mięśniowej, nie wykazały także istotnych zmian w poziomie aktywności mięśniowej pomiędzy badanymi interwencjami, ale także wewnątrz interwencji badawczych (brak istotnych różnic pomiędzy poszczególnymi seriami). Dotychczasowe dane naukowe wskazują na to, że zmiana poziomu aktywności mięśniowej podczas wysiłku z zastosowaniem ograniczenia przepływu krwi, może być zależna przede wszystkim od wartości ciśnienia w opasce uciskowej, czasu trwania BFR, ale także od parametrów treningowych, takich jak stosowane obciążenie zewnętrzne, czas trwania wysiłku, liczba powtórzeń oraz czas trwania przerwy wypoczynkowej. Według badań przeprowadzonych przez Loenneke i wsp. (2015) oraz Fatela i wsp. (2016), wartość zastosowanego ciśnienia w opasce uciskowej ma bezpośredni wpływ na zmiany w poziomie aktywności mięśniowej, jednakże takiej zależności nie zaobserwowano w prowadzonych badaniach. Loenneke i wsp. (2015) wykazali, że aktywność mięśniowa podczas prostowania w stawie kolanowym (20 - 30% 1RM) z ciśnieniem opaski 50 i 60% AOP, powoduje wzrost poziomu aktywności mięśniowej względem ciśnienia 40% AOP, jednocześnie nie zaobserwowano różnic pomiędzy wartościami 50 i 60% AOP. Z kolei Fatela i wsp. (2016) nie wykazali zmian w poziomie aktywności mięśniowej podczas prostowań stawu kolanowego (20% 1RM) między interwencjami, w których zastosowano ciśnienie w opasce uciskowej kolejno 40 i 60% AOP. Dopiero zastosowanie wyższego ciśnienia wynoszącego 80% AOP spowodowało istotny wzrost poziomu aktywności mięśniowej względem pozostałych warunków badawczych (Fatela i wsp., 2016). Niezgodnie z wynikami uzyskanymi przez Loenneke i wsp. (2015) oraz Fatela i wsp. (2016), zastosowanie wysokiego ciśnienia w opasce wynoszącego 80% AOP w opisywanych badaniach własnych nie spowodowało

wzrostu poziomu aktywności mięśniowej mierzonego podczas prostowania w stawie kolanowym w warunkach izokinetycznych. Jednakże należy zwrócić uwagę na fakt, że głównym czynnikiem różnicującym procedurę badań własnych oraz badań Loenneke i wsp. (2015) i Fatela i wsp. (2016) była zastosowana metoda BFR. Procedura badań własnych zakładała stosowanie opaski uciskowej tylko podczas przerwy wypoczynkowej, natomiast podczas wysiłku, w ramach którego był wykonywany pomiar EMG opaski uciskowe były zdjęte. Tym samym, podczas pomiaru aktywności mięśniowej ograniczenie przepływu krwi nie było zastosowane. Z kolei w badaniach Loenneke i wsp. (2015) i Fatela i wsp. (2016) zastosowano mankiety kompresyjne w trakcie wysiłku, podczas którego wykonywany był pomiar aktywności mięśniowej. Jednakże obecnie w literaturze światowej istnieją tylko jedno badania naukowe oceniające wpływ BFR stosowanego w przerwie wysiłkowej na zmiany poziomu aktywności mięśniowej podczas wysiłku (w chwili, gdy ograniczenie przepływu krwi nie jest zastosowane), co potwierdza innowacyjny charakter realizowanego projektu badawczego. Ponadto, brak istotnych zmian poziomu aktywności mięśniowej, obserwowany w badaniach własnych, może wynikać (podobnie jak miało to miejsce w przypadku analizy zmian kinetycznych) także ze stosunkowo krótkiego czasu trwania wysiłku (5 serii; 3 powtórzenia; czas trwania serii ~2.3 sek.; ~1.15-sekundowy czas skurczu koncentrycznego; ~1.15 s) oraz faktu, że wysiłek wykonywany był w warunkach izokinetycznych (180°/sek.). Praca w tych warunkach wymusza maksymalny skurcz mięśniowy bez względu na ustawienie kątowe i prawdopodobnie dodatkowa stymulacja przy wykorzystaniu ucisku opaską kompresyjną przed wykonaniem wysiłku może nie powodować dodatkowej zmiany poziomu aktywności mięśniowej. Ponadto wzrost poziomu aktywności mięśniowej podczas ćwiczeń oporowych zaobserwowany w badaniach Loenneke i wsp. (2015) i Fatela i wsp. (2016) mógł być także związany ze zwiększonym stresem metabolicznym, wynikającym zarówno z zastosowania metody ciągłego ograniczenia przepływu krwi, ale także z faktu, że w ramach tych badań zastosowano wysiłki o zdecydowanie wyższej objętości w porównaniu do badań własnych (wysiłek do odmowy: 30-15-15-15 powtórzeń). W następstwie zwiększonego stresu metabolicznego, aby możliwa była kontynuacja wysiłku, zaangażowana zostaje większa liczba jednostek motorycznych (Loenneke i wsp., 2015; Suga i wsp., 2010; Yasuda i wsp., 2010), co prawdopodobnie nie wystąpiło podczas procedury niniejszej dysertacji. Pomimo że wiele badań wskazuje na zmiany poziomu aktywności mięśniowej w wyniku zastosowania ograniczenia przepływu krwi, to dotychczasowe dane naukowe nie są jednoznaczne. Brak zmiany poziomu aktywności mięśniowej w wyniku zastosowania BFR wykazały badania: Yamada i wsp. (2004) i Teixeira i wsp. (2018), co jest częściowo zgodne z wynikami

niniejszej pracy. Zarówno zastosowanie metody ciągłego jak i międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi podczas wysiłku z wysokim obciążeniem zewnętrznym (70% MVC; 70% 1RM) nie spowodowało wzrostu poziomu aktywności mięśniowej (Yamada i wsp., 2004; Teixeira i wsp., 2018). Należy podkreślić, że skurcz mięśniowy podczas wysiłku z wysokim obciążeniem zewnętrznym może dodatkowo powodować wewnątrzmięśniowe ograniczenie przepływu krwi (wynikające ze skurczu mięśniowego), co może niejako niwelować efekt wywołany opaską uciskową (Teixeira i wsp., 2018; Wilk i wsp., 2021). Zależności pomiędzy wartością poziomu aktywności mięśniowej i wielkością obciążenia zewnętrznego potwierdzono w wielu wcześniejszych badaniach. Gołaś i wsp. (2018) wykazali, że poziom aktywności mięśniowej wzrastał wprost proporcjonalnie do zastosowanego obciążenia zewnętrznego (wyciskanie leżąc 4 serie; 1 powtórzenie; 55% 1RM; 70% 1RM; 85% 1RM; 100% 1RM). Proporcjonalny wzrost poziomu aktywności mięśniowej do rosnącej wartości obciążenia zewnętrznego, związany jest z koniecznością angażowania coraz to większej ilości jednostek motorycznych wykorzystywanych w przeciwdziałaniu oporowi zewnętrznemu. Dodatkowo poziom aktywności mięśniowej jest zależny od rodzaju skurczu mięśniowego (ekscentryczny, koncentryczny, izometryczny). W przypadku skurczu mięśniowego w warunkach izokinetycznych wartość generowanego napięcia mięśniowego jest bliska maksymalnej, podczas całego zakresu ruchu i dalsza stymulacja, w tym przypadku międzywysiłkowym ograniczeniem przepływu krwi, może nie powodować dodatkowego wzrostu poziomu aktywności mięśniowej. Kolejnym czynnikiem mającym wpływ na zmiany w poziomie aktywności mięśniowej podczas ćwiczeń oporowych z BFR (metodą ciągłą i międzywysiłkową) jest liczba stosowanych serii wysiłku. W badaniach przeprowadzonych przez Teixeira i wsp. (2018) zastosowanie ograniczenia przepływu krwi przyczyniło się do wyższego spadku aktywności mięśniowej w kolejnych seriach prostowania w stawie kolanowym (3serie; 8 powtórzeń; 70% 1RM) w porównaniu do warunków kontrolnych. Przedstawione w nich rezultaty są sprzeczne z wynikami uzyskanymi w niniejszej dysertacji. Co istotne, badania własne nie wykazały zarówno różnic zmian poziomu aktywności mięśniowej w kolejnych seriach pomiędzy badanymi interwencjami, ale także istotnych zmian poziomu aktywności mięśniowej pomiędzy poszczególnymi seriami niezależnie w obrębie poszczególnych interwencji. Są one także sprzeczne z wynikami badań Teixeiry i wsp. (2018), w których spadek aktywności mięśniowej obserwowany pomiędzy poszczególnymi seriami mógł wynikać z narastającego zmęczenia, zarówno w wyniku stresu mechanicznego, jak i metabolicznego, co prawdopodobnie nie wystąpiło w procedurze badań własnych. Procedura badawcza realizowana przez Teixeira i wsp. (2018) zakładała

wykonanie 8 powtórzeń w serii, co stanowi około 12 - 20 sekund wysiłku, podczas którego głównym systemem resyntezy ATP jest system glikolityczny. Jego produktem jest między innymi mleczan i  $H^+$  (Teixeira i wsp., 2018; Moghetti i wsp., 2016). Ograniczenie przepływu krwi podczas przerwy wypoczynkowej powoduje wysoki poziom akumulacji metabolitów, który może przyczynić się do hamowania alfa-motoneuronów oraz/lub obniżenia możliwości organizmu do pobudzenia jednostek motorycznych, zakłócając rekrutację jednostek motorycznych oraz obniżając poziom aktywności mięśniowej (Teixeira i wsp., 2018). Natomiast procedura badania własnego zakładała wykonanie wysiłku o czasie trwania około 3 sekund (3 powtórzenia; tylko faza koncentryczna), który przypuszczalnie wykonywany był w strefie fosfagenowej wysiłku, podczas którego nie dochodziło do wytwarzania mleczanu. Dodatkowo różnice między wynikami badań własnych a Teixeira i wsp. (2018) mogą wynikać z czasu przerwy pomiędzy seriami, która w badaniu własnym wynosiła 6.5 minuty podczas gdy w badaniu Teixeira i wsp. (2018) tylko 3 minuty. Zastosowany w badaniach Teixeira i wsp. (2018) dłuższy czas wysiłku w połączeniu z krótszym czasem przerwy mógł powodował większe zużycie substratów energetycznych oraz ze względu na krótszy czas przerwy wypoczynkowej, niepełną resyntezę ATP. W porównaniu do badań Teixeira i wsp. (2018) procedura badań własnych zakładała zastosowanie 6,5-minutowych przerw wypoczynkowych pomiędzy seriami, co umożliwiało pełną resyntezę ATP i fosfokreatyny (Moghetti i wsp., 2016), a co za tym idzie, brak symptomów zmęczenia, co mogło mieć potencjalnie wpływ na brak wystąpienia zmian w poziomie aktywności mięśniowej. Biorąc pod uwagę wcześniej wspomnianą zależność, że im wyższe ciśnienie w opasce uciskowej, tym większy wzrost aktywności mięśniowej (większa akumulacja metabolitów; Loenneke i wsp., 2015; Fatela i wsp., 2016), to wartość ucisku 80% AOP zastosowana w badaniach własnych mogła być zbyt niska w celu wywołania zmian w poziomie aktywności mięśniowej. Szczególnie biorąc pod uwagę fakt, że ograniczenie przepływu krwi stosowane było przed a nie podczas wysiłku i pomiaru aktywności mięśniowej. Tym samym można przypuszczać, że zastosowana procedura badawcza zakładała wykonanie zbyt niskiej objętości wysiłku w stosunku do wartości stosowanego ciśnienia w opasce, aby móc wywołać istotne zmiany poziomu aktywności mięśniowej. Przy tak krótkim czasie trwania wysiłku należałoby rozważyć zastosowanie wyższej wartości ciśnienia, nawet 100% AOP w celu zminimalizowania tlenowych procesów resyntezy ATP. Jednocześnie można także zwrócić uwagę na fakt, że zastosowanie pomiaru izokinetycznego, który niejako wymusza maksymalny skurcz mięśniowy, nie pozwalał na wystąpienie wzrostu aktywności mięśniowej w wyniku międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi, co wymaga dalszych badań w

tym zakresie. Jednakże zbyt mała liczba dotychczasowych danych naukowych analizujących wpływ zastosowania różnych procedur BFR uniemożliwia wskazanie optymalnych wartości ciśnienia w opasce w stosunku do zmiennych, takich jak czas trwania wysiłku, czas przerwy, wartość obciążenia zewnętrznego oraz rodzaj wykonywanego skurczu mięśniowego.

Podsumowując, brak zmian w aktywności mięśniowej w wynikach badań własnych może być zależny od kilku czynników: wartości obciążenia zewnętrznego, objętości wysiłku i czasu przerwy wypoczynkowej oraz ciśnienia w opasce uciskowej. Brak wzrostu poziomu aktywności mięśniowej jest zgodny ze stanem dotychczasowej wiedzy i może wynikać z zaangażowania dużej ilości jednostek motorycznych wymaganych do pokonania obciążenia zewnętrznego, co uniemożliwia zwiększenie poziomu reakcji fizjologicznych dodatkowym BFR. Brak wzrostu poziomu aktywności mięśniowej może także wynikać z wystąpienia samoistnego ograniczenia przepływu krwi w pracującym mięśniu (skurcz mięśni) podczas wysiłku z wysokim obciążeniem zewnętrznym. Natomiast brak spadku poziomu aktywności mięśniowej w kolejnych seriach ćwiczenia w badaniach własnych jest sprzeczny z wynikami jedynych badań, oceniających zmiany aktywności mięśniowej wynikające z zastosowania metody międzywysiłkowego BFR, przeprowadzonych przez Teixeira i wsp. (2018). Brak spadku poziomu aktywności mięśniowej może być spowodowany brakiem wystąpienia zmęczenia w interwencji kontrolnej na skutek zastosowanych parametrów treningowych. Co więcej, dodatkowe zastosowanie metody międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi nie wywołało żadnych istotnych zmian w aktywności mięśniowej. Tak więc można przypuszczać, że zmiany w aktywności mięśniowej w następstwie zastosowania ograniczenia przepływu krwi zależne są od objętości wysiłku oraz przerwy wypoczynkowej. Jednakże biorąc pod uwagę fakt, iż zwiększenie ciśnienia w opasce uciskowej jest równoznaczne ze wzmożeniem reakcji fizjologicznych, to brak zmian w aktywności mięśniowej w prowadzonych badaniach przy zastosowanych parametrach treningowych można też powiązać ze zbyt niskim ciśnieniem ucisku.

## 5. OGRANICZENIA

Pomimo że realizowana procedura badawcza była innowacyjna w skali światowej to należy zwrócić uwagę na występujące ograniczenia. W pracy zastosowano stałą wartość zarówno ciśnienia ograniczenia przepływu krwi jak i czas trwania reperfuzji. Pomimo że zastosowana wartość 80% AOP według wcześniejszych badań korzystnie wpływała na możliwości wysiłkowe to prowadzone badania tego nie potwierdziły. Jednocześnie brak zastosowania innych wartości ograniczenia przepływu krwi zarówno wyższych jak i niższych nie pozwoliła na szerszą ocenę wpływu międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi, co jest istotnym ograniczeniem badania. Podobnie w przypadku czasu trwania reperfuzji. Niedawne badania Trybulski i wsp. (2023) wskazały potencjalny wpływ czasu trwania reperfuzji na efektywność międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi. Potwierdzono to w badaniach realizowanych w ramach projektu naukowego finansowanego przez Ministerstwo Sportu i Turystyki pt.: „Ocena wpływu ograniczenia przepływu krwi na poziom mocy mięśniowej u zawodników kadry narodowej w skokach narciarskich”, którego byłem współwykonawcą. Wstępna analiza danych uzyskanych w ramach realizowanego projektu wykazała korzystny wpływ międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi na prędkość sztangii podczas przysiadów, ale tylko podczas interwencji, w której czas trwania reperfuzji wynosił 60 sekund. Interwencja w ramach, której czas trwania reperfuzji wynosił 30 sekund nie spowodowało korzystnych zmian. Dlatego niezależna ocena wpływu zmian czasu trwania reperfuzji wydaje się być naukowo uzasadniona. Dodatkowo także w trakcie realizacji projektu pozyskanego z Ministerstwo Sportu i Turystyki zaobserwowano zmiany poziomu AOP pomiędzy kolejnymi seriami ćwiczenia, co w połączeniu z obserwacjami o zmianach wartości ciśnienia powodującego całkowite zamknięcie przepływu krwi przed i po rozgrzewce (Bichowska i Fostiak, 2023) pozwala stwierdzić, iż kolejnym ograniczeniem może być sam „moment” określenia AOP. Jednakże w chwili realizacji procedury niniejszej dysertacji nie było dostępnych naukowych danych oceniających wpływ wysiłku oraz czynników z nim związanych na wartość AOP. Wiedza ta nie była dostępna w trakcie planowania i przeprowadzania badań, niemniej jednak jest to ograniczenie, które mogło mieć wpływ na stopień ograniczenia przepływu krwi.

Autorzy sugerują, że zastosowanie ograniczenia przepływu krwi może spowodować wzmocnienie zmian metabolicznych (Hwang i Willoughby, 2017; Teixeira i wsp., 2018; Torma i wsp., 2021; Trybulski i wsp., 2022; Wilk i wsp., 2021a) jednakże w ramach procedury niniejszej dysertacji nie dokonano analizy zmian metabolicznych. Pomimo braku istotnych

zmian momentu siły mięśniowej oraz poziomu aktywności mięśniowej pomiędzy poszczególnymi interwencjami można przypuszczać, że pod wpływem zastosowania ograniczenia przepływu krwi mogły wystąpić istotne zmiany metaboliczne oraz biochemiczne (między innymi zmiany w saturacji mięśni, zwiększenie stężenia mleczanu, zmiany poziomu hormonu wzrostu, insulinopodobnego czynnika wzrostu IGF-1, spadek poziomu ekspresji genu miostatyny).

## 6. DALSZE BADANIA

W celu większego zrozumienia wpływu metody międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi na możliwości wysiłkowe, należy wykonać szereg dalszych badań biorąc pod uwagę wyżej wymienione ograniczenia jak i dodatkowe czynniki. Jednakże w pierwszej kolejności konieczne wydaje się ustalenie wartości ciśnienia (% AOP), które będzie odpowiednie do wywołania pożądanых zmian adaptacyjnych oraz określenie poprawnej procedury samego wyznaczania AOP. W tym celu wraz z zespołem prowadzimy badania nad wpływem różnych wartości ciśnienia ograniczenia przepływu krwi (80% AOP, 100%AOP) zarówno na siłę u moc kończyn dolnych jak i wartości momentów siły w pomiarze izokinetycznym. Wykonywane eksperymenty zawierają także interwencje o różnym czasie trwania reperfuzji. Planowane są także badania nad bezpośrednim wpływem różnych schematów ograniczenia przepływu krwi (różny czas trwania ograniczenia przepływu krwi, oraz reperfuzji) na moc, szybkość, zdolności wytrzymałościowe w grupie wyczynowych sportowców w tym także grupie kobiet. W trakcie badań wykonywane będą pomiary sztywności mięśni (Myoton) oraz saturacji (Moxxy Monitor) mięśni. Dodatkowo należy także poddać ocenie wpływ międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi na zmiany metaboliczne i biochemiczne krwi (kinazę kreatynową, mleczan, testosteron, kortyzol, saturację mięśni). Dopiero po ustaleniu optymalnych parametrów zarówno wysiłku jak i ograniczenia przepływu krwi w celu wywołania pożądanых bezpośrednich zmian adaptacyjnych, należy rozpocząć badania długofalowe. Ocenie powinny podlegać zarówno zmiany w obrębie zdolności motorycznych jak i odpowiedź fizjologiczna i biochemiczna organizmu na wykonywany wysiłek.

## 7. PODSUMOWANIE

W wyniku przeprowadzonych badań nie zaobserwowano istotnych zmian, zarówno w wartościach generowanego momentu siły mięśniowej, jak i poziomie aktywności mięśniowej pomiędzy poszczególnymi interwencjami. Nie zaobserwowano również istotnych zmian momentu siły mięśniowej oraz aktywności mięśniowej pomiędzy kolejnymi seriami, niezależnie w obrębie poszczególnych interwencji (BFR; placebo; kontrolna). Bazując na dostępnych danych naukowych może przypuszczać, że brak istotnych zmian w wyniku zastosowania ograniczenia przepływu krwi, jak zaobserwowano w przedstawionych rezultatach badań, mogło mieć związek przede wszystkim z zastosowaniem zbyt niskiej intensywności treningu oraz niedostatecznej wartości ciśnienia w opasce uciskowej. Potwierdzeniem tego może być fakt, że nie wykazano zarówno istotnych różnic wartości momentów siły, jak i poziomu aktywności mięśniowej pomiędzy poszczególnymi interwencjami, ale także nie wykazano istotnych zmian w obrębie poszczególnych interwencji (pomiędzy seriami 1-5), co częściowo wskazuje na brak wystąpienia symptomów zmęczenia wysiłkowego. Dodatkowo brak istotnych zmian poziomu aktywności mięśniowej mógł także wynikać z faktu, że sam wysiłek w warunkach izokinetycznych (maksymalny skurcz) wymagał zaangażowania pełnej puli jednostek motorycznych i dalsza stymulacja ograniczeniem przepływu krwi, stosowanym tylko w przerwie wypoczynkowej, nie powodowała dodatkowej aktywności nerwowo-mięśniowej. Brak wystąpienia efektu wzmocnienia poaktywacyjnego, a co za tym idzie, brak zmian wartości momentów siły w kolejnych seriach w żadnej z interwencji może wynikać także ze zbyt długiego czasu trwania przerwy wypoczynkowej w stosunku do wartości objętości wysiłku. Jednocześnie można przypuszczać, że w przypadku zastosowania niskiej wartości objętości wysiłku w celu wywołania korzystnych efektów w następstwie zastosowania ograniczenia przepływu krwi należałoby zastosować wyższe wartości ciśnienia w opasce wynoszące nawet 100% AOP. Przedwysiłkowe BFR ciśnieniem w opasce wynoszącym 100% AOP, jak miało to miejsce w badaniach Salagasa i wsp. (2022), spowodowało istotny wzrost mocy mięśniowej podczas wyciskania leżąc już w pierwszej serii ćwiczenia. Biorąc także pod uwagę fakt, że kończyny dolne wymagają wyższego ciśnienia ograniczenia przepływu krwi niż kończyny górne, to zastosowanie wartości 80% AOP, jak miało to miejsce w niniejszej dysertacji mogło być niewystarczające.

## 8. WNIOSKI

Na podstawie zebranych danych dotyczących wpływu międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi na zmiany parametrów siły mięśniowej oraz poziomu aktywności mięśniowej podczas ćwiczeń oporowych, a także analizy wyników badań własnych sformułowano następujące wnioski:

1. Zastosowanie metody międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi nie spowodowało istotnych zmian wartości momentów siły mięśniowej oraz poziomu aktywności mięśniowej podczas prostowań w stawie kolanowym w warunkach izokinetycznych.
2. Liczba cykli ograniczenia przepływu krwi nie ma istotnego wpływu na wielkość zmian wartości momentów siły mięśniowej oraz poziomu aktywności mięśniowej w kolejnych seriach prostowania w stawie kolanowym w warunkach izokinetycznych.
3. Zastosowanie pozorowanego ograniczenia przepływu krwi (20 mm Hg), nie powoduje istotnych zmian wartości momentu siły mięśniowej oraz poziomu aktywności mięśniowej podczas prostowań w stawie kolanowym w warunkach izokinetycznych.

## Streszczenie

**Cel badań:** Celem pracy była ocena wpływu międzywysiłkowego ograniczenia przepływu krwi na możliwości siłowe kończyn dolnych (zmiany wartości momentu siły mięśniowej oraz zmiany poziomu aktywności mięśniowej) podczas prostowań w stawie kolanowym w warunkach izokinetycznych.

**Metody:** W eksperymencie uczestniczyło 20 mężczyzn (wiek  $22.7 \pm 6.7$ ; masa ciała  $83.0 \pm 15.9$ ; wysokość ciała  $180.8 \pm 8.3$ ; 100% AOP  $204.0 \pm 30.1$ ). W odstępie minimum 72 godzin, uczestnicy brali udział w trzech sesjach eksperymentalnych: BFR, podczas której zastosowano międzywysiłkowe ograniczenie przepływu krwi (80% AOP), placebo z wykorzystaniem pozorowanego ograniczenia przepływu krwi (20 mm Hg), kontrolna (bez ograniczenia przepływu krwi). Procedura badawcza zakładała wykonanie 5 serii po 3 powtórzenia wyprostów w stawie kolanowym w warunkach izokinetycznych z prędkością kątową  $180^\circ/\text{sek.}$  z 6,5-minutową przerwą wypoczynkową. W sesji BFR i placebo przed każdą serią prostowań w stawie kolanowym (podczas przerwy wypoczynkowej) stosowano 5-minutowe ograniczenie przepływu krwi (80% AOP lub 20 mm Hg) oraz 1-minutową reperfuzję. Analizę poddano zmiany wartości momentów siły mięśniowej oraz zmiany poziomu aktywności mięśnia prostego uda.

**Wyniki:** Dwuczynnikowa ANOVA dla średniej szczytowych wartości momentów siły mięśniowej nie wykazała istotnie statystycznych różnic ( $p = 0.696$ ;  $\eta^2 = 0.035$ ) dla wyniku analizy interakcji (3 interwencje  $\times$  5 serii) dla wyniku efektu głównego „interwencje” ( $p = 0.489$ ;  $\eta^2 = 0.036$ ) dla wyniku głównego „serii” ( $p = 0.272$ ;  $\eta^2 = 0.064$ ). Dwuczynnikowa ANOVA dla poziomu aktywności mięśniowej nie wykazała istotnie statystycznych różnic ( $p = 0.124$ ;  $\eta^2 = 0.007$ ; tabela 6) dla wyniku analizy interakcji (3 interwencje  $\times$  5 serii) dla wyniku efektu głównego „interwencji” ( $p = 0.836$ ;  $\eta^2 = 0.009$ ) dla wyniku efektu głównego „serii” ( $p = 0.973$ ;  $\eta^2 = 0.006$ ).

**Wnioski:** Międzywysiłkowe ograniczenie przepływu krwi nie powoduje istotnych zmian, zarówno wartości momentu siły mięśniowej, jak i aktywności mięśniowej podczas prostowań w stawie kolanowym w warunkach izokinetycznych.

**Słowa kluczowe:** BFR, sEMG, moment siły mięśniowej, aktywność mięśniowa, trening oporowy

## Summary

**Aim of the study:** The aim of the study was to evaluate the impact of the ischemic intra-conditioning (5min; 1 min reperfusion; 80% AOP) on the lower limb strength performance (torque and muscle activity) during isokinetic leg extensions.

**Methods:** 20 men participated in the experiment (age  $22.7 \pm 6.7$ ; body mass  $83.0 \pm 15.9$ ; body height  $180.8 \pm 8.3$ ; 100% AOP  $204.0 \pm 30.1$ ). With a minimum 72-hour interval, participants took part in three experimental sessions: BFR - with blood flow restriction (80% AOP), placebo - with simulated blood flow restriction (20 mm Hg), and control – without blood flow restriction. The research procedure involved performing 5 sets of 3 repetitions of isokinetic knee extension at an angular velocity of  $180^\circ/\text{sek.}$  with a 6.5-minute rest interval. In the BFR and placebo sessions, before each set of knee extensions (during the rest interval), a 5-minute blood flow restriction (80% AOP or 20 mm Hg) was applied, followed by a 1-minute reperfusion. The analysis included changes in muscle strength moment values and changes in the activity level of the quadriceps muscle.

**Results:** The two-way repeated measures ANOVA did not show a statistically significant interaction effect for torque ( $p = 0.696$ ;  $\eta^2 = 0.035$ ) as well as did not show main effect of condition ( $p = 0.489$ ;  $\eta^2 = 0.036$ ) and did not show main effect of set ( $p = 0.272$ ;  $\eta^2 = 0.064$ ). The two-way repeated measures ANOVA did not show a statistically significant interaction effect for muscle activity ( $p = 0.124$ ;  $\eta^2 = 0.007$ ) as well as did not show main effect of condition ( $p = 0.836$ ;  $\eta^2 = 0.009$ ) and did not show main effect of set ( $p = 0.973$ ;  $\eta^2 = 0.006$ ).

**Conclusions:** The ischemic intra-conditioning doesn't cause significant changes in both muscle torque and muscle activity during isokinetic knee extensions.

**Key words:** BFR, sEMG, torque, muscle activity, resistance training

## Bibliografia

1. Abe, T., DeHoyos, D. V., Pollock, M. L., & Garzarella, L. (2000). Time course for strength and muscle thickness changes following upper and lower body resistance training in men and women. *European journal of applied physiology*, 81, 174-180.
2. Abe, T., Hinata, S., Koizumi, K., & Sato, Y. (2005). Day-to-day change in muscle strength and MRI-measured skeletal muscle size during 7 days KAATSU resistance training: A case study. *International Journal of KAATSU Training Research*, 1(2), 71-76.
3. Ahmadi, S., & Uchida, M. (2021). Place of the gold standard isokinetic dynamometer in Paralympic sports: a systematic review. *Human Movement*, 22(3), 1-10. <https://doi.org/10.5114/hm.2021.100319>
4. Anderson, T., & Kearney, J. T. (1982). Effects of Three Resistance Training Programs on Muscular Strength And Absolute and Relative Endurance. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 53(1), 1–7. doi:10.1080/02701367.1982.10605218
5. Andreas, M., Schmid, A. I., Keilani, M., Doberer, D., Bartko, J., Crevenna, R., ... & Wolzt, M. (2011). Effect of ischemic preconditioning in skeletal muscle measured by functional magnetic resonance imaging and spectroscopy: a randomized crossover trial. *Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance*, 13(1), 1-10.
6. Bichowska, M., & Fostiak, K. (2023). The effect of warm-up on determining the pressure differences necessary to obtain arterial occlusion pressure (AOP). 28th Annual Congress of the European College Of Sport Science, Paris, France
7. Barbosa, T. C., Machado, A. C., Braz, I. D., Fernandes, I. A., Vianna, L. C., Nobrega, A. C. L., & Silva, B. M. (2015). Remote ischemic preconditioning delays fatigue development during handgrip exercise. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 25(3), 356-364.
8. Behringer, M., Heinke, L., Leyendecker, J., & Mester, J. (2017). Effects of blood flow restriction during moderate-intensity eccentric knee extensions. *The Journal of Physiological Sciences*, 68(5), 589–599. doi:10.1007/s12576-017-0568-2.
9. Bezerra de Moraes, A. T., Santos Cerqueira, M., Moreira Sales, R., Rocha, T., & Galvão de Moura Filho, A. (2017). Upper limbs total occlusion pressure assessment: Doppler ultrasound reproducibility and determination of predictive variables. *Clinical physiology and functional imaging*, 37(4), 437-441.

10. Bird S. P., Tarpenning K. M., & Marino F. E. (2005). Designing Resistance Training Programmes to Enhance Muscular Fitness. *Sports Medicine*, 35(10), 841–851. doi:10.2165/00007256-200535100-00002.
11. Bogdanis, G. C., Nevill, M. E., Lakomy, H. K. A., & Boobis, L. H. (1998). Power output and muscle metabolism during and following recovery from 10 and 20 s of maximal sprint exercise in humans. *Acta Physiologica Scandinavica*, 163(3), 261-272.
12. Brandner, C. R., & Warmington, S. A. (2017). Delayed onset muscle soreness and perceived exertion after blood flow restriction exercise. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 31(11), 3101-3108.
13. Brucklacher, R. M., Vannucci, R. C., & Vannucci, S. J. (2002). Hypoxic preconditioning increases brain glycogen and delays energy depletion from hypoxia-ischemia in the immature rat. *Developmental neuroscience*, 24(5), 411-417.
14. Centner, C., Lauber, B., Seynnes, O. R., Jerger, S., Sohnius, T., Gollhofer, A., & König, D. (2019). Low-load blood flow restriction training induces similar morphological and mechanical Achilles tendon adaptations compared with high-load resistance training. *Journal of Applied Physiology*, 127(6), 1660-1667.
15. Chaouachi, A., Poulos, N., Abed, F., Turki, O., Brughelli, M., Chamari, K., ... Behm, D. G. (2011). Volume, intensity, and timing of muscle power potentiation are variable. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 36(5), 736–747. doi:10.1139/h11-079
16. Cheng, C. F., Kuo, Y. H., Hsu, W. C., Chen, C., & Pan, C. H. (2021). Local and remote ischemic preconditioning improves sprint interval exercise performance in team sport athletes. *International journal of environmental research and public health*, 18(20), 10653.
17. Cifrek, M., Medved, V., Tonković, S., & Ostojić, S. (2009). Surface EMG based muscle fatigue evaluation in biomechanics. *Clinical Biomechanics*, 24(4), 327–340. doi:10.1016/j.clinbiomech.2009.01.010
18. Coffey, V. G., & Hawley, J. A. (2007). The Molecular Bases of Training Adaptation. *Sports Medicine*, 37(9), 737–763. doi:10.2165/00007256-200737090-00001.
19. Cook, C. J., Kilduff, L. P., & Beaven, C. M. (2014). Improving strength and power in trained athletes with 3 weeks of occlusion training. *International journal of sports physiology and performance*, 9(1), 166-172.
20. Cook, S. B., Murphy, B. G., & Labarbera, K. E. (2013). Neuromuscular function after a bout of low-load blood flow-restricted exercise. *Medicine and science in sports and exercise*, 45(1), 67-74.

21. Dave, K. R., Saul, I., Busto, R., Ginsberg, M. D., Sick, T. J., & Pérez-Pinzón, M. A. (2001). Ischemic preconditioning preserves mitochondrial function after global cerebral ischemia in rat hippocampus. *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*, 21(12), 1401-1410.
22. Dawson, B., Goodman, C., Lawrence, S., Preen, D., Polglaze, T., Fitzsimons, M., & Fournier, P. (1997). Muscle phosphocreatine repletion following single and repeated short sprint efforts. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 7(4), 206-213.
23. de Groot, P. C., Thijssen, D. H., Sanchez, M., Ellenkamp, R., & Hopman, M. T. (2010). Ischemic preconditioning improves maximal performance in humans. *European journal of applied physiology*, 108, 141-146.
24. de Souza Pfeiffer, P., Cirilo-Sousa, M., & Santos, H. (2019). Effects of Different Percentages of Blood Flow Restriction on Energy Expenditure. *International Journal of Sports Medicine*. doi:10.1055/a-0828-8295.
25. Deschenes, M. (1989). Short review: Rate coding motor unit recruitment patterns. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 3(2), 34-39.
26. Domingos, E., & Polito, M. D. (2018). Blood pressure response between resistance exercise with and without blood flow restriction: A systematic review and meta-analysis. *Life Sciences*, 209, 122–131. doi:10.1016/j.lfs.2018.08.006
27. Ellefsen, S., Hammarström, D., Strand, T. A., Zacharoff, E., Whist, J. E., Rauk, I., ... & Rønnestad, B. R. (2015). Blood flow-restricted strength training displays high functional and biological efficacy in women: a within-subject comparison with high-load strength training. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 309(7), R767-R779.
28. Enko, K., Nakamura, K., Yunoki, K., Miyoshi, T., Akagi, S., Yoshida, M., ... & Ito, H. (2011). Intermittent arm ischemia induces vasodilatation of the contralateral upper limb. *The journal of physiological sciences*, 61, 507-513.
29. Evans, C., Vance, S., & Brown, M. (2010). Short-term resistance training with blood flow restriction enhances microvascular filtration capacity of human calf muscles. *Journal of Sports Sciences*, 28(9), 999–1007. doi:10.1080/02640414.2010.485647
30. Fahs, C. A., Loenneke, J. P., Rossow, L. M., Tiebaud, R. S., & Bemben, M. G. (2012). Methodological considerations for blood flow restricted resistance exercise. *Journal of Trainology*, 1(1), 14-22.
31. Fatela, P., Reis, J. F., Mendonca, G. V., Avela, J., & Mil-Homens, P. (2016). Acute effects of exercise under different levels of blood-flow restriction on muscle activation and

fatigue. *European Journal of Applied Physiology*, 116(5), 985–995. doi:10.1007/s00421-016-3359-1.

32. Fitschen, P. J., Kistler, B. M., Jeong, J. H., Chung, H. R., Wu, P. T., Walsh, M. J., & Wilund, K. R. (2014). Perceptual effects and efficacy of intermittent or continuous blood flow restriction resistance training. *Clinical Physiology and Functional Imaging*, 34(5), 356–363. doi:10.1111/cpf.12100

33. Fleck, S. J., Kraemer, W. (2014). *Designing resistance training programs*, 4E. Human Kinetics.

34. Folland, J. P., & Williams, A. G. (2007). The Adaptations to Strength Training. *Sports Medicine*, 37(2), 145–168. doi:10.2165/00007256-200737020-00004.

35. Foster, G. P., Westerdahl, D. E., Foster, L. A., Hsu, J. V., & Anholm, J. D. (2011). Ischemic preconditioning of the lower extremity attenuates the normal hypoxic increase in pulmonary artery systolic pressure. *Respiratory physiology & neurobiology*, 179(2-3), 248-253.

36. Fostiak, K., Bichowska, M., Trybulski, R., Trabka, B., Krzysztofik, M., Rolnick, N., ... & Wilk, M. (2022). Acute Effects of Ischemic Intra-Conditioning on 30 m Sprint Performance. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(19), 12633.

37. Fostiak, M., Maćkała, K., Kowalski, P. (2015). Trening siły i mocy w lekkoatletycznych konkurencjach biegowych. *Wyższa Szkoła Sportowa w Łodzi*, s. 73 – 82.

38. Fujita, S., Abe, T., Drummond, M. J., Cadenas, J. G., Dreyer, H. C., Sato, Y., ... & Rasmussen, B. B. (2007). Blood flow restriction during low-intensity resistance exercise increases S6K1 phosphorylation and muscle protein synthesis. *Journal of applied physiology*, 103(3), 903-910.

39. Fujita, T. W. F. B., Brechue, W., Kurita, K., Sato, Y., & Abe, T. (2008). Increased muscle volume and strength following six days of low-intensity resistance training with restricted muscle blood flow. *International Journal of KAATSU Training Research*, 4(1), 1-8.

40. Gepfert, M., Krzysztofik, M., Kostrzewa, M., Jarosz, J., Trybulski, R., Zając, A., & Wilk, M. (2020). The acute impact of external compression on back squat performance in competitive athletes. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(13), 4674.

41. Gołaś, A., Maszczyk, A., Pietraszewski, P., Wilk, M., Stastny, P., Strońska, K., Studencki, M., & Zając, A. (2018). Muscular activity patterns of female and male athletes

- during the flatbench press. *Biology of Sport*, 35(2), 175–179.  
<https://doi.org/10.5114/biolsport.2018.74193>
42. Gossen, E. R., & Sale, D. G. (2000). Effect of postactivation potentiation on dynamic knee extension performance. *European Journal of Applied Physiology*, 83(6), 524–530. doi:10.1007/s004210000304
  43. Held, S., Rappelt, L., Deutsch, J. P., Rein, R., Wiedenmann, T., Schiffer, A., Bieder, A., Staub I., i Donath, L. (2023). Low-intensity swimming with blood flow restriction over 5 weeks increases VO2peak: A randomized controlled trial using Bayesian informative prior distribution. *European Journal of Sport Science*, 1-7. doi: 10.1080/17461391.2023.2180671
  44. Hermens, H. J., Freriks, B., Merletti, R., Stegeman, D., Blok, J., Rau, G., ... & Hägg, G. (1999). European recommendations for surface electromyography. *Roessingh research and development*, 8(2), 13-54.
  45. Hollander, D. B., Durand, R. J., Trynicki, J. L., Larock, D., Castracane, V. D., Hebert, E. P., i Kraemer, R. R. (2003). RPE, pain, and physiological adjustment to concentric and eccentric contractions. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 35(6), 1017–1025.
  46. Huang, B.-H., Wang, T.-Y., Lu, K.-H., Chang, C.-Y., & Chan, K.-H. (2020). Effects of ischemic preconditioning on local hemodynamics and isokinetic muscular function. *Isokinetics and Exercise Science*, 1–9. doi:10.3233/ies-194184
  47. Hudlicka, O., & Brown, M. D. (2009). Adaptation of Skeletal Muscle Microvasculature to Increased or Decreased Blood Flow: Role of Shear Stress, Nitric Oxide and Vascular Endothelial Growth Factor. *Journal of Vascular Research*, 46(5), 504–512. doi:10.1159/000226127
  48. Hughes, L., Jeffries, O., Waldron, M., Rosenblatt, B., Gissane, C., Paton, B., & Patterson, S. D. (2018). Influence and reliability of lower-limb arterial occlusion pressure at different body positions. *PeerJ*, 6, e4697. doi:10.7717/peerj.4697
  49. Hughes, L., Paton, B., Rosenblatt, B., Gissane, C., & Patterson, S. D. (2017). Blood flow restriction training in clinical musculoskeletal rehabilitation: a systematic review and meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine*, 51(13), 1003–1011.
  50. Hunt, J. E. A., Stodart, C., & Ferguson, R. A. (2016). The influence of participant characteristics on the relationship between cuff pressure and level of blood flow restriction. *European Journal of Applied Physiology*, 116(7), 1421–1432. doi:10.1007/s00421-016-3399-6

51. Hwang, P., & Willoughby, D. S. (2017). Mechanisms Behind Blood Flow Restricted Training and its Effect Towards Muscle Growth. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 1. doi:10.1519/jsc.0000000000002384
52. Jarosz, J., Trybulski, R., Krzysztofik, M., Tsoukos, A., Filip-Stachnik, A., Zajac, A., Bogdanis, G., Wilk, M. (2021) The Effects of Ischemia During Rest Intervals on Bar Velocity in the Bench Press Exercise With Different External Load. *Frontiers in Physiology*, 12, 715096. doi:10.3389/fphys.2021.715096
53. Jenkins, N. D. M., Housh, T. J., Buckner, S. L., Bergstrom, H. C., Cochrane, K. C., Hill, E. C., ... Cramer, J. T. (2016). Neuromuscular Adaptations After 2 and 4 Weeks of 80% Versus 30% 1 Repetition Maximum Resistance Training to Failure. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(8), 2174–2185. doi:10.1519/jsc.0000000000001308
54. Kacin, A., & Strazar, K. (2011). Frequent low-load ischemic resistance exercise to failure enhances muscle oxygen delivery and endurance capacity. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 21(6), e231-e241.
55. Karanasios, S., Koutri, C., Moutzouri, M., Xergia, S. A., Sakellari, V., & Gioftsos, G. (2022). The effect of body position and the reliability of upper limb arterial occlusion pressure using a handheld doppler ultrasound for blood flow restriction training. *Sports Health*, 14(5), 717-724.
56. Kimura, M., Ueda, K., Goto, C., Jitsuiki, D., Nishioka, K., Umemura, T., ... & Higashi, Y. (2007). Repetition of ischemic preconditioning augments endothelium-dependent vasodilation in humans: role of endothelium-derived nitric oxide and endothelial progenitor cells. *Arteriosclerosis, thrombosis, and vascular biology*, 27(6), 1403-1410.
57. Komi, P. (Ed.). (2008). *Strength and power in sport*. John Wiley & Sons.
58. Kraus, S., Pasha, E. P., Machin, D. R., Alkatan, M., Kloner, R. A., Tanaka, H. (2015). Bilateral Upper Limb Remote Ischemic Preconditioning Improves Anaerobic Power. *The Open Sports Medicine Journal*, 9, 1-6
59. Krzysztofik, M., & Wilk, M. (2020a). The effects of plyometric conditioning on post-activation bench press performance. *Journal of Human Kinetics*, 74, 99.
60. Krzysztofik, M., Wilk, M., Gołaś, A., Lockie, R. G., Maszczyk, A., & Zajac, A. (2019). Does Eccentric-Only And Concentric-Only Activation Increase Power Output? *Medicine & Science In Sports & Exercise*, 52(2), 484–489. doi:10.1249/Mss.0000000000002131

61. Krzysztofik, M., Wilk, M., Gołaś, A., Lockie, R. G., Maszczyk, A., & Zając, A. (2020b). Does eccentric-only and concentric-only activation increase power output?. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 52(2), 484-489.
62. Krzysztofik, M., Wilk, M., Lockie, R. G., Gołaś, A., Zając, A., & Bogdanis, G. C. (2022b). Postactivation performance enhancement of concentric bench press throw after eccentric-only conditioning exercise. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 36(8), 2077-2081.
63. Krzysztofik, M., Wilk, M., Stastny, P., & Gołaś, A. (2021). Post-activation performance enhancement in the bench press throw: A systematic review and meta-analysis. *Frontiers in Physiology*, 11, 598628.
64. Krzysztofik, M., Wilk, M., Wojdała, G., & Gołaś, A. (2019). Maximizing Muscle Hypertrophy: A Systematic Review of Advanced Resistance Training Techniques and Methods. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(24), 4897. doi:10.3390/ijerph16244897.
65. Lacio, M., Vieira J. G., Trybulski R., Campos, Y., Santana D., Filho J. E., Novaes J., Vianna J., & Wilk M. (2021). Effects of Resistance Training Performed with Different Loads in Untrained and Trained Male Adult Individuals on Maximal Strength and Muscle Hypertrophy: A Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(21), 11237. <https://doi.org/10.3390/ijerph182111237>.
66. Lasevicius T., Schoenfeld B. J., Silva-Batista C., Barros T. de S., Aihara A. Y., Brendon H., ... Teixeira E. L. (2019). Muscle Failure Promotes Greater Muscle Hypertrophy in Low-Load but Not in High-Load Resistance Training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 1. doi:10.1519/jsc.0000000000003454.
67. Lasevicius, T., Ugrinowitsch, C., Schoenfeld, B. J., Roschel, H., Tavares, L. D., De Souza, E. O., ... Tricoli, V. (2018). Effects of different intensities of resistance training with equated volume load on muscle strength and hypertrophy. *European Journal of Sport Science*, 18(6), 772–780. doi:10.1080/17461391.2018.1450898
68. Laurentino, G. C., Loenneke, J. P., Mouser, J. G., Buckner, S. L., Counts, B. R., Dankel, S. J., ... Tricoli, V. (2020). Validity of the Handheld Doppler to Determine Lower-Limb Blood Flow Restriction Pressure for Exercise Protocols. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 1. doi:10.1519/jsc.0000000000002665
69. Laurentino, G. C., Ugrinowitsch, C., Roschel, H., Aoki, M. S., Soares, A. G., Neves, M., ... Tricoli, V. (2012). Strength Training with Blood Flow Restriction Diminishes

- Myostatin Gene Expression. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 44(3), 406–412. doi:10.1249/mss.0b013e318233b4bc
70. Lawson, C. S., & Downey, J. M. (1993). Preconditioning: state of the art myocardial protection. *Cardiovascular research*, 27(4), 542-550.
71. Lee, H. T., Schroeder Jr, C. A., Shah, P. M., Babu, S. C., Thompson, C. I., & Belloni, F. L. (1996). Preconditioning with ischemia or adenosine protects skeletal muscle from ischemic tissue reperfusion injury. *Journal of Surgical Research*, 63(1), 29-34.
72. Li, X. D., Cheng, Y. T., Yang, Y. J., Meng, X. M., Zhao, J. L., Zhang, H. T., ... & Wu, Y. L. (2012). PKA-mediated eNOS phosphorylation in the protection of ischemic preconditioning against no-reflow. *Microvascular Research*, 84(1), 44-54.
73. Lintz, J. A., Dalio, M. B., Joviliano, E. E., & Piccinato, C. E. (2013). Ischemic pre and postconditioning in skeletal muscle injury produced by ischemia and reperfusion in rats. *Acta Cirurgica Brasileira*, 28, 441-446.
74. Lisee, C., Birchmeier, T., Yan, A., & Kuenze, C. (2019). Associations between isometric quadriceps strength characteristics, knee flexion angles, and knee extension moments during single leg step down and landing tasks after anterior cruciate ligament reconstruction. *Clinical Biomechanics*, 70, 231–236. doi:10.1016/j.clinbiomech.2019.10.012
75. Liu, G. S., Thornton, J., Van Winkle, D. M., Stanley, A. W., Olsson, R. A., & Downey, J. M. (1991). Protection against infarction afforded by preconditioning is mediated by A1 adenosine receptors in rabbit heart. *Circulation*, 84(1), 350-356.
76. Loenneke, J. P., Fahs, C. A., Rossow, L. M., Abe, T., & Bembien, M. G. (2012). The anabolic benefits of venous blood flow restriction training may be induced by muscle cell swelling. *Medical Hypotheses*, 78(1), 151–154. doi:10.1016/j.mehy.2011.10.014
77. Loenneke, J. P., Fahs, C. A., Rossow, L. M., Sherk, V. D., Thiebaud, R. S., Abe, T., Bembien D. A., Bembien, M. G. (2011a). Effects of cuff width on arterial occlusion: implications for blood flow restricted exercise. *European Journal of Applied Physiology*, 112(8), 2903–2912.
78. Loenneke, J. P., Fahs, C. A., Wilson, J. M., & Bembien, M. G. (2011b). Blood flow restriction: the metabolite/volume threshold theory. *Medical hypotheses*, 77(5), 748-752.
79. Loenneke, J. P., Kim, D., Fahs, C. A., Thiebaud, R. S., Abe, T., Larson, R. D., ... & Bembien, M. G. (2015). Effects of exercise with and without different degrees of blood flow restriction on torque and muscle activation. *Muscle & nerve*, 51(5), 713-721.
80. Loenneke, J. P., Allen, K. M., Mouser, J. G., Thiebaud, R. S., Kim, D., Abe, T., & Bembien, M. G. (2014a). Blood flow restriction in the upper and lower limbs is predicted by

- limb circumference and systolic blood pressure. *European Journal of Applied Physiology*, 115(2), 397–405. doi:10.1007/s00421-014-3030-7
81. Loenneke, J. P., Thiebaud, R. S., & Abe, T. (2014b). Does blood flow restriction result in skeletal muscle damage? A critical review of available evidence. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 24(6), e415-422.
  82. Lopes, C. R., Aoki, M. S., Crisp, A. H., de Mattos, R. S., Lins, M. A., da Mota, G. R., ... & Marchetti, P. H. (2017). The effect of different resistance training load schemes on strength and body composition in trained men. *Journal of human kinetics*, 58, 177.
  83. Madarame, H., Sasaki, K., & Ishii, N. (2010). Endocrine responses to upper-and lower-limb resistance exercises with blood flow restriction. *Acta Physiologica Hungarica*, 97(2), 192-200.
  84. Manimmanakorn, A., Manimmanakorn, N., Taylor, R., Draper, N., Billaut, F., Shearman, J. P., & Hamlin, M. J. (2013). Effects of resistance training combined with vascular occlusion or hypoxia on neuromuscular function in athletes. *European journal of applied physiology*, 113, 1767-1774.
  85. Manini, T. M., Yarrow, J. F., Buford, T. W., Clark, B. C., Conover, C. F., & Borst, S. E. (2012). Growth hormone responses to acute resistance exercise with vascular restriction in young and old men. *Growth Hormone & IGF Research*, 22(5), 167-172.
  86. Marocolo, M., Willardson, J. M., Marocolo, I. C., da Mota, G. R., Simão, R., & Maior, A. S. (2016). Ischemic preconditioning and placebo intervention improves resistance exercise performance. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 30(5), 1462-1469.
  87. McEwen, J. A., Owens, J. G., & Jeyasurya, J. (2019). Why is it crucial to use personalized occlusion pressures in blood flow restriction (BFR) rehabilitation?. *Journal of Medical and Biological Engineering*, 39, 173-177.
  88. Merletti, R., & Di Torino, P. J. J. E. K. (1999). Standards for reporting EMG data. *J Electromyogr Kinesiol*, 9(1), 3-4.
  89. Mieszkowski, J., Kochanowicz, M., Żychowska, M., Kochanowicz, A., Grzybkowska, A., Anczykowska, K., ... Antosiewicz, J. (2019). Ferritin Genes Overexpression in PBMC and a Rise in Exercise Performance as an Adaptive Response to Ischaemic Preconditioning in Young Men. *BioMed Research International*, 2019, 1–9. doi:10.1155/2019/9576876
  90. Mieszkowski, J., Stankiewicz, B., Kochanowicz, A., Niespodziński, B., Borkowska, A., & Antosiewicz, J. (2020). Effect of Ischemic Preconditioning on Marathon-Induced Changes in Serum Exerkine Levels and Inflammation. *Frontiers in Physiology*, 11. doi:10.3389/fphys.2020.571220

91. Moghetti, P., Bacchi, E., Brangani, C., Donà, S., & Negri, C. (2016). Metabolic Effects of Exercise. *Sports Endocrinology*, 44–57. doi:10.1159/000445156
92. Murry, C. E., Richard, V. J., Reimer, K. A., & Jennings, R. B. (1990). Ischemic preconditioning slows energy metabolism and delays ultrastructural damage during a sustained ischemic episode. *Circulation research*, 66(4), 913-931.
93. Neto, G. R., da Silva, J. C. G., Freitas, L., da Silva, H. G., Caldas, D., da Silva Novaes, J., & Cirilo-Sousa, M. S. (2019). Effects of strength training with continuous or intermittent blood flow restriction on the hypertrophy, muscular strength and endurance of men. *Acta Scientiarum. Health Sciences*, 41, 42273.
94. Neto, G. R., Novaes, J. S., Salerno, V. P., Gonçalves, M. M., Piazeria, B. K., Rodrigues-Rodrigues, T., & Cirilo-Sousa, M. S. (2017). Acute effects of resistance exercise with continuous and intermittent blood flow restriction on hemodynamic measurements and perceived exertion. *Perceptual and motor skills*, 124(1), 277-292.
95. Nielsen, J. L., Aagaard, P., Bech, R. D., Nygaard, T., Hvid, L. G., Wernbom, M., ... & Frandsen, U. (2012). Proliferation of myogenic stem cells in human skeletal muscle in response to low-load resistance training with blood flow restriction. *The Journal of physiology*, 590(17), 4351-4361.
96. Nordander, C., Willner, J., Hansson, G., Larsson, B., Unge, J., Granquist, L., & Skerfving, S. (2003). Influence of the subcutaneous fat layer, as measured by ultrasound, skinfold calipers and BMI, on the EMG amplitude. *European Journal of Applied Physiology*, 89(6), 514–519. doi:10.1007/s00421-003-0819-1
97. Norrbrand L., Fluckey J. D., Pozzo M., & Tesch P. A. (2007). Resistance training using eccentric overload induces early adaptations in skeletal muscle size. *European Journal of Applied Physiology*, 102(3), 271–281. doi:10.1007/s00421-007-0583-8.
98. Nóbrega, S. R., Ugrinowitsch, C., Pintanel, L., Barcelos, C., & Libardi, C. A. (2018). Effect of Resistance Training to Muscle Failure vs. Volitional Interruption at High- and Low- Intensities on Muscle Mass and Strength. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 32(1), 162–169. doi:10.1519/jsc.0000000000001787
99. Paganelli, W., Pendergast, D. R., Koness, J., & Cerretelli, P. (1989). The effect of decreased muscle energy stores on the VO<sub>2</sub> kinetics at the onset of exercisekinetics at the onset of exercise. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 59, 321-326.

100. Pang, C. Y., Yang, R. Z., Zhong, A., Xu, N., Boyd, B., & Forrest, C. R. (1995). Acute ischaemic preconditioning protects against skeletal muscle infarction in the pig. *Cardiovascular research*, 29(6), 782-788.
101. Paradis-Deschenes, P., Joanisse, D. R., & Billaut, F. (2016). Ischemic preconditioning increases muscle perfusion, oxygen uptake, and force in strength-trained athletes. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 41(9), 938-944.
102. Paton, C. D., Addis, S. M., & Taylor, L.-A. (2017). The effects of muscle blood flow restriction during running training on measures of aerobic capacity and run time to exhaustion. *European Journal of Applied Physiology*, 117(12), 2579–2585. doi:10.1007/s00421-017-3745-3
103. Patterson, S. D., Bezodis, N. E., Glaister, M., & Pattison, J. R. (2015). The effect of ischemic preconditioning on repeated sprint cycling performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 47(8), 1652-1658.
104. Pauletto, B. (1991). *Strength training for coaches*. Human Kinetics Publishers.
105. Pauletto, B. (1994). *Strength training for basketball*. Human Kinetics.
106. Pearson, S. J., & Hussain, S. R. (2015). A review on the mechanisms of blood-flow restriction resistance training-induced muscle hypertrophy. *Sports medicine*, 45, 187-200.
107. Rawska, M., Gepfert, M., Mostowik, A., Krzysztofik, M., Wojdala, G., Lulinska, A., et al. (2019). Does blood flow restriction influence the maximal number of repetitions performed during the bench press? A pilot study. *Baltic Journal of Health and Physical Activity* 11, 9–17.
108. Rossow, L. M., Fahs, C. A., Loenneke, J. P., Thiebaud, R. S., Sherk, V. D., Abe, T., & Bemben, M. G. (2012). Cardiovascular and perceptual responses to blood-flow-restricted resistance exercise with differing restrictive cuffs. *Clinical Physiology and Functional Imaging*, 32(5), 331–337. doi:10.1111/j.1475-097x.2012.01131.x
109. Rotto, D. M., & Kaufman, M. P. (1988). Effect of metabolic products of muscular contraction on discharge of group III and IV afferents. *Journal of applied physiology*, 64(6), 2306-2313.
110. Sabino-Carvalho, J. L., Lopes, T. R., Obeid-Freitas, T., Ferreira, T. N., Succì, J. E., Silva, A. C., & Silva, B. M. (2017). Effect of ischemic preconditioning on endurance performance does not surpass placebo. *Med Sci Sports Exerc*, 49(1), 124-32.
111. Salagas, A., Tsoukos, A., Terzis G., Paschalis, V., Katsikas, C., Krzysztofik, M., Wilk, M., Zajac, A., Bogdanis, G. C. Effectiveness of either short-duration ischemic pre-

conditioning, single-set high-resistance exercise, or their combination in potentiating bench press exercise performance. *Front Physiol.* 2022 Dec 15;13:1083299.

112. Schoenfeld, B. J., Peterson, M. D., Ogborn, D., Contreras, B., & Sonmez, G. T. (2015). Effects of Low- vs. High-Load Resistance Training on Muscle Strength and Hypertrophy in Well-Trained Men. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 29(10), 2954–2963. doi:10.1519/jsc.0000000000000958

113. Seitz, L. B., & Haff, G. G. (2016). Factors Modulating Post-Activation Potentiation of Jump, Sprint, Throw, and Upper-Body Ballistic Performances: A Systematic Review with Meta-Analysis. *Sports Medicine*, 46(2), 231–240.

114. Seynnes, O. R., de Boer, M., & Narici, M. V. (2007). Early skeletal muscle hypertrophy and architectural changes in response to high-intensity resistance training. *Journal of Applied Physiology*, 102(1), 368–373. doi:10.1152/jappphysiol.00789.2006.

115. Sieljacks, P., Knudsen, L., Wernbom, M., & Vissing, K. (2018). Body position influences arterial occlusion pressure: implications for the standardization of pressure during blood flow restricted exercise. *European Journal of Applied Physiology*, 118(2), 303–312. doi:10.1007/s00421-017-3770-2

116. Singer, T. J., Stavres, J., Elmer, S. J., Kilgas, M. A., Pollock, B. S., Kearney, S. G., & McDaniel, J. (2019). Knee extension with blood flow restriction: Impact of cuff pressure on hemodynamics. *European Journal of Applied Physiology*. doi:10.1007/s00421-019-04250-2

117. Skorski, S., Mujika, I., Bosquet, L., Meeusen, R., Coutts, A. J., & Meyer, T. (2019). The Temporal Relationship Between Exercise, Recovery Processes and Changes in Performance. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 1–23. doi:10.1123/ijsp.2018-0668

118. Smith, M. J., & Melton, P. (1981). Isokinetic versus isotonic variable-resistance training. *The American Journal of Sports Medicine*, 9(4), 275–279. doi:10.1177/036354658100900420 Sakuraba, K., & Ishikawa, T. (2009). Effect of isokinetic resistance training under a condition of restricted blood flow with pressure. *Journal of Orthopaedic Science*, 14(5), 631–639. doi:10.1007/s00776-009-1374-3

119. Suga, T., Okita, K., Morita, N., Yokota, T., Hirabayashi, K., Horiuchi, M., ...i Tsutsui, H. (2010). Dose effect on intramuscular metabolic stress during low-intensity resistance exercise with blood flow restriction. *Journal of Applied Physiology*, 108(6), 1563–1567.

120. Suga, T., Okita, K., Morita, N., Yokota, T., Hirabayashi, K., Horiuchi, M., ... & Tsutsui, H. (2009). Intramuscular metabolism during low-intensity resistance exercise with blood flow restriction. *Journal of Applied Physiology*, 106(4), 1119–1124.

121. Suzuki, J., Kobayashi, T., Uruma, T., & Koyama, T. (2000). Strength training with partial ischaemia stimulates microvascular remodelling in rat calf muscles. *European Journal of Applied Physiology*, 82(3), 215–222. doi:10.1007/s004210050674
122. Takano, H., Morita, T., Iida, H., Asada, K. I., Kato, M., Uno, K., ... & Nakajima, T. (2005). Hemodynamic and hormonal responses to a short-term low-intensity resistance exercise with the reduction of muscle blood flow. *European journal of applied physiology*, 95, 65-73.
123. Takarada, Y., Takazawa, H., Sato, Y., Takebayashi, S., Tanaka, Y., & Ishii, N. (2000). Effects of resistance exercise combined with moderate vascular occlusion on muscular function in humans. *Journal of applied physiology*.
124. Tanaka, D., Suga, T., Tanaka, T., Kido, K., Honjo, T., Fujita, S., ... Isaka, T. (2016). Ischemic Preconditioning Enhances Muscle Endurance during Sustained Isometric Exercise. *International Journal of Sports Medicine*, 37(08), 614–618. doi:10.1055/s-0035-1565141
125. Tanimoto, M., & Ishii, N. (2006). Effects of low-intensity resistance exercise with slow movement and tonic force generation on muscular function in young men. *Journal of Applied Physiology*, 100(4), 1150–1157. doi:10.1152/jappphysiol.00741.2005.
126. Teixeira, E. L., Barroso, R., Silva-Batista, C., Laurentino, G. C., Loenneke, J. P., Roschel, H., ... & Tricoli, V. (2018). Blood flow restriction increases metabolic stress but decreases muscle activation during high-load resistance exercise. *Muscle & Nerve*, 57(1), 107-111.
127. Thomas, H. J., Scott, B. R., & Peiffer, J. J. (2018). Acute physiological responses to low-intensity blood flow restriction cycling. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 21(9), 969–974. doi:10.1016/j.jsams.2018.01.013
128. Thorstensson, A., Grimby, G., & Karlsson, J. (1976). Force-velocity relations and fiber composition in human knee extensor muscles. *Journal of Applied Physiology*, 40(1), 12–16. doi:10.1152/jappl.1976.40.1.12
129. Tillin, N. A., & Bishop, D. (2009). Factors Modulating Post-Activation Potentiation and its Effect on Performance of Subsequent Explosive Activities. *Sports Medicine*, 39(2), 147–166. doi:10.2165/00007256-200939020-00004
130. Torma, F., Gombos, Z., Fridvalszki, M., Langmar, G., Tarcza, Z., Merkely, B., ... & Radak, Z. (2021). Blood flow restriction in human skeletal muscle during rest periods after high-load resistance training down-regulates miR-206 and induces Pax7. *Journal of sport and health science*, 10(4), 470-477.

131. Trybulski R., Bichowska M., Piwowar R., Pisz A., Krzysztofik M., Filip-Stachnik A., Fostiak, K., Makar, P., Wilk, M. (2023). The effects of ischemia during rest intervals on strength endurance performance. *PLOS ONE*, 18, 1-9. doi:10.1371/journal.pone.0280231
132. Trybulski, R., Jarosz, J., Krzysztofik, M., Lachowicz, M., Trybek, G., Zając, A., & Wilk, M. (2022). Ischemia during rest intervals between sets prevents decreases in fatigue during the explosive squat exercise: a randomized, crossover study. *Scientific Reports*, 12(1), 5922.
133. Trzaskoma, Z., Trzaskoma, Ł. (2001). *Kompleksowe zwiększanie siły sportowców*, Centralny Ośrodek Sportu, Warszawa, s. 22 – 24.
134. Wilk, M., Gepfert, M., Krzysztofik, M., Stastny, P., Zając, A., & Bogdanis, G. C. (2020a). Acute effects of continuous and intermittent blood flow restriction on movement velocity during bench press exercise against different loads. *Frontiers in Physiology*, 11, 569915.
135. Wilk, M., Krzysztofik, M., Drozd, M., & Zając, A. (2020c). Changes of power output and velocity during successive sets of the bench press with different duration of eccentric movement. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 15(2), 162-167.
136. Wilk, M., Krzysztofik, M., Filip, A., Szkudlarek, A., Lockie, R. G., & Zając, A. (2020b). Does post-activation performance enhancement occur during the bench press exercise under blood flow restriction?. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(11), 3752.
137. Wilk, M., Krzysztofik, M., Filip, A., Zając, A., Bogdanis, G. C., & Lockie, R. G. (2022a). Short-term blood flow restriction increases power output and bar velocity during the bench press. *Journal of strength and conditioning research*, 36(8), 2082-2088.
138. Wilk, M., Krzysztofik, M., Gepfert, M., Poprzecki, S., Gołaś, A., & Maszczyk, A. (2018). Technical and training related aspects of resistance training using blood flow restriction in competitive sport-a review. *Journal of human kinetics*, 65(1), 249-260.
139. Wilk, M., Krzysztofik, M., Jarosz, J., Krol, P., Leznicka, K., Zając, A., Stastny P. & Bogdanis, G. C. (2021a). Impact of ischemic intra-conditioning on power output and bar velocity of the upper limbs. *Frontiers in Physiology*, 12, 626915.
140. Wilk, M., Trybulski, R., Krzysztofik, M., Wojdala, G., Campos, Y., Zając, A., ... & Stastny, P. (2021b). Acute effects of different blood flow restriction protocols on bar velocity during the squat exercise. *Frontiers in Physiology*, 12, 652896.

141. Wilk, M., Zajac, A., & Tufano, J. J. (2021c). The Influence of Movement Tempo During Resistance Training on Muscular Strength and Hypertrophy Responses: A Review. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 51(8), 1629–1650. Doi:10.1007/s40279-021-01465-2
142. Wong, Y.-M., & Ng, G. Y. F. (2006). Surface electrode placement affects the EMG recordings of the quadriceps muscles. *Physical Therapy in Sport*, 7(3), 122–127. doi:10.1016/j.ptsp.2006.03.006
143. Yamada, E., Kusaka, T., Tanaka, S., Mori, S., Norimatsu, H., & Itoh, S. (2004). Effects of vascular occlusion on surface electromyography and muscle oxygenation during isometric contraction. *Journal of Sport Rehabilitation*, 13(4), 287-299.
144. Yasuda, T., Abe, T., Brechue, W. F., Iida, H., Takano, H., Meguro, K., ... & Nakajima, T. (2010). Venous blood gas and metabolite response to low-intensity muscle contractions with external limb compression. *Metabolism*, 59(10), 1510-1519.
145. Yasuda, T., Brechue, W. F., Fujita, T., Shirakawa, J., Sato, Y., & Abe, T. (2009). Muscle activation during low-intensity muscle contractions with restricted blood flow. *Journal of sports sciences*, 27(5), 479-489.
146. Yasuda, T., Loenneke, J., Ogasawara, R., & Abe, T. (2013). Influence of continuous or intermittent blood flow restriction on muscle activation during low-intensity multiple sets of resistance exercise. *Acta Physiologica Hungarica*, 100(4), 419-426.
147. Yasuda, T., Ogasawara, R., Sakamaki, M., Ozaki, H., Sato, Y., & Abe, T. (2011). Combined effects of low-intensity blood flow restriction training and high-intensity resistance training on muscle strength and size. *European Journal of Applied Physiology*, 111(10), 2525–2533. doi:10.1007/s00421-011-1873-8
148. Zatsiorsky, V. M., Kraemer, W. J., & Fry, A. C. (2020). Science and practice of strength training. *Human Kinetics*.

## Spis tabel

|           |                                                                                                                                                                                                  |    |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1. | Charakterystyka uczestników badań                                                                                                                                                                | 22 |
| Tabela 2. | Średnia i odchylenie standardowe dla szczytowych wartości momentów siły mięśniowej, mierzonych podczas prostowania w stawie kolanowym w warunkach izokinetycznych                                | 30 |
| Tabela 3. | Średnia szczytowych wartości momentów siły mięśniowej dla wartości efektu głównego interwencji, mierzonych podczas prostowania w stawie kolanowym w warunkach izokinetycznych                    | 31 |
| Tabela 4. | Średnia szczytowych wartości momentów siły mięśniowej dla wartości efektu głównego serii, mierzonych dla poszczególnych serii podczas prostowania w stawie kolanowym w warunkach izokinetycznych | 31 |
| Tabela 5. | Wielkość efektu d Cohena dla średniej szczytowych wartości momentów siły mięśniowej, mierzonych podczas prostowania w stawie kolanowym w warunkach izokinetycznych                               | 31 |
| Tabela 6. | Średnia i odchylenie standardowe dla poziomu aktywności mięśniowej, mierzonej podczas prostowania w stawie kolanowym w warunkach izokinetycznych                                                 | 32 |
| Tabela 7. | Średnia poziomu aktywności mięśniowej dla efektu głównego interwencji, mierzonych podczas prostowania w stawie kolanowym w warunkach izokinetycznych                                             | 33 |
| Tabela 8. | Średnia poziomu aktywności mięśniowej dla efektu głównego serii, mierzonego podczas prostowania w stawie kolanowym w warunkach izokinetycznych                                                   | 33 |
| Tabela 9. | Wielkość efektu d ES Cohena dla średniej aktywności mięśniowej mierzonej podczas prostowania w stawie kolanowym w warunkach izokinetycznych                                                      | 33 |

## Spis rycin

|           |                                       |    |
|-----------|---------------------------------------|----|
| Rycina 1. | Schemat sesji eksperymentalnej        | 25 |
| Rycina 2. | Procedury ograniczenia przepływu krwi | 28 |