

KETÓNY A ŠPORTOVEC

- **Mgr. Kristián Slíž, Ing. Tomáš Pagáč, PhD.**

Úvod

Ketóny propagované za účelom zvýšenia dostupnosti energie počas športového výkonu, optimalizácie regenerácie po športovom výkone či zlepšenia adaptácie k tréningovému procesu sú pre vytrvalostných športovcov populárnou skupinou výživových doplnkov. Tento článok predstavuje prierez najdôležitejšími faktami o ketónoch, ktoré by mali byť pre telovýchovného lekára, trénera, športovca, ako aj realizačný tím a širšiu verejnosť známe.

V článku sa dozviete:

1. Čo sú to ketóny?
2. Prečo športovci užívajú ketóny?
3. Aké zloženie majú výživové doplnky s obsahom ketónov na trhu?
4. Kedy a ako by mali športovci ketóny užívať?

Čo sú to ketóny?

Ketóny (acetón, acetoacetát a beta-hydroxybutyrát) sú metabolicky aktívne látky, ktoré sa tvoria v pečeni po dlhom období nízkeho energetického príjmu a/alebo nízkeho príjmu sacharidov v potrave.

- V bežnej populácii je tvorba ketolátok obyčajne dôsledkom hladovania alebo metabolického ochorenia diabetes mellitus 1. typu.
- V prípade športovcov je tvorba ketolátok najčastejšie dôsledkom populárnej ketogénnej diéty (nízky príjem sacharidov, vysoký príjem tukov).

Tvorbu a využitie ketónov v našom organizme si vysvetlíme na schémach 1-5:

„Ketóny sú metabolicky aktívne látky, ktoré sa tvoria v pečeni po dlhom období nízkeho energetického príjmu a/alebo nízkeho príjmu sacharidov v potrave.“

Schéma 1. Nízka hladina glukózy v krvi (hypoglykémia).

↓ glukóza >> ↓ pyruvát >> ↓ acetylCoA >> ↓ Krebsov cyklus
>> ↓ NADH,FADH₂ >> ↓ oxidatívna fosforylácia >> ↓ ATP

Vysvetlenie. Nízky energetický príjem a/alebo nízky príjem sacharidov v potrave (prípadne metabolické ochorenie) spôsobujú hypoglykémiu. V stave hypoglykémie je dostupnosť glukózy (primárny zdroj energie) pre metabolicky aktívne tkanivá obmedzená, čo vedie k (i.) zníženiu aktivity Krebsovho cyklu, (ii.) zníženiu prenosu elektrónov v procese oxidatívnej fosforylácie, (iii.) zníženiu tvorby ATP - energie pre činnosť mozgu a svalstva.

Schéma 2. Kompenzačný mechanizmus č.1: beta-oxidácia mastných kyselín.

tukové tkanivo >> ↑ mastné kyseliny >> ↑ aktivované mastné kyseliny >> beta-oxidácia mastných kyselín >> ↑ acetylCoA >> ↑ Krebsov cyklus >> ↑ NADH,FADH₂ >> ↑ oxidatívna fosforylácia >> ↑ ATP

Vysvetlenie. Organizmus na hypoglykémii reaguje zvýšením získavania energie z tukov (sekundárny zdroj energie). V prvom kroku sa mobilizujú mastné kyseliny zo zásob v tukovom tkanive, odkiaľ sa krvnou cirkuláciou transportujú do pečene. V druhom kroku sa na mastné kyseliny naviaže molekula karnitínu, ktorá ich aktivuje a umožní im vstup do energetického centra bunky – mitochondrie. V treťom kroku mastné kyseliny vstúpia do cyklického procesu beta-oxidácie, ktorého výsledkom je zvýšená tvorba acetylCoA, ktorý je nevyhnutný pre aktivitu Krebsovho cyklu a tvorbu ATP v procese oxidatívnej fosforylácie.

Schéma 3. Kompenzačný mechanizmus č. 2: novo-tvorba glukózy (glukoneogenéza).

tukové tkanivo >> ↑ mastné kyseliny >> ↑ aktivované mastné kyseliny >> beta-oxidácia mastných kyselín >> ↑ acetylCoA >> ↑ Krebsov cyklus >> ↑ glukoneogenéza

Vysvetlenie. Keďže beta-oxidácia mastných kyselín opätovne zvýši aktivitu Krebsovho cyklu, organizmus využije jeden z jeho metabolitov (Krebsovho cyklu) pre spustenie novo-tvorby glukózy. Ide o kompenzačný krok, ktorým sa naše telo snaží zvrátiť stav hypoglykémie.

Schéma 4. Kompenzačný mechanizmus č. 3: tvorba ketolátok.

↑ glukoneogenéza >> ↓ Krebsov cyklus >> ↑ acetylCoA >> tvorba ketolátok

Vysvetlenie. V procese novo-tvorby glukózy sa pri takomto stave organizmu (hladovanie a pod.) pomerne rýchlo zníži aktivita Krebsovho cyklu (vyčerpá sa oxaloacetát), čo spôsobí zvýšenie hladiny acetylCoA (nevstupuje do Krebsovho cyklu). Tentokrát bude acetylCoA využitý v kompenzačnom biochemickom mechanizme, pri ktorom sa z neho v kaskáde enzymaticky riadených reakcií prebiehajúcich v pečeni vytvoria alternatívne zdroje energie - ketolátky (acetoacetát, beta-hydroxybutyrát).

Schéma 5. Využitie ketolátok.

ketolátky >> krvná cirkulácia >> mozog, svaly >> ↑ acetylCoA >> ↑ Krebsov cyklus >> ↑ NADH, FADH₂ >> ↑ oxidatívna fosforylácia >> ↑ ATP

„Ketóny slúžia ako alternatívny zdroj energie pre mozog a kostrové svalstvo.“

Vysvetlenie. Ketolátky, ktoré sa vytvoria v pečeni sa krvou transportujú do mozgu a svalov, kde slúžia ako alternatívny zdroj energie. Beta-hydroxybutyrát má v rámci ketolátok najvyššiu metabolickú aktivitu. Jeho enzymatickým rozložením sa uvoľnia molekuly acetylCoA, ktorých postupné hromadenie aktivuje v mozgu a svaloch Krebsov cyklus (v dôsledku hypoglykémie bola v týchto tkanivách jeho aktivita znížená) a podobne ako v prípade glukózy (primárny zdroj energie) umožní tvorbu ATP v procese oxidatívnej fosforylácie.

Prečo športovci užívajú ketóny?

Výživové doplnky s obsahom ketónov umožňujú športovcom využiť metabolický potenciál ketolátok (najmä beta-hydroxybutyrátu) bez toho, aby prekonal obdobia nízkeho energetického príjmu a/alebo nízkeho príjmu sacharidov v potrave [1].

- Akútne podanie ketónov počas vytrvalostnej športovej aktivity je určené na zlepšenie športového výkonu prostredníctvom zvýšenia dostupnosti energie pre činnosť svalov a mozgu [2–4].
- Chronické (dlhodobé) podávanie ketónov je určené na optimalizáciu regenerácie po športovom výkone [5] a zlepšenie adaptácie k tréningovému režimu [6].

História. Prvotný záujem o využitie ketolátok vo svete športu sa pripisuje oxfordskému profesorovi Kieranovi Clarkovi, ktorý vynášiel ketónový ester DeltaG. Tento výživový doplnok (DeltaG) obdržal mimoriadnu mediálnu pozornosť, nakoľko bol kľúčovým bodom prípravy britských športovcov na letné olympijské hry 2012 v Londýne.

„Výživové doplnky s obsahom ketónov umožňujú športovcom využiť metabolický potenciál beta-hydroxybutyrátu bez toho, aby prekonal obdobia nízkeho energetického príjmu a/alebo nízkeho príjmu sacharidov v potrave.“

Aké zloženie majú výživové doplnky s obsahom ketónov na trhu?

Ketóny sú na trhu s výživovými doplnkami dostupné v troch rôznych formách:

- **Ketónové soli** (sodné, horečnaté alebo vápenaté soli beta-hydroxybutyrátu);
Nevýhoda: zvýšené riziko gastrointestinálnych ťažkostí v dôsledku vysokej dávky solí.
- **1,3-butándiol** (prekursor pre tvorbu beta-hydroxybutyrátu);
Nevýhoda: zlá dostupnosť na trhu.
- **Ketónové estery:**
Ketónové monoestery (napr. DeltaG pod komerčným názvom HVMN ketón ester).
Nevýhoda: mimoriadne vysoká cena.
Ketónové diestery sú predmetom klinického výskumu, a tak by sa na trhu ešte nemali vyskytovať.

Dôležité. Zloženie niektorých ketónových výživových doplnkov uvádza obsah racemickej zmesi (t. j. rovnaký podiel D- a L-stereoizomérov) beta-hydroxybutyrátu. Avšak, odborná literatúra uvádza vysokú metabolickú aktivitu iba v prípade D-formy beta-hydroxybutyrátu [7].

Kedy a ako by mali športovci užívať ketóny?

- Akútne užívanie.

Mechanizmus účinku. Doplnkový substrát pre tvorbu energie v bunkách kostrového svalstva (nižšia spotreba kyslíka pri tvorbe ATP). Doplnkový substrát pre tvorbu energie v bunkách mozgu a nervového tkaniva (zlepšenie kognitívnych schopností).

Meta-analýzy. Vplyv akútneho užívania ketónov na vytrvalostný športový výkon bol preskúmaný v mnohých klinických kontrolovaných štúdiách, ktoré boli následne spracované a vyhodnotené vo viacerých meta-analýzach [2, 4, 8, 9]. Ich výstupom bolo zhodné štatistické zistenie, a to že akútne užívanie ketónov počas športovej aktivity športovcom neprináša „v priemere“ žiadny benefit.

Výnimky. V klinických kontrolovaných štúdiách, ktoré zaznamenali zlepšenie športového výkonu po akútnom užití ketónov športovci užívali (i.) ketónové doplnky spolu so sacharidmi po nočnom hladovaní [10]; (ii.) ketónové doplnky spolu s bikarbonátmi [11].

Schéma 6. Prečo vedci podávali ketónové doplnky spolu s bikarbonátmi?

ketolátky >> krvná cirkulácia >> zmena pH krvi (okyslenie, tzv. ketoacidóza) >> ↑ riziko gastrointestinálnych ťažkostí

Vysvetlenie. Akútne zvýšenie hladiny ketolátok v krvi môže spôsobiť jej okyslenie (tzv. ketoacidózu), pričom krv s nižším pH (a zvýšenou koncentráciou ketolátok) môže následne podráždiť chemosenzitívne receptory centrálného nervového systému (v area postrema) a navodiť nevoľnosť a zvracanie. Súbežné podanie bikarbonátov (zásadité látky) môže spomínanému okysleniu krvi predchádzať, a tým pádom znižovať riziko potenciálnych nežiaducich účinkov ketolátok.

Protokoly akútneho užívania. V klinických kontrolovaných štúdiách boli subjektom podávané ketónové doplnky v rôznych typoch protokolov. Najčastejšie boli ketolátky športovcom podávané pred športovým výkonom, prípadne počas športového výkonu. Jednotlivá jednorazová dávka ketónov sa pohybovala v rozmedzí 40-60 g.



- Chronické užívanie.

Predpokladané dlhodobé účinky. Uvažuje sa o tom, že chronické užívanie ketónov by mohlo športovcom poskytovať zlepšenie adaptácie k tréningovému procesu a optimalizáciu regenerácie po športovom výkone prostredníctvom (i.) zvýšenia miery proteosyntézy (tvorby bielkovín); (ii.) zvýšenia miery glykogenogenézy (tvorby glykogénu); (iii.) a potlačenia zápalu (mechanizmus neznámy).

Odborné stanovisko. Austrálsky inštitút športu (AIS z angl. *Australian Institute of Sport*) zdôrazňuje, že dlhodobé užívanie ketónov si vyžaduje podrobnejšie preskúmanie. Túto stratégiu, ako aj vyššie spomínané predpokladané dlhodobé účinky ketónov AIS označuje ako dosiaľ nepodložené na vedeckých dôkazoch [7].

Záver

Pri súčasnom stave poznatkov je užívanie výživových doplnkov s obsahom ketónov vo všeobecnosti označované ako nepodložené na vedeckých dôkazoch. Dôkazy o prínosoch akútneho alebo chronického užívania ketónov pre zlepšenie športového výkonu sú nejasné. Existuje široká škála rôznych protokolov ich užívania, ktoré sa navzájom líšia (i.) v type vykonávanej športovej aktivity; (ii.) v spôsobe ich podávania; (iii.) v jednorazovej dávke (najčastejšie) beta-hydroxybutyrátu; (iv.) ako aj v samotnej dĺžke ich užívania. Z týchto dôvodov je ťažké integrovať výsledky klinických kontrolovaných štúdií do jednotného odporúčania pre športovcov, ktoré by im malo slúžiť k dosiahnutiu ich športových cieľov.

Zdroje

- [1] Evans, M., Cogan, K.E., & Egan, B. (2017). Metabolism of ketone bodies during exercise and training: physiological basis for exogenous supplementation. *J Physiol*, 595(9), 2857-71.
- [2] Shaw, D.M., Merien, F., Braakhuis, A., Maunder, E., & Dulson, D.K. (2020). Exogenous Ketone Supplementation and Keto-Adaptation for Endurance Performance: Disentangling the Effects of Two Distinct Metabolic States. *Sports Med*, 50, 641-656.
- [3] Valenzuela, P.L., Castillo-García, A., Morales, J.S., & Lucia, A. (2020). Update on the Acute Effects of Ketone Supplements in Athletes. *Adv Nutr*, 11(4), 1050-1.
- [4] Margolis, L.M. & O'Fallon, K.S. (2019). Utility of Ketone Supplementation to Enhance Physical Performance: A Systematic Review. *Adv Nutr*. 11, 412-419.
- [5] Poffe, C., Ramaekers, M., Van Thienen, R., & Hespel, P. (2019) Ketone ester supplementation blunts overreaching symptoms during endurance training overload. *J Physiol*, 597(12), 3009-27.



[6] Poffe, C., & Hespel, P. (2021). Ketone bodies: beyond their role as a potential energy substrate in exercise. *J Physiol*, 598(21), 4749-4750.

[7] AIS Sport Supplement Framework: Ketone Supplements. (2021) https://www.ais.gov.au/_data/assets/pdf_file/0009/1000080/36194_Sport-supplement-fact-sheets-Ketones-v4.pdf

[8] Valenzuela, P.L., Castillo-Garcia, A., Morales, J.S., & Lucia, A. (2020) Perspective: Ketone Supplementation in Sports-Does It Work? *Adv Nutr*. In press

[9] Valenzuela, P.L., Morales, J.S., Castillo-García, A., & Lucia, A. (2020) Acute Ketone Supplementation and Exercise Performance: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *Int J Sports Physiol Perform*, 15(3), 298-308.

[10] Cox, P.J., Kirk, T., Ashmore, T., Willerton, K., Evans, R., Smith A, et al. (2016). Nutritional Ketosis Alters Fuel Preference and Thereby Endurance Performance in Athletes. *Cell Metab*, 24(2), 256-68.

[11] Poffe, C., Ramaekers, M., Bogaerts, S., & Hespel, P. (2021). Bicarbonate Unlocks the Ergogenic Action of Ketone Monoester Intake in Endurance Exercise. *Med Sci Sports Exerc*. 53, 431-441.

***Mgr. Kristián Slíž,
farmaceut (FaF UK)***

***Ing. Tomáš Pagáč, PhD.,
biochemik (SADA)***