



A KLÍMAVÁLTOZÁS ÁLLAT- TENYÉSZTÉSI VONATKOZÁSAI XV.

ILLÓZSÍRSAV- ÉS METÁNTERMELÉS A BENDŐBEN – EGY KIS KÉMIA

**Szakértő
munkatársunk írása**
Állattenyésztési
Teljesítményvizsgáló Kft.

Előző számunkban a takarmányokban található főbb szénhidrátokkal, tehát a cellulózzal, a hemicellulózzal, a pektinnel, a keményítővel, valamint a cukrokkal foglalkoztunk, és kiemeltük azok főbb jellemzőit, illetve fermentációs tulajdonságait. Megállapítottuk, hogy a neutrális detergens rost (neutral detergent fibre, NDF) részét képező cellulóz lassan, míg a hemicellulóz valamivel gyorsabban bomlik le a szarvasmarhák bendőjében. Ezen anyagok fermentációja elsősorban az ecetsav-, másodsorban a vajsavtermelésnek kedvez, ami előnyösen befolyásolja a tej- és a tejszírtermelést. A nagyobb keményítőtartalmú abraktakarmányok emésztése ezzel szemben fokozott propionsav- (és tejsav-) képződéssel jár, amelynek következtében csökken a tej- és tejszírtermeléshez ideálisnak tartott 3:1-es ecetsav-propionsav arány, viszont növekszik a tejfőhártya-termelés. Túl nagy abrakadagok átmenet (a tehének előzetes hozzászoktatása) nélkül történő etetések a tejsavképző baktériumok által termelt tejsav a bendőfolyadék pH-értékét 6 alá csökkentheti, ami bendőacidózis kialakulásához vezethet. Ilyenkor felborul a bendő mikrobiális egyensúlya, és a mikroorganizmusok egy része elpusztul, visszaesik (súlyosabb esetekben meg is szűnik) a rostemésztés, romlik az állatok étvágya, csökken a bendőmozgások

száma és erőssége, valamint komoly anyagcsere-rendellenességek és egyéb betegségek léphetnek fel. A vízben oldódó cukrok lebontásakor főként a vajsavtermelés erősödik, míg a propionsav-képződés volumene a takarmány összetételétől és a fermentációs feltételektől függően változik (jellemzően szintén emelkedik).



Mivel a három fő illó zsírsav (ecetsav, propionsav, vajsav), illetve a metán (CH_4) bendőbeli képződése szorosan összefügg egymással, a következőkben e szerves savak kémiai szintézisével foglalkozunk, továbbá áttekintjük a hasznosulásuk lehetőségeit a tejhasznú szarvasmarha szervezetében. Természetesen igyekszünk eközben felfedni az illózsírsavak és a CH_4 termelődése közötti kapcsolatokat is.

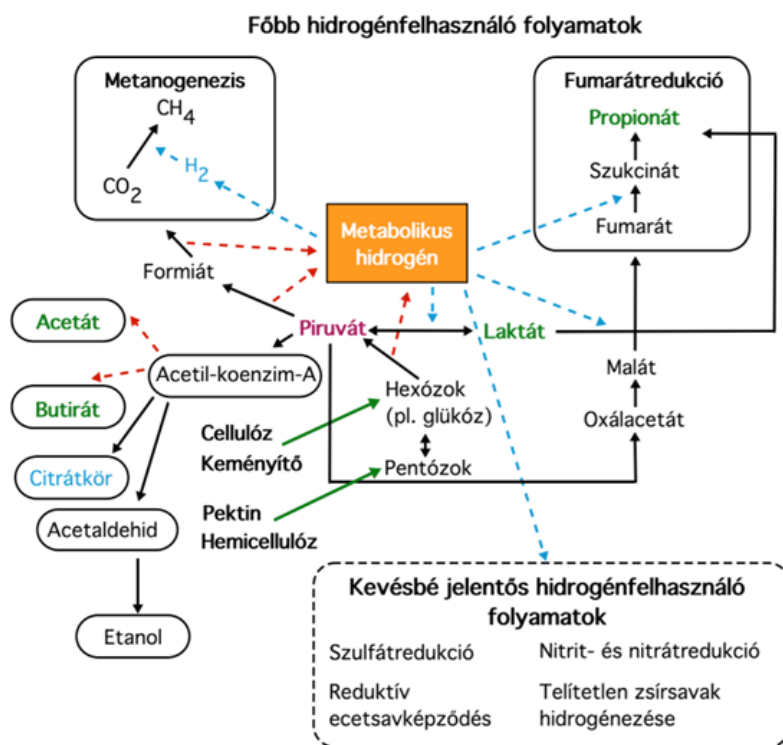


A bendőben zajló illózsírsav- és CH₄-termelés kémiai háttere

Mint arról már a korábbi részekben szó esett, a szénhidrátok a bendőben monoszacharidokká, például glükózzá hidrolizálódnak, amelyből piroszőlősav keletkezik (erre és az egyéb szerves savakra felszívódás után a savmaradékionjukkal – például a piroszőlősavra piruvátként – hivatkozik a szakirodalom; ezen anion-elnevezéseket azonban az egyszerűség kedvéért csak az 1. ábra kapcsán használjuk). A piroszőlősav (piruvát) ezt követően többféle biokémiai átalakuláson mehet keresztül, ezért központi szerepet tölt be a metabolikus folyamatokban (lásd az 1. ábrát): 1. szén-dioxid leadásával acetil-koenzim-A

képződhet belőle, ami egyfelől beléphet a citrátkörbe (a citrátkör annak az anyagcsere-útvonalnak a részét képezi, amelyben a szénhidrátokból, zsírokból és fehérjékből energiatermelés mellett végül szén-dioxid és víz jön létre), másfelől ecetsavvá (savmaradékionja: acetát), vajsavvá (savmaradékionja: butirát), illetve acetaldehiden keresztül etil-alkohollá (etanollá) alakulhat; 2. tejsav (savmaradékionja: laktát) vagy több lépésben propionsav (savmaradékionja: propionát) keletkezhet belőle; valamint 3. hozzájárulhat a CH₄-képződéshez szén-dioxidból és hidrogénmolekulából.

1. ábra A bendőben zajló hidrogénfelhasználó folyamatok sematikus rajza (a kék szaggatott nyilak a hidrogénfelhasználást, a pirosak a hidrogéntermelést jelzik)



Megjegyzés: CO₂: szén-dioxid; H₂: hidrogénmolekula; formiát: a hangyasav savmaradékionja; piruvát: a piroszőlősav savmaradékionja; acetát: az ecetsav savmaradékionja; butirát: a vajsav savmaradékionja; laktát: a tejsav savmaradékionja; oxálcetát: az oxálcetsav savmaradékionja; malát: az almasav savmaradékionja; fumarát: a fumársav savmaradékionja; szukcinát: a borostyánkősav savmaradékionja; propionát: a propionsav savmaradékionja; etanol: etil-alkohol. Az ábrán feltüntetett hidrogénfelhasználó folyamatokon túl a mikrobák növekedéséhez (fehérje- és lipidszintéziséhez) is hidrogénre van szükség. A pentózok közé sorolható például a ribóz, az arabinóz, a xilóz és a ribulóz, míg a hexózokhoz tartozik a glükóz, a galaktóz, a mannóz és a fruktóz. Forrás: Kobayashi (2010) alapján saját átdolgozás.

A bendőfolyadékban levő oldott hidrogén parciális nyomása hatással van a takarmánylebontás útvonalára, tehát arra, hogy vajon az főként a hidrogéntermelő vagy a hidrogénfogyasztó irányban megy-e végbe. Az alacsony hidrogénszint (alacsony parciális nyomás) termodinamikailag a hidrogéntermelő ecetsav- és vajsavképződésnek kedvez, míg magas hidrogénszint (magas parciális nyomás) esetén a propionsav-szintézis dominál. A metabolikus hidrogén eltávolítása a bendőből, tehát a hidrogénfelhalmozódás megelőzése két okból is fontos: egyrészt segít alacsony szinten tartani a gáz parciális nyomását a „fermentációs rendszerben”, csökkentve ezáltal a tejsav- és az alkoholtermelést, másrészt előmozdítja a takarmányok hatékonyabb, nagyobb energiatermeléssel járó erjedését. A hidrogén többféle anyaggal, például a szén-dioxiddal, a szulfátokkal és a nitrátokkal is reakcióba léphet, ám ezek közül a bendőben leginkább csak a szén-dioxid áll rendelkezésre. (Lásd az 1. ábrán szereplő hidrogénfelhasználó folyamatokat.) Így a metabolikus hidrogén



felhasználásáért folytatott versenyben a metanogén archeák előnyt élveznek a nem-metanogén mikrobákkal szemben, következésképp ezeknek jut kulcsszerep a normál bendőfermentáció fenntartásában. A témával foglalkozó kutatások (például Wolin, 1979) ugyanakkor arra is rámutatnak, hogy a CH_4 -termelés gátlása nem feltétlenül vezet jelentős hidrogénfelhalmozódáshoz a bendőben, mivel ilyen esetben a mikroorganizmusok vélhetően a már említett alternatív útvonalakon hasznosítják azt.

A bendőfalán át a véráramba kerülő illó zsírsavak mennyisége és egymáshoz viszonyított aránya azért különösen jelentős, mert ezek az anyagok más-más metabolikus útvonalat „bejárva” hasznosulnak az állatok szervezetében. Közülük legnagyobb mennyiségben az **ecetsav** keletkezik; ilyenkor leegyszerűsítve (csak a kiinduló és a keletkező termékeket tekintve) a következő reakció játszódik le: egy glükózmolekulából (kémiai képlete: $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) és két vízmolekulából két szén-dioxid- és négy hidrogénmolekula felszabadulásával két ecetsavmolekula képződik (kémiai képlete: $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$;

alkotóelemei bekeretezve láthatók) – $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ [glükóz] + 2 H_2O [víz] → $2 \text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2^-$ [acetát] + 2 H^+ [hidrogénion] + 2 CO_2 [szén-dioxid] + 4 H_2 [hidrogénmolekula]. Az ecetsav a vérárammal az izom- és zsírszövetekbe, valamint a tejmirigybe szállítódik. Az izomsejtekben acetyl-coenzim-A-vá alakul, majd belép a citrátkörbe és az oxidációs láncba kerülve „elég”, energiát szolgáltatva ezáltal a tehének életfunkcióihoz, illetve a nagyobb tejtermeléshez. A zsírszövetben és a laktáló tejmirigyben pedig a hosszabb szénláncú zsírsavak, illetve a tejsír előállításában vesz részt. (Lásd a tejsírról szóló, zölddel kiemelt írást.)

A tejsír nagymértékben hozzájárul a teljes tej energiataralmának alakulásához, illetve hatást gyakorol a tejtermékek fizikai, gyártási és érzékszervi tulajdonságaira. A tehéntej legváltozékonyabb alkotóelemének tekinthető, amelynek mennyiségét és összetételét számos tényező befolyásolja, többek között a tehének genetikai háttere (eltérő az egyes fajták, illetve egyedek tejének zsírtartalma, például a holstein-fríz rendszerint 3,3–3,8%, a Jersey-é 4,5–5,2% körüli), egészségi állapota, takarmányozása, az ellések gyakorisága, az elléskori kondíció, az elléstől eltelt idő (a laktációs csúcsig rendszerint csökken, a laktáció második felében pedig emelkedik a tejsírtartalom), az évszakhatás stb. A zsírsavprofil a felsoroltak közül igen érzékenyen reagál a takarmányozás hatására (a takarmányadag rost- és keményítőtartalmára, a hozzáadott zsírok típusára stb.), ami lehetőséget kínál a gyakorlatban a tejsírhozam és -összetétel befolyásolására.

A tejsírt apró, átlagosan 3-4 μm -es átmérőjű golyócskák alkotják, melyeket fehérjében gazdag, poláros membrán vesz körül. A tejsír összetétele változatos, döntően (több mint 95%-ban) trigliceridekből áll, de tartalmaz di- és monoglicerideket, koleszterinésztereket, foszfolipideket és szabad zsírsavakat is. A trigliceridek különböző zsírsavakból, valamint glicerinből szintetizálódnak. A tejsír más élelmi zsíradékokhoz képest nagyobb (12-14) százalékban tartalmaz rövid- (4-9 szénatomból álló) és közepes (10-14 szénatomból álló) láncú zsírsavakat, melyek némely közepes szénláncú zsírsavak kivételével a tőgy mirigyhámsejtjeiben *de novo* szintézis útján keletkeznek. (A *de novo* szintézis, szemben az összetett vegyületek részleges lebontás utáni újrahasznosításával, azok szervezeten belüli, alapépítőkövekből történő új előállítását jelenti.) Ehhez szénforrásként elsősorban a szénhidrátok fermentációja során képződő ecetsav, másodsorban a bendőhámban vajsavból létrejött ketonanyag, a β -hidroxibutirát szolgál. A közepes szénláncú zsírsavak fennmaradó hányadát és a hosszú szénláncú (> 16 szénatomszámú) zsírsavak túlnyomó részét ugyanakkor takarmány- és mikrobiális eredetű zsírsavak adják (a tejsír zsírsav-összetétele ezért egyaránt tükrözheti a takarmányminőséget, a bendőmikrobák aktivitását és az állatok emésztési folyamatait), míg kisebb részük a tehének zsírtartalékaiból kerül a tőgymirigybe. Zsírszöveti mobilizáció útján a hosszú szénláncú zsírsavaknak csak kevesebb mint 10%-a keletkezik, kivéve a tehének ellés utáni, negatív energiamérlegű időszakát, amikor ez az arány számottevően megnő. A 16 szénatomszámú palmitinsav ugyanúgy származhat *de novo* szintézisből, mint takarmányzsírsavakból, mikrobiális forrásból vagy az állatok zsírraktáraiból. A tejsírszintézis összetett biokémiai folyamatok sorozata, melyek összehangoltan zajlanak a tőgymirigyben.

A tejsír táplálkozás-élettani szempontból számos lényeges és hasznos komponenst tartalmaz. Ezek között említhetők meg az egészséges szív- és érrendszeri működéshez, valamint a szem és az agy fejlődéséhez elengedhetetlen omega-3 és omega-6 zsírsavak, a gyulladáscsökkentő, antioxidáns és daganatellenes



tulajdonságokkal rendelkező konjugált linolsav, valamint a zsírban oldódó vitaminok (A, D, E és K), melyek kulcsfontosságúak az immunrendszer erősítésében, a csontok egészségének megőrzésében és a sejtek védelmében. A tehéntej ugyanakkor gazdag telített zsírsavakban, többszörösen telítetlen zsírsavakat pedig csak alacsony koncentrációban tartalmaz. Napjainkban ezért számos tudományos kutatás irányul a zsírsavprofil „finomhangolására”, hogy ezáltal jobban kielégíthetők legyenek az egészségtudatos fogyasztók igényei.

Mint korábban említettük, az ecetsav termelődését leginkább az NDF-bevitel ösztönzi. Így érthető, hogy miért oly meghatározó a takarmány-összetétel szerepe a tej hozamának és zsírsavtartalmának alakulásában. Az előbbieken túl az ecetsav szerepet játszhat a glikogénszintézisben is; erre azonban rendszerint csak akkor kerül sor, ha a tehének megnövekedett energia- (glükóz-) szükséglete miatt a szervezetükben glükózzraktározásra van szükség. Itt is érdemes hangsúlyozni, hogy a tejtermeléshez és a tejszírképzéshez ideális (3:1-es) ecetsav-propionsav arány csak megfelelő mennyiségű és minőségű (optimális szecskaméretű, struktúrájú) tömegtakarmányok etetésével, kiegyensúlyozott tömeg- és abraktakarmány-arány beállításával, illetve megfelelő takarmányozási stratégia alkalmazásával érhető el.

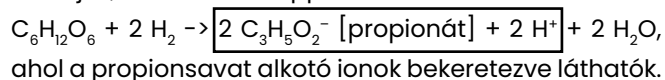


A három fő illó zsírsav közül a **vajsav** adja a legkisebb hányadot (kémiai képlete: $C_4H_8O_2$; összetevői: butirátion és hidrogénkation, lásd ezeket bekeretezve). Ha a képződésekor lejátszódó folyamatokat összevonjuk, akkor egy glükózmolekulából – acetil-koenzim-A-n keresztül – egy vajsav-, valamint két hidrogén- és két szén-dioxid-molekula szintetizálódik:

$C_6H_{12}O_6 \rightarrow [C_4H_7O_2^- [butirát] + H^+] + 2 H_2 + 2 CO_2$. A vajsav mintegy fele a bendő hámsejtjeiben β -hidroxí-butirát-tá alakul át, amely energiát szolgáltat a bélhámsejtek számára, elősegítve a bendőpapillák növekedését és a szerves savak hatékonyabb felszívódását. A bendőbeli takarmányfermentáció során keletkezett vajsav, a vérárammal eljutva a májba és más szövetekbe, az azokban zajló metabolikus folyamatokban, egyebek mellett a hosszú szénláncú zsírsavak és a ketontestek szintézisében vesz részt. A hosszú szénláncú

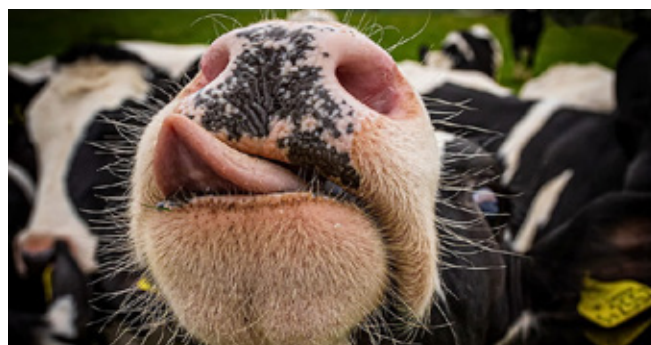
zsírsavak a tartós energiatárolást biztosítják, és elsősorban a zsírszövetben raktározódnak, továbbá a sejtmembránok felépítéséhez és a hormonok előállításához járulnak hozzá. A ketontestek ugyanakkor rövid távon, különösen csökkent glükózellátás esetén szolgáltatnak hasznosítható energiát az állatok szervezete számára. A β -hidroxí-butirát emellett közreműködik a tejsírt alkotó rövid és közepes szénláncú zsírsavak *de novo* képződésében is (lásd a tejszírről szóló írást).

A keményítőben gazdag takarmányok (abrak) felvétele fokozza a propionsav termelődését, amely elsősorban a piroszőlősavból, kismértékben pedig a nagyobb abrakmennyiség hatására képződő tejsavból származik. **A propionsav szintézise (kémiai képlete: $C_3H_6O_2$) a metanogenezis „konkurensének” tekinthető**, mivel ahhoz hasonlóan **e folyamat is nettó hidrogénfelhasználással jár**. Az ekkor lejátszódó kémiai reakció, ha csak a kiindulási és a végtermékeket tekintjük, a következőképpen írható le:

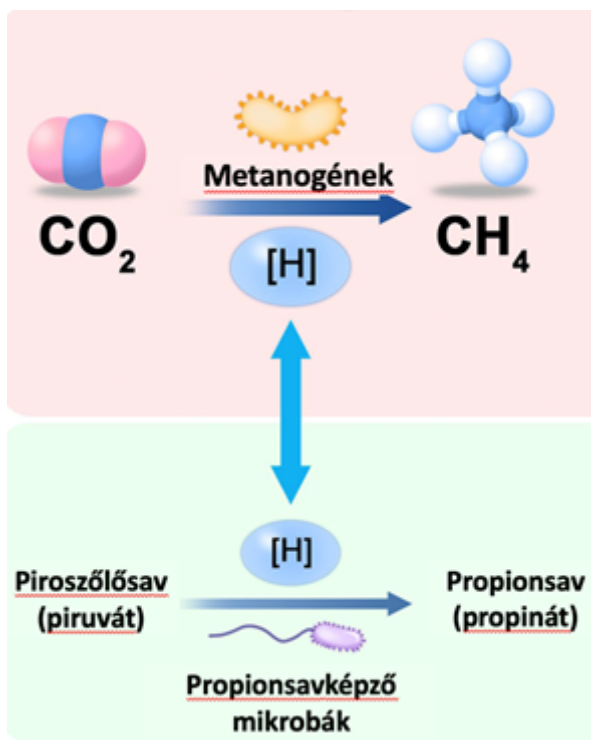


ahol a propionsavat alkotó ionok bekeretezve láthatók. Bár a bendőben valójában több reakció is végbemegy, ezek eredményeként – mint azt a bemutatott reakcióegyenlet is illusztrálja – összességében nem marad hidrogén- és szén-dioxid-felesleg, amely felhasználható lenne a metanogenezisben, ellentétben az ecetsav- és a vajsavtermeléssel. (A szukcionáttól történő propionátképződéskor ugyan szabadul fel szén-dioxid, de az egy másik reakcióban hasznosul.)

A propionsav-szintézis fokozása ezért lehetőséget nyújthat a takarmányok energiatartalmának hatékonyabb felhasználására és az állatok CH_4 -kibocsátásának mérséklésére.



2. ábra A metanogén és a propionsavképző mikrobák egymás antanogistái



Forrás: Wang-Xiong-Zhao (2023) alapján.

A különböző mikrobiális fajok hidrogéntermelésének és -hasznosításának összekapcsolódását **fajok közötti hidrogéntranszfernek** nevezzük, amely jelentős hatást gyakorol a bendőmikrobák élettevékenységére, végső soron pedig arra, hogy a fermentáció eredményeként mely metabolitok, köztes termékek lesznek számukra elérhetőek. A metanogenezis és a már említett propionsav-termelés mellett – mint azt az 1. ábra is mutatja – más hidrogénfelhasználással járó folyamatok is végbe mehetnek a bendőben; az említett két folyamathoz képest azonban azok csak korlátozott mértékben játszanak szerepet a metabolikus hidrogén felhasználásában.



A propionsav a bendőből felszívódva a májban több lépésben átalakul, majd szukcinil-koenzim-A formájában bekerül a citrátkörbe, ahol kisebb része energiatermelésre használódik, nagyobb része pedig – oxálacetát- (oxálcetsav-) szintézist követően – a glükoneogenezis egyik fő kiinduló vegyületként szolgál. A glükoneogenezis során glükóz jön létre nem-szénhidrát forrásokból, így például propionsavból, tejsavból, bizonyos aminosavakból, valamint a zsírbontásból származó glicerinnél. E folyamat elsősorban a májban, másodsorban a vesében

zajlik, és kulcsszerepet tölt be a szarvasmarhák glükózigényének kielégítésében, mivel a takarmánnyal felvett szénhidrátok csaknem teljes mennyisége rövid szénláncú szerves savakká (illó zsírsavakká, tejsavvá) fermentálódik a bendőben. Megfelelő tápanyagellátás és zavartalan bendőfermentáció esetén az ily módon előállított glükóz számottevő része (csaknem fele) propionsavból származik. A szarvasmarha szervezetében zajló több fontos folyamathoz is szükség van glükózra, így például:

- a tejfehérje-szintézishez – egyfelől energiát biztosít, másfelől részt vesz a nem esszenciális aminosavak képzésében;
- a trigliceridek felépítéséhez szükséges glicerinnel előállításához;
- a szarvasmarhák agy- és idegszövetének, veséinek, immunrendszerének megfelelő működéséhez;
- a vehemépítéshez;
- **a tőgymirigyben zajló laktóz- (tejcukor-) szintézishez** – a tejcukor kisebb része az előgyomrokban le nem bomlott egyszerű cukrokból és keményítőből származik, kb. fele



azonban propionsavból, amelynek különösen **nagy tejtermelés esetén van jelentősége.**

A takarmányadag keményítőtartalmának növelésével járó rosttartalom-csökkenés mérsékeltebb ecetsav-képződést eredményez, míg ezzel párhuzamosan a propionsav-termelés fokozódik, ami 3:1-nél szűkebb ecetsav-propionsav arányhoz vezet. Ez a változás kedvezőtlenül befolyásolhatja a rostemésztést és a tej zsírtartalmának alakulását, ugyanakkor mérsékli a CH₄-képződést is. Mint az előbbi felsorolásból kitűnik, a propionsav részt vesz a tejfehérje-szintézishez szükséges glükóz előállításában, így mennyiségének növekedése javíthatja a tej fehérjebeltartalmi mutatóját.

Az eddigieket összegezve, az ecetsav, a propionsav és a vajsav kulcsfontosságú a szarvasmarhák energiaszükségletének kielégítésében; megfelelő arányuk és mennyiségük döntő hatást gyakorol a tehenek egészségi állapotának és tejtermelésének alakulására. Az illó zsírsavak képződése ugyanakkor az állatok CH₄-kibocsátását is nagyban befolyásolja.

A CH₄-termelés csökkentése szempontjából a propionsav szerepét tekinthetjük kiemelkedőnek, mivel bendőbeli létrejöttének folyamata a szintén ott zajló

metanogenezis antagonistájaként fogható fel. Ennek tükrében azok a takarmányozási stratégiák, amelyek elősegítik a propionsav szintézisét, döntő jelentőségűek lehetnek a mezőgazdasági tevékenységünk környezeti hatásainak csökkentésében. Jelenleg számos tudományos kutatás fókuszában áll a tejhasznú állomány takarmányozásának optimalizálása, illetve olyan adalékanyagok felkutatása és használata, melyek javíthatják az állatok energiafelhasználásának hatékonyságát, és ezzel párhuzamosan mérséklik a CH₄-kibocsátásukat.

Források:

Kobayashi, Y. (2010): Abatement of methane production from ruminants: Trends in the manipulation of rumen fermentation. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences. Vol. 23. No. 3. pp. 410–416.

Wang, K. – Xiong, B. – Zhao, X. (2023): Could propionate formation be used to reduce enteric methane emission in ruminants? Science of the Total Environment. Vol. 855. January. Article No. 158867.

Wolin, M. J. (1979): The rumen fermentation: A model for microbial interactions in anaerobic ecosystems. In: Alexander, M. (ed.): Advances in Microbial Ecology. Springer. New York.

