



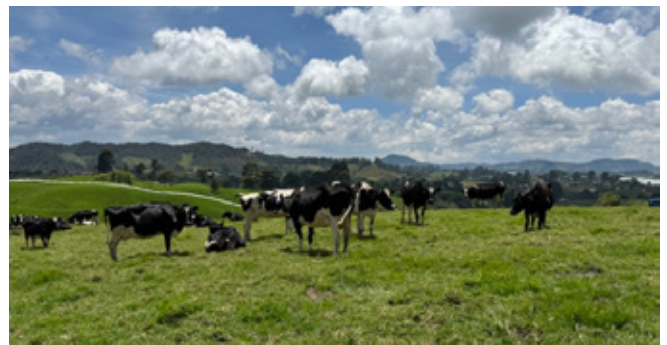
TAKARMÁNYOZÁS A METÁN- CSÖKKENTÉS SZOLGÁLATÁBAN II.

SZÉNHIDRÁTFORRÁSOK, BENDŐ-PH ÉS METÁNKÉPZŐDÉS

**Szakértő
munkatársunk írása**
Állattenyésztési
Teljesítményvizsgáló Kft.

A metán (CH_4) bendőbeli termelődése szorosan összefügg a fermentáció redoxviszonyaival. **A szénhidrátok lebomlása során a kérődzők energiaellátásában meghatározó szerepet játszó illó zsírsavak (volatile fatty acids, VFA) mellett redukált elektronhordozók** – például redukált nikotinamid-adenin-dinukleotid (reduced nicotinamide adenine dinucleotide, NADH) – **is keletkeznek**, amelyek folyamatos reoxidációja elengedhetetlen a mikrobiális fermentáció fennmaradásához. **Az általuk „tárolt” elektronok több, egymással versengő anyagcsereúton vezetődhetnek el.** Egy részük a szénhidrátbontó bendőmikrobák sejtjein belül **redukált végtermékek** – például **propionát, laktát vagy etanol** – képződésében kötődik le, más részük pedig **hidrogén vagy formiát formájában kikerül az extracelluláris bendőközegbe, ahonnan más mikroorganizmusok, elsősorban a metanogén archeák vehetik fel**, és a szén-dioxid redukciója révén CH_4 -t állítanak elő. Ennek klasszikus példája a $\text{CO}_2 + 4 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$ reakció. A metanogenezis így hozzájárul ahhoz, hogy a bendőben alacsony maradjon a hidrogén parciális nyomása, ami a fermentációs folyamatok zavartalan működésének alapvető feltétele. (Itt és a továbbiakban a szerves

savakat az anionos [disszociált] formájuk szerint jelöljük: például ecetsav \rightarrow acetát, propionsav \rightarrow propionát, vajsav \rightarrow butirát, tejsav \rightarrow laktát, hangyasav \rightarrow formiát.)



Az előbb említett alternatív anyagcsereutak relatív szerepét a bendőben rendelkezésre álló szénhidrátforrások típusa és fermentációs sajátosságai, a mikrobiális közösség összetétele és metabolikus aktivitása, a bendőközeg pH-ja, valamint a hidrogén parciális nyomása együtt alakítja. Ha a hidrogén mégis felhalmozódik, emelkedő parciális nyomása rontja a redukált elektronhordozók visszaoxidációjának termodinamikai feltételeit, ezért átrendeződhet a fermentációs mintázat, és mérséklődhet egyes mikrobiális folyamatok aktivitása.



Az acetát a bendőben legnagyobb mennyiségben képződő VFA, amely a felszívódása után elsősorban energiaforrásként hasznosul, emellett a zsírszövetben, különösen a tőgy tejtermelő mirigyekben a *de novo* zsírsavszintézis fontos prekursora.

A butirát jelentős része már a bendőhámsejtekben metabolizálódik, ahol részben ketontestekké, köztük β -hidroxibutiráttá (BHBA) alakul, részben pedig oxidatív úton lebomlik. A butirát a bendőhám fontos energiaforrása, szerepet játszik annak fejlődésében és funkcionális érésében. A képződő BHBA a keringésbe jutva a szervezet energia-anyagcseréjében hasznosul, és az acetáttal együtt hozzájárul a tejsír rövid és közepes szénláncú zsírsavainak *de novo* szintéziséhez.

A propionát felszívódást követően főként a májba jut, ahol a glükoneogenezis egyik fő kiinduló anyagaként a szarvasmarha glükózellátásának meghatározó forrásává válik. Az így keletkező glükóz nélkülözhetetlen többek között a laktózzintézishez, a trigliceridek glicerolvázának felépítéséhez, a központi idegrendszer és az immunrendszer működéséhez, valamint a magzati fejlődés számára. Mivel a laktóz ozmotikus hatásán keresztül a termelő tej mennyiségének egyik fő meghatározója, a propionátellátás közvetve a tejtermelés alakulásával is összefüggésben áll.

Az acetát:propionát:butirát mólarány az étrendtől függően nagyjából 75:15:10 és 40:40:20 között változhat (Bergman, 1990), ezért a szakirodalomban gyakran hivatkozott 3:1 acetát:propionát arány inkább tájékoztató érték, mintsem általánosan érvényes optimum (NASEM, 2021).

A VFA-profil – különösen az acetát, a propionát és a butirát egymáshoz viszonyított aránya – a bendőfermentáció redoxjellegének egyik fontos lenyomata, ezért közvetetten arra is utal, hogy a lebontó folyamatok során keletkező redukálópotenciál milyen arányban hasznosul a különböző végtermékképző utakban, így többek között a metanogenezisben és a propionátképzésben. CH_4 -mérséklési szempontból kedvező, ha az adag szénhidrátprofilja a fermentációt a nagyobb propionátarány felé tolja el, feltéve, hogy közben nem romlanak érdemben a rostfermentáció feltételei, és a savterhelés sem fokozódik a bendő stabilitását veszélyeztető mértékben. A gyakorlatban mindehhez nem pusztán a koncentrátumhányad növelése szükséges, hanem a keményítő mennyiségének és bendőbeli fermentációs dinamikájának, a neutrális detergens rost (neutral

detergent fibre, NDF) emészthetőségének, valamint a fizikailag hatékony NDF (physically effective NDF, peNDF) ellátásának összehangolása is, mert a tényleges CH_4 -válasz mértékét a bendőbeli hidrogénforgalom teljes dinamikája – vagyis a hidrogén képződésének, transzferének és alternatív elnyelő utak közötti megoszlásának együttes alakulása – határozza meg.



A bendő kémhatása mint „vezérlő paraméter”

A bendő pH-ja nem pusztán leíró mutató, hanem a fermentáció rendszerszintű állapotának egyik kulcsjelzője. Egyrészt annak következménye, hogy milyen ütemben, mennyi szerves sav képződik, illetve mekkora ehhez képest a nyálpufferelés, a savfelszívódás és a bendőpasszázs kompenzációs kapacitása; másrészt maga is befolyásolja, hogy mely mikrobiális közösségek képesek tartósan fennmaradni a bendőben, milyen fermentációs útvonalak válnak dominánssá, illetve hatékony-e a rostbontás.

A bendő pH-ja nem állandó, hanem napszaki ingadozást mutat (etetést követően rendszerint csökken); emellett térben sem homogén, mivel a takarmány szerkezetétől és a bendőtartalom rétegződésétől függően eltérő értékek mérhetők a különböző ruminális régiókban. Egyes szenzoros vizsgálatok (Dijkstra és mtsai., 2020) alapján a napi átlagos bendő-pH gyakran nem elegendő a fermentáció állapotának megítéléséhez; sok esetben informatívabb annak vizsgálata, hogy a pH mennyi ideig marad egy adott



küszöbérték alatt, illetve mekkora a pH-ingadozás vagy a kritikus szint alatti terhelés mértéke.

- **A közel semleges, viszonylag stabil, jellemzően 6,2–6,8 közötti pH** kedvez a mikrobiális aktivitásnak és a rostok hatékony lebontásának. A 6,0–6,2 körüli pH-tartomány azonban már átmeneti zónának tekinthető, amelyben a rostemésztés kedvezőtlen irányban változhat, különösen akkor, ha a pH tartósan ebben a szuboptimális sávban marad. Ez azonban nem éles határ: in vitro vizsgálatok szerint a cellulózbontás üteme a pH csökkenésével fokozatosan mérséklődik, és 5,3 körüli pH-n már súlyosan gátolt lehet, noha egyes cellulolitikus mikroorganizmusok ennél alacsonyabb pH közelében is mutathatnak korlátozott aktivitást (Mouriño és mtsai., 2001).
- **Ha a bendő kémhatása a közel semleges, stabil tartományhoz képest kismértékben csökken, vagy a napi pH-ingadozás fokozódik,** a rostbontás romlása miatt az NDF-emésztés hatékonysága csökkenhet. E hatás többnyire mérsékelt marad, ha a pH-eltérés nem kifejezett, az adag peNDF-ellátása megfelelő, és a bendő savterhelését a nyál pufferkapacitása, valamint a VFA-felszívódás és a bendőpasszázs kompenzáló mechanizmusai még ellensúlyozni tudják. SARA akkor alakul ki, amikor e kompenzáció huzamosan vagy ismétlődően elégtelenné válik, és a bendő-pH naponta órákon át a kedvező tartomány alá süllyed. A szakirodalomban gyakran hivatkozott, irányadó küszöbértékek szerint a SARA kockázata nő, ha a bendő pH-ja napi 5-6 óránál hosszabb ideig 5,8 alatt (Zebeli és mtsai., 2012), illetve több mint 3 órán át 5,6 alatt marad (Plaizier és mtsai., 2008). A jelenlegi szakmai megközelítés szerint azonban a bendőacidózis nem egyetlen határértékhez köthető állapot, hanem időben alakuló, dinamikus folyamat, amelynek megítéléséhez a pH-időgörbe mellett a VFA-, az ammónia- és – adott esetben – a laktátdinamika értékelése is szükséges (Golder és Lean, 2024).
- **Huzamosan alacsony, kb. 5,5 körüli bendő-pH mellett** a rostbontás a közel semleges állapothoz képest számottevően gyengülhet, a mikrobaközösség összetétele átrendeződhet, és a VFA-profil módosulhat. Gyakori tendencia, hogy az acetát aránya csökken, míg a propionáté nő, részben azért, mert a keményítő- és a cukorbontó mikrobák egy része jobban tolerálja a savasabb bendőkörnyezetet, mint a rostbontó

mikroorganizmusok. Mint korábban említettük, a propionátképződés csökkentheti a metanogenezis hidrogénellátottságát, de ez önmagában még nem garantál tartós CH_4 -csökkentést.

- **Extrém savas, 5,3 alatti pH-tartományban** a pH, a VFA-profil és a metanogenezis közötti kapcsolat már nem feltétlenül követ egyszerű lineáris mintázatot. Russell (1998) in vitro vizsgálatában a pH 6,5-ről 5,3 felé történő csökkentése – roppantott kukorica fermentációja esetén – az acetát:propionát arány és a CH_4 -termelés mérséklődésével járt, 5,3 alatt azonban az acetát:propionát arány ismét erőteljesen emelkedett, és jelentős hidrogénfelhalmozódás jelent meg. Ilyen savas közegben a rostbontás súlyosan gátolt lehet, a fermentációs mintázat destabilizálódhat, a rendszer pedig már nem a kontrollált propionáteltolódás logikáját követi.

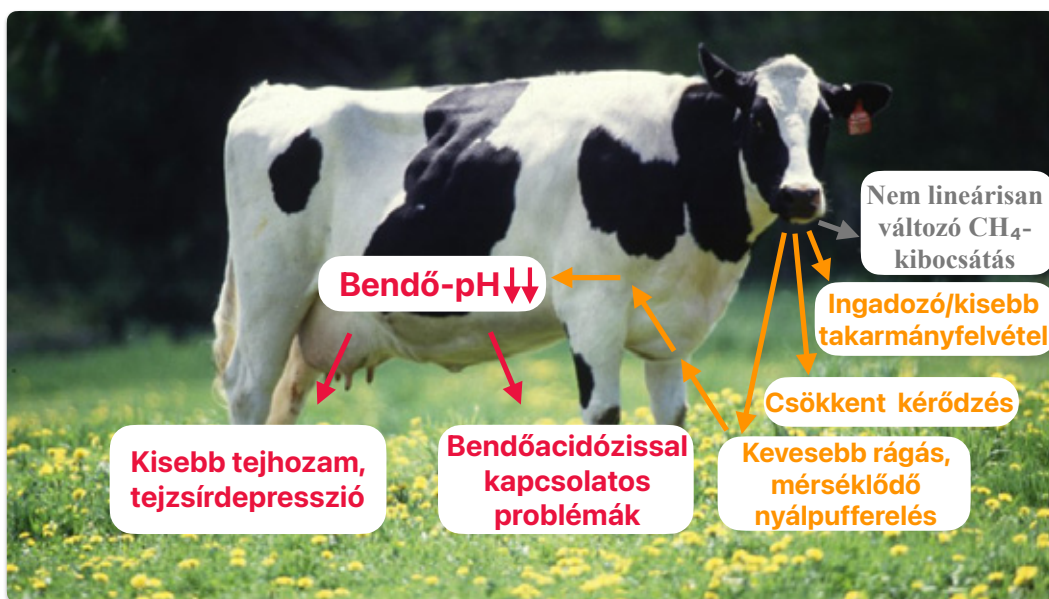


A bendő pH-ja legalább két, egymással részben összefonódó mechanizmuson keresztül befolyásolhatja az enterális CH_4 -képződést. Egyrészt a semleges kémhatásnál valamelyest alacsonyabb, megközelítőleg 5,8–6,0 közötti pH-tartományban – különösen nagyobb keményítőhányadú adagok mellett – gyakran nő a propionát aránya a VFA-profilon belül, másrészt az erősen savas, 5,5 körüli vagy az alatti pH már közvetlenül is gátolhatja a metanogenezist. Ám – amint azt Russell (1998) vizsgálati eredményei is alátámasztják – ebből nem következik, hogy a bendő pH-jának csökkenése szükségszerűen az enterális CH_4 -termelés mérséklődésével járna. Így a CH_4 -kibocsátás visszafogására irányuló, bendő-pH-hoz kapcsolódó takarmányozási beavatkozások szakmai célja nem a SARA-közeli fermentációs állapot előidézése, hanem a rostdomináns állapothoz képest propionátosabb irányba tolódó, kontrollált, stabil fermentáció fenntartása. A bendő kémhatásának



tudatos csökkentése önmagában azért sem tekinthető eredményes CH_4 -mérséklési stratégiának, mivel in vivo hatása nem elkülönülten érvényesül, hanem a VFA-profil, a rostemészthetőség, a passzázssebesség, a VFA-felszívódás, valamint a mikrobiális adaptáció

és a hidrogénforgalom változásain keresztül. Mindezek alapján a bendő-pH csak korlátozott mértékben magyarázza a CH_4 -emisszió alakulását (Hünerberg és mtsai., 2015).

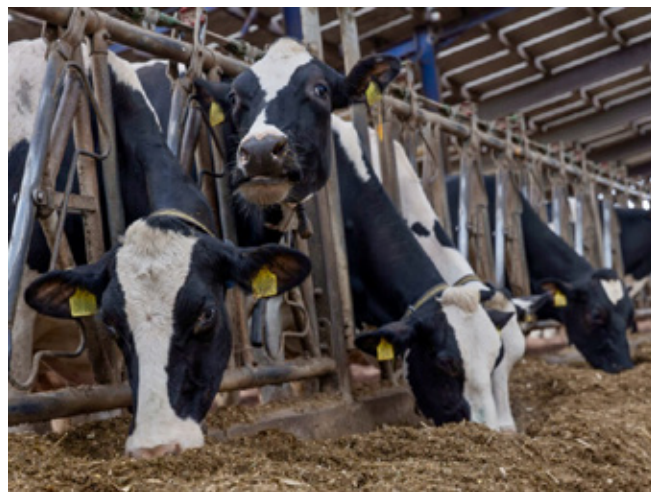


A szénhidrátforrások fermentációs sajátosságai és a VFA-profil alakulása

A bendőben keletkező főbb VFA-k arányára – és ezen keresztül a CH_4 -képződés feltételrendszerére – nem pusztán a felvett szénhidrát mennyisége van hatással, hanem az egyes szénhidrátcsoportok (sejtfaleredetű strukturális szénhidrátok, keményítő, vízben oldható szénhidrátok, valamint pektinben gazdag, nem keményítőeredetű poliszacharidok) aránya, illetve lebomlásuk sebessége és mértéke is.

A **strukturális sejtfalészénhidrátok** – főként a cellulóz és a hemicellulóz – a nem rostjellegű szénhidrátokhoz képest általában lassabban bomlanak le a bendőben, hasznosulásuk mértékét pedig nagymértékben befolyásolja a rost emészthetősége – ezen belül különösen a lignifikáltság mértéke –, valamint a takarmány bendőbeli tartózkodási ideje. E sajátosságok következtében **fermentációjuk jellemzően acetátdominánsabb VFA-mintázattal és így magasabb acetát:propionát aránnyal jár**, ami a metabolikus hidrogén bendőbeli forgalmán keresztül **kedvezőbb feltételeket teremthet az enterális CH_4 -képződés számára**, mint a viszonylag propionát-gazdagabb erjedés. A tényleges CH_4 -kimenetet ugyanakkor a rostemészthetőségen, a bendőbeli tartózkodási időn és a VFA-profil eltolódásán túl a bendőkörnyezet stabilitása, illetve a metabolikus hidrogén különböző elektronelnyelő útvonalak –

például a metanogenezis, a propionátszintézis, a telítetlen zsírsavak biohidrogénezése vagy a mikrobiális biomassa-képződés – közötti megoszlása is alakítja. (A rost szerepét következő írásunkban részletesen tárgyaljuk.)



A **keményítő** bendőbeli bonthatósága – és ezen keresztül a VFA-profilra gyakorolt hatása – rendkívül változékony, mivel azt nemcsak a felvett mennyisége, hanem a forrása, annak szerkezeti sajátosságai (például a gabonaszem endospermiumának üvegeessége és a fehérjemátrix felépítése), feldolgozottsága, nedvességtartalma, tárolási módja és a mikrobiális adaptáció is befolyásolja. A lisztesebb szemszerkezetű gabonák (elsősorban a búza és az árpa) keményítője



rendszerint gyorsabban és nagyobb mértékben fermentálódik, mint az üvegebb, prolaminnal gazdag endospermiumú gabonáké (például a kukoricáé vagy a ciroké). A feldolgozási mód – darálás, roppantás, pelyhesítés stb. – szintén lényeges, mert a feldolgozatlan szemhez képest általában növeli a keményítőszemcsék mikrobiális hozzáférhetőségét, csakúgy, mint a nagyobb nedvességtartalom, az erjesztéses tartósítás, valamint a tárolási idő előrehaladása. Mindezek mellett az adag egészének összetétele és a bendő amilolitikus kapacitása is számottevő hatással van a keményítő bendőbeli hasznosulására; az utóbbi részben a mikrobiom adott keményítőforráshoz való aktuális alkalmazkodottságát tükrözi (Oba és Allen, 2003).

A keményítő lebomlása során acetát, propionát és butirát egyaránt képződik, de a gyorsabban fermentálódó **keményítőforrások a VFA-profil többnyire propionátban gazdagabb irányba tolják, miközben csökken az acetát:propionát arány. Egyes helyzetekben a butirát aránya is emelkedhet.** A propionátképződés relatív fokozódása nemcsak az enterális CH_4 -kibocsátás mérséklése szempontjából lehet kedvező, hanem – a propionát glükogénprekursor szerepe révén – a glükoneogenezis fokozásán és ezen keresztül a laktózképződés támogatásán át a tejtermelés számára is előnyös lehet. E hatás azonban csak addig érvényesül, amíg a bendő-pH stabilitása

fennmarad, vagyis nagy mennyiségű, gyorsan fermentálódó keményítő etetése nem idéz elő olyan mértékű savképződést, amely rontja a rostemésztést és a tejszírszintézis feltételeit.

Ha a savképződés üteme tartósan meghaladja a nyál bikarbonát- és foszfátpufferrendszerének, a VFA-felszívódásnak, valamint a bendőtartalom passzázsának együttes kompenzációs kapacitását, a bendő kémhatása a közel semleges, stabil tartományhoz képest számottevően csökkenhet, és a napi pH-ingadozás fokozódhat. Ennek következtében visszaeshet a cellulolitikus aktivitás, gyengülhet az NDF-emészthetőség, szélsőséges esetben pedig a laktát felhalmozódása tovább gyorsíthatja a savasodást. Ilyen körülmények között nő a SARA kockázata, és tejsírdepresszió alakulhat ki, vagyis az esetleges CH_4 -előnyt könnyen ellensúlyozhatja a takarmányhasznosítás romlása.

A gyakorlatban ezért nem a keményítőarány túlzott emelése kívánatos, hanem **olyan adag kialakítása, amelyben a jó emészthetőségű rost a kedvező energiahasznosuláshoz, a megfelelő fizikai hatékonyságú rost pedig a bendő-pH stabilitásának fenntartásához járul hozzá, miközben a kellő mennyiségű, bendőben jól lebontható keményítő a fermentációt kontrolláltan a propionátarány növekedése felé tereli.**



A **vízben oldható szénhidrátok** (water soluble carbohydrates, WSC: például cukrok, fruktánok és egyes vízoldható oligoszacharidok) bendőbeli hatása forrásfüggő, mivel lebomlásuk üteme és az általuk kiváltott VFA-válasz sem azonos: az egyszerű cukrok

etetést követően általában gyorsabb és koncentráltabb savtermelési választ válthatnak ki, míg egyes oldható oligo- és poliszacharidok, különösen a fruktánok, lassabban emészthetők, és kedvezőbb pH-válással társulnak. **Cukorkiegészítés hatására a**



butirát aránya gyakran markánsan megemelkedik (Ravelo és mtsai., 2022), miközben a bendő-pH alakulása változó, de a keményítő részleges kiváltásakor nem szükségszerűen kedvezőtlen. Bizonyos körülmények között **a propionát aránya is növekedhet, ez azonban kevésbé tekinthető általános válasznak**, és inkább stabil bendőkörnyezetben, megfelelő adagösszetétel és mikrobiális adaptáció mellett valószínűbb. Túl alacsony pH mellett ugyanakkor a fermentációs instabilitás, szélsőségesebb esetben pedig a laktát felhalmozódása kerülhet előtérbe.

Átmeneti szénhidrátbőség idején a WSC egy része mikrobiális tartalékszénhidrátként – főként glikogén formájában – ideiglenesen raktározódhat, ami rövid távon tompíthatja a savtermelési csúcsokat, de önmagában nem tekinthető általános, megbízható pH-védő mechanizmusnak (Hackmann és Firkins, 2015).

Gyakorlati szempontból a különböző WSC-források – például a melasz, a szacharóz vagy a tejsavó-eredetű cukrok – nem önálló CH_4 -csökkentők, hanem **kontrollált mennyiségben, megfelelő mikrobiális adaptáció mellett alkalmazható, adagszintű „finomhangoló eszközök”**. Szerepük elsősorban a keményítő részleges kiváltásában, az NFC-profil alakításában, valamint a VFA-mintázat mérsékelt módosításában lehet; de kedvező körülmények között az energia- és nitrogénellátás időbeli összhangját

is támogathatják (Oba, 2011; Chibisa és mtsai., 2015; Hatew és mtsai., 2015). (NFC: *non-fibre carbohydrates – nem rostjellegű szénhidrátok: keményítő + WSC + egyéb könnyen fermentálható, NDF-en kívüli szénhidrátok.*)

A **pektinben gazdag takarmánykomponensek** a bendőben rendszerint nagymértékben és viszonylag gyorsan alakulnak át, de fermentációs dinamikájuk és „VFA-kimenetük” nem azonos a különböző WSC-forrásokéval. VFA-profiljuk a gabona-keményítőforrásokhoz képest többnyire acetátban gazdagabb, gyakran a butirátarány emelkedésével társul. A tényleges VFA-megoszlást ugyanakkor a pektinforrás, az adag teljes szénhidrátprofilja, a bendő-pH stabilitása és a mikrobiális adaptáció együtt alakítja (Sun és mtsai., 2022).

A pektin sajátos biokémiai vonása, hogy metilészter-csoportjainak lehasítása során metanol szabadulhat fel, amely a bendőben egyes metilotróf metanogének – köztük a *Methanospaera* nemzetség és a *Methanomassiliicoccales* rend tagjai – számára szubsztrátként szolgálhat. A pektinforrások CH_4 -hatását mindazonáltal nem célszerű kizárólag a metanolképző potenciáljuk alapján megítélni; értékelésükhöz az adag teljes fermentációs összképét, különösen a VFA-profil, a pH-stabilitást és a rostemésztés alakulását is figyelembe kell venni.

Tömegtakarmány:abrák arány – finomhangolás, nem túlzott eltolás

Az előbbieket alapján, ha az adagban nő a gyorsan fermentálható szénhidrátok – főként a keményítő és a WSC – mennyisége, akkor a bendő VFA-profiljában általában emelkedik a propionát aránya. Ilyenkor a keletkező redukálópotenciál nagyobb része hasznosul a propionátképződésben, így elvileg csökken az enterális metanogenezishez rendelkezésre álló hidrogén (és formiát) mennyisége. E potenciális CH_4 -mérséklő hatás azonban csak akkor lehet tartósan kedvező, ha közben a megfelelő pNDF-ellátás biztosított, ami elősegíti a bendő pH-jának viszonylagos stabilitását. Amennyiben azonban a gyorsan fermentálható szénhidrátok mennyisége olyan szintet ér el, hogy a szerves savak képződésének üteme eléri vagy meghaladja a saveltávolítás és -semlegesítés együttes kapacitását, a bendő pH-ja a stabil, közel semleges tartományhoz képest csökkenhet, napi ingadozása pedig fokozódhat. Ilyen körülmények

között a cellulolitikus aktivitás visszaesése miatt gyengülhet az NDF-emésztés, nőhet a SARA kockázata, kedvezőtlenül módosulhat a bendőműködés, visszaeshet a tejtermelés, és tejszírszindrómák alakulhatnak ki. Ez CH_4 -szempontból azért különösen lényeges, mert a tej zsírtartalmának, illetve ezen keresztül az energiakorrigált tej (energy-corrected milk, ECM) és a zsír- és fehérjekorrigált tej (fat- and protein-corrected milk, FPCM) mennyiségének csökkenése miatt a CH_4 -intenzitás (CH_4/ECM vagy CH_4/FPCM) még akkor is emelkedhet, ha a CH_4 -hozam (CH_4/DMI) közben kismértékben mérséklődik. (Tekintettel arra, hogy az ECM és az FPCM ebben az összefüggésben hasonlóan értelmezhető, az egyszerűség kedvéért a továbbiakban csak az ECM-re hivatkozunk.) Fontos továbbá, hogy a propionáthányad növekedése önmagában nem eredményez szükségszerűen arányos és tartós CH_4 -csökkenést, mivel a tényleges fermentációs kimenetet



nemcsak a VFA-arányok, hanem több egyéb tényező is alakítja, például a passzázs sebessége, a VFA-k felszívódásának dinamikája, valamint a keletkező hidrogén különböző redukciós útvonalak közötti megoszlása.

A bendóacidózis ezért nem pusztán pH-csökkenésként írható le: szervesen hozzátartozik a VFA-, az ammónia- és – esetenként – a laktátviszonyok időbeli változása, valamint a mikrobiális ökoszisztéma egyensúlyának felbomlása is (Golder és Lean, 2024). Ezzel összefüggésben az NDF-emésztés romlása miatt nőhet a bendőben le nem bontott, de a trágyában még fermentálható szerves anyag mennyisége, ami telepi körülmények között hozzájárulhat a trágyaeredetű CH₄-kibocsátás fokozódásához.



A koncentrátumarány növelésének lehetséges CH₄-csökkentő hatását közvetve jól szemlélteti Aguerre és mtsai.-nak (2011) in vivo vizsgálata: amikor a tömegtakarmány:koncentrátum arányt rostban gazdagabb irányba tolták el (47:53 → 68:32), a napi CH₄-kibocsátás 538-ról 648 g/napra, a CH₄-intenzitás pedig 14,4-ről 18,0 g CH₄/kg ECM-re emelkedett, miközben a bendő pH-ja lineáris növekedést mutatott. Mivel ugyanebben a kísérletben a DMI és az ECM nem változott számottevően, az eredmények arra hívják fel a figyelmet, hogy a nagyobb tömegtakarmány-arány kedvező bendő-pH mellett is fokozhatja a metanogenezist, vagyis a bendőstabilitás javulása és a CH₄-kibocsátás mérséklése nem szükségszerűen jár együtt.

A koncentrátumarány emelésének nettó hatását nemcsak a propionátarány eltolódása, hanem – az előbbiekben felsorolt tényezők mellett – a kiváltott tömegtakarmány-helyettesítés foka is befolyásolja. A koncentrátumok ugyanis nagyobb energiasűrűségük révén a tömegtakarmány egy részét kiszoríthatják, melynek mértéke meghatározza a DMI, az ECM és ezeken keresztül a fajlagos CH₄-mutatók alakulását. A

helyettesítési ráta – vagyis az, hogy 1 kg koncentrátum-DMI-többlethez mekkora tömegtakarmány-DMI-csökkenés társul – magasabb kiegészítési szinten általában nagyobb, de ezt az adag összetétele, a tömegtakarmány minősége és az állat felvételi potenciálja is módosítja.

Kis vagy közepes abrakkiegészítés mellett a helyettesítési ráta rendszerint alacsony, tehát a tömegtakarmány-felvétel csak korlátozottan esik vissza, miközben a teljes DMI és sok esetben az ECM is emelkedik. A $CH_4/ECM = (CH_4/DMI) \times (DMI/ECM)$ azonossággal leírható CH₄-intenzitás így már akkor is mérséklődhet, ha az ECM növekedése meghaladja a DMI változását, és e hatás tovább erősödhet, ha a CH₄/DMI is csökken. Ha viszont a DMI és az ECM nagyjából arányosan változik, továbbá a CH₄/DMI sem módosul számottevően, akkor a CH₄/ECM lényegében változatlan marad.

Az adag abrakhányadának további növelésekor a tehének energiaigénye kisebb tömegtakarmány-felvétellel is kielégíthető, miközben a teljes DMI érdemben nem feltétlenül módosul. Ilyenkor a felvett szárazanyagban belül gyakran csökken a strukturális rost aránya, ami rövidebbé teheti a rágás és a kérődzés idejét, rontva ezáltal a nyálpufferelést és a bendő-pH stabilitását. Ezzel párhuzamosan – ha a fermentáció propionátosabb irányba tolódik – a CH₄-hozam (CH₄/DMI) is mérséklődhet (Olijhoek és mtsai., 2022). Ez azonban nem jelenti szükségszerűen azt, hogy a napi abszolút CH₄-kibocsátás, a CH₄-hozam és a CH₄-intenzitás mindegyike azonos irányban és mértékben változik; ezért a fajlagos és az abszolút mutatókat együtt célszerű értelmezni.

Összegezve a leírtakat, **a CH₄-kibocsátás mérséklése nem az abrakarány túlzott emelésén, hanem a rostminőség, a peNDF-ellátás és a keményítő-terhelés összehangolásán múlik.** Ennek feltétele a **jó emészthetőségű tömegtakarmány, a bendő-pH stabilitását fenntartó peNDF-ellátás, valamint olyan keményítőforrás és -szint alkalmazása, amely a rostdomináns állapothoz képest propionátosabb fermentációt eredményez, de nem idéz elő számottevő és tartós pH-csökkenést vagy túlzott napi pH-ingadozást.**

A felhasznált források listáját a cikk terjedelmi korlátai miatt nem közöljük, az a szerkesztőségben érhető el.

