



TAKARMÁNYOZÁS A METÁN- CSÖKKENTÉS SZOLGÁLATÁBAN I.

TAKARMÁNYFELVÉTEL ÉS -HASZNOSÍTÁS

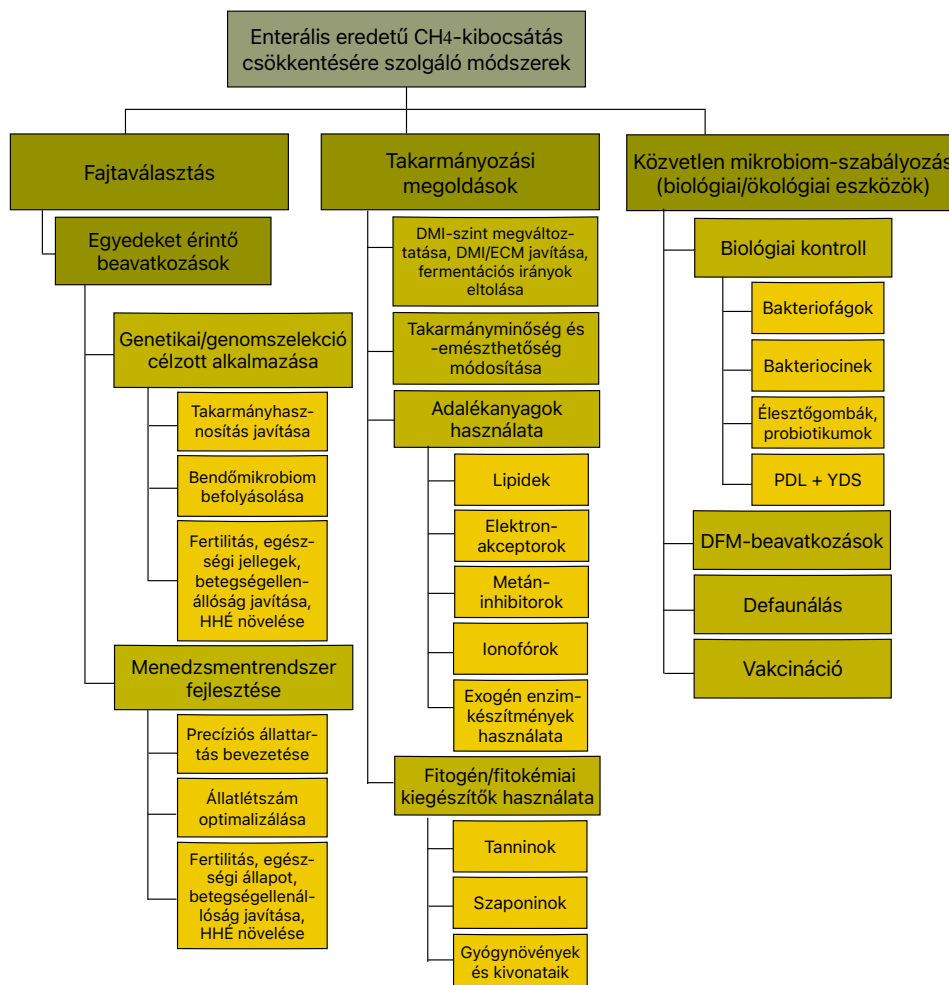
Szakértő
munkatársunk írása
Állattenyésztési
Teljesítményvizsgáló Kft.

Az enterális metán- (CH_4 -) kibocsátás mérséklésére nincs egyetlen „csodamegoldás”; e cél elérését több, egymástól jól elkülöníthető eszközcsoport szolgálja. Egy részük az öröklődő tulajdonságokra építő, célzott szelekción alapul – ezt korábbi számainkban már részletesen tárgyaltuk –, míg mások takarmányozási és telepi menedzsmenteszközökkel, illetve a bendőmikrobiom közvetlen befolyásolásával próbálják mérsékelni a CH_4 -képződést. (Lásd az 1. ábrát.) Az egyes stratégiák az általuk elérhető emisszió-csökkenés mértékében, tartósságában és időbeli lefutásában is különböznek egymástól: vannak gyors eredményt adó, de rendszeres alkalmazást igénylő megoldások, valamint lassabban ható, ugyanakkor tartósabb, kumulatív előnnyel járó beavatkozások is.

Jelen és soron következő írásainkban a telepi gyakorlatban leginkább befolyásolható, takarmányozáshoz kapcsolódó módszereket tekintjük át. Ezek azonban csak akkor tekinthetők valóban kedvezőnek, ha alkalmazásuk nem veszélyezteti a bendőműködés stabilitását, továbbá nem jár az állategészség vagy a tejtermelés romlásával.



1. ábra: Lehetőségek az enterális CH₄-kibocsátás mérséklésére



Megjegyzés: HHÉ: hosszú hasznos élettartam; DMI: szárazanyag-felvétel; ECM: energiakorrigált tejmenyiség; PDL (plant-derived liquid): növényi eredetű folyadék; YDS (yeast-derived surfactant): élesztőből származó felületaktív anyag; DFM (direct-fed microbes): közvetlenül adagolt mikrobiális készítmények. Forrás: Saját összeállítás.

1. Fermentációs irányok és enterális CH₄-termelés: mi mozgatja a rendszert?

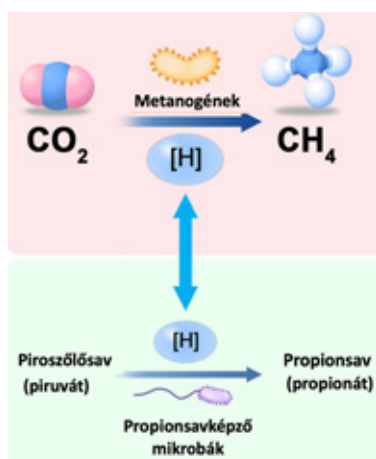
A takarmány mikrobiális lebontása során a bendőben többféle végtermék keletkezik: illó zsírsavak (volatile fatty acids, VFA-k), ammónia és egyéb nitrogéntartalmú vegyületek, szén-dioxid, hidrogén, CH₄, mikrobiális biomassa stb. (A továbbiakban a szerves savakat az anionos [disszociált] formájuk szerint jelöljük: például ecetsav → acetát, propionsav → propionát, vajsav → butirát.) A VFA-k a kérődzők elsődleges energiaforrásai, melyek közül rendszerint az acetát, a propionát és a butirát dominál. E metabolitok a tejösszetevők képzésében is meghatározó szerepet töltenek be: az acetát és részben a butirát a tejszír *de novo* szintézisének fő prekursorai, míg a propionát a máj glükoneogenezisének kulcsszubsztrátja. A VFA-profil alakulását döntően az adag összetétele és fermentálhatósága határozza meg.

Az enterális CH₄-termelés szempontjából a kulcskérdés az, hogy az erjedés során felszabaduló hidrogén mely anyagcsereutakban hasznosul tovább. Az acetát- és

butirátképződés nettó hidrogéntermelő folyamat, ezért e végtermékek dominanciája több hidrogént tesz elérhetővé a metanogén mikroorganizmusok (elsősorban az archeák) számára. A metanogenezis mintegy biztonsági szelepként működik: a hidrogén egyik fő felhasználási irányaként segít fenntartani a kedvező redoxviszonyokat, ezáltal stabilizálja a bendőműködést és támogatja a szénhidrátok lebontását. A propionátképződés ugyanakkor nettó hidrogénfelhasználó folyamat, így ha ez vagy más alternatív elektronnyelő reakcióutak kellően aktívak, szűkül a CH₄-termelés hidrogénellátása. A fermentáció alapvetően ilyenkor is zavartalan marad, csupán a végtermékek aránya és a hidrogén „elosztása” rendeződik át a metanogenezis rovására. A rostbontás romlása tipikusan akkor jelentkezik, ha a propionátirányú eltolódás olyan kísérő hatásokkal jár együtt, mint a bendő pH-jának tartós csökkenése, a passzázs idő rövidülése vagy a cellulolitikus mikrobák aktivitásának visszaesése.



2. ábra: Metanogenezis és propionátképződés: versengés a hidrogénért



Forrás: Wang és mtsai, 2023.

A takarmányozáson alapuló CH_4 -méréselési módszerek a következő főbb típusokba sorolhatók: 1. a DMI-szint módosítása és a takarmányhasznosítás javítása; 2. a takarmányminőség és -emészthetőség

megváltoztatása; 3. a bendőfermentáció irányának befolyásolása és/vagy a metanogenezis visszaszorítása takarmányadalékok és növényi kiegészítők használatával.



2. Szárazanyag-felvétel: a CH_4 -kibocsátás kulcsváltozója

A takarmányozási stratégiák értékelésének **első lépése annak tisztázása, hogy mely mutatóra fókuszálunk: a napi (abszolút) CH_4 -kibocsátásra, a CH_4 -hozamra** (napi CH_4 -kibocsátás/DMI; a továbbiakban: CH_4 /DMI) vagy **a CH_4 -intenzitásra** (napi CH_4 -kibocsátás/ECM, illetve napi CH_4 -kibocsátás/FPCM; jelölésük: CH_4 /ECM és CH_4 /FPCM). Erre azért van szükség, mert ugyanaz a beavatkozás eltérő irányban és mértékben módosíthatja az egyes kimeneteket. (ECM [energy-corrected milk]: energiakorrigált tejmenyiség; FPCM [fat- and protein-corrected milk]: zsír- és fehérjekorrigált tejmenyiség; az egyszerűség kedvéért a továbbiakban csak az előbbit használjuk.)

A CH_4 -képződés szorosan összefügg a takarmányfelvétellel, különösen a DMI-vel: nagyobb felvétel mellett több fermentálható szerves anyag kerül a bendőbe, így a napi CH_4 -kibocsátás rendszerint magasabb, míg kisebb DMI esetén mérséklődik.



A tejhasznú szarvasmarhák klímahatását többnyire a tejtermeléshez viszonyítva értékelik, ezért **a CH_4 esetében a CH_4 -intenzitás (CH_4 /ECM) tekinthető elsődleges változónak.** Ez **a következő tényezők szorzata: CH_4 /ECM = (CH_4 /DMI) x (DMI/ECM);** tehát két, egymással kombinálható úton mérsékelhető: a CH_4 -hozam (CH_4 /DMI) visszafogásával és/vagy a takarmányhasznosítás javításával (DMI/ECM $\downarrow$). (Megjegyzendő, hogy aránymutatóként a CH_4 -intenzitás elvileg akkor is kedvező irányba mozdulhat, ha a tejtermelés százalékos visszaesése kisebb, mint a napi [abszolút] CH_4 -kibocsátásé. Ez azonban nem tekinthető kívánatos stratégiának, hiszen a cél nem a termelés visszafogásával, hanem a stabil vagy növekvő tejhozam mellett elérhető emissziócsökkenés.)

A továbbiakban a CH_4 -intenzitás mérséklésének DMI-hez köthető beavatkozásait tekintjük át, kiemelve azok eltérő hatékonyságát. Fontos hangsúlyozni, hogy a különféle módszerek gyakorlati kimenetele – a takarmányfelvétel, a bendőfermentáció és a termelési válaszok kapcsolatrendszerének összetettsége miatt – számos tényező függvénye, így nem minden esetben jelezhető előre egyértelműen. A következőkben ezért elsősorban azokat az összefüggéseket és várható hatásirányokat mutatjuk be, amelyek mentén a megfigyelt változások értelmezhetők, miközben a telepi tapasztalatokat mindig a helyi körülmények figyelembevételével indokolt értékelni.



2.1. Precíziós takarmányfelvétel-korrektció

A gyengébb takarmányhasznosítású, „túlfogyasztásra” hajlamos egyedeknél lehetőség nyílik a takarmányfelvétel irányított visszafogására (precíziós korrektció). Ez akkor tekinthető – klímaszempontból is – eredményesnek, ha a tejtermelés nem romlik számottevően, és egységnyi ECM-hez kisebb DMI társul (DMI/ECM ↓). A napi CH_4 -kibocsátás ilyenkor többnyire követi a DMI-alakulását, míg a CH_4 -hozam (CH_4/DMI) csak kismértékben változik, mivel a beavatkozás általában nem alakítja át érdemben az adag összetételét és ezzel a bendőfermentáció jellegét; elmozdulásának irányát pedig a passzázsidoő, az emészthetőség és a bendő-pH alakulása befolyásolja. A DMI visszafogása okozta hatások helyes értelmezéséhez a laktációs stádiumot is mindig célszerű figyelembe venni, hiszen a tejtermelés természetes alakulása a DMI/ECM mutatót a beavatkozástól függetlenül is módosíthatja.



A DMI-korrektcióból származó előny ugyanakkor nem korlátlan: a takarmányfelvétel túlzott visszafogása esetén sérülhet az állatok energiaellátása és a bendőfermentáció stabilitása. Tartósan alacsony DMI mellett a passzázs lassulhat, a takarmány tovább időzik a bendőben, a rost elnyújtott fermentációja

pedig – a metanogenezisnek kedvezve – emelheti a CH_4 -hozamot (CH_4/DMI). Ha ehhez elégtelen peNDF-ellátás és/vagy túl magas abrakhányad társul, csökken a rágás és a kérődzés, gyengül a nyál természetes pufferhatása, nő a bendő-pH ingadozása, illetve emelkedik a SARA kockázata – ami instabillá teheti a tejtermelést. (peNDF: *physically effective neutral detergent fibre* – fizikailag hatékony neutrális detergens rost; SARA: *subacute ruminal acidosis* – szubakut acidózis.) Ilyen helyzetben az ECM csökkenése arányaiban nagyobb lehet, mint a DMI mérséklődése (DMI/ECM ↑), és a CH_4 -intenzitás kedvezőtlen irányba tolódhat (CH_4/ECM ↑) – még akkor is, ha a napi abszolút CH_4 -kibocsátás rövid távon átmenetileg alacsonyabb.



Továbbá a tartós, túlzott restriktio fokozhatja a testtartalekok mobilizációját és a metabolikus terhelést, gyengítheti az immunműködést, valamint növelheti a fertilitási problémák előfordulását. Mindez a selejtezési arány és az üszőutánpótlási igény emelkedésén keresztül állomány- és életciklusszinten is ronthatja a kibocsátási mérleget. A precíziós DMI-korrektció ezért csak akkor indokolt, ha biztosított a megfelelő energia- és strukturálisrost-ellátás, a bendőfermentáció stabil, és a tejtermelés nem csökken érdemben.

2.2. Fermentációs irányváltás

A CH_4 -intenzitás nemcsak a takarmányfelvétel visszafogásával, hanem a bendőfermentáció „irányításával” is mérsékelhető. Ha az erjedés során keletkező redukáló potenciál nagy hányada nem a metanogenezisben hasznosul, hanem alternatív útvonalakban (például a propionáttermelésben) és a mikrobiális biomassa felépítésében kötődik le, akkor a CH_4 -képzés hidrogénellátása beszűkül. Ennek

következtében a metanogenezis súlya csökken a fermentációban, ami a CH_4 -hozam (CH_4/DMI) mérséklődéséhez vezethet.

Tipikus példa erre a **takarmányadag koncentrációm-arányának (abrakhányadának) növelése**. Ennek részleteire a következő írásunkban térünk vissza; itt csak annyit emelünk ki, hogy a többletkoncentrátum



– nagyobb energiasűrűsége és telítő hatása miatt – részben kiválthatja (helyettesítheti) a tömegtakarmányt, miközben a fermentációs környezetet is módosítja. A DMI alakulását ezért döntően a helyettesítés mértéke szabja meg. **Mérsékelt abrakkiegészítésnél** (kiváltás < 1:1) a tömegtakarmány-felvétel csak korlátozottan esik vissza, így a DMI és gyakran az ECM is emelkedik. Ezzel párhuzamosan a CH_4 -intenzitás többnyire mérsékelten javul: a hatás nagyságát az dönti el, hogy az ECM mennyivel nő a DMI-hez képest, illetve társul-e hozzá kisebb CH_4 /DMI-csökkenés. Ha a DMI nagyjából az ECM-mel arányosan változik (DMI/ECM közel állandó), a CH_4 -intenzitás lényegében nem módosul.

Magasabb abrakarány mellett viszont a DMI – az erőteljesebb tömegtakarmány-kiszorítás miatt – közel stabil marad, miközben az ECM a nagyobb energiasűrűség hatására emelkedik (DMI/ECM ↓). Ezt gyakran kiegészíti a fermentáció propionátképződés irányába való eltolódása, ami mérsékelheti a CH_4 /DMI-t, és összességében a CH_4 -intenzitás határozott csökkenésével járhat. Extrém esetben előfordulhat, hogy a bendő-pH tartósan alacsonnyá válik és a protozoák száma visszaesik, amelynek következtében a CH_4 -hozam tovább mérséklődik – ez azonban már pH-instabilitásra és SARA-kockázatra utal, így az összhatás mindig a peNDF-ellátás és a telepi menedzsment függvénye. Az abrakarány emelése mindaddig tekinthető kedvezőnek, amíg a bendőműködés stabil marad: elégtelen strukturálisrost-ellátottság és romló pH-stabilitás esetén nő a SARA-kockázat,

az ECM ingadozhat vagy visszaeshet, és a várt intenzitásjavulás nemcsak elmaradhat, hanem akár kedvezőtlen irányba is fordulhat.



A magas abrakarány mellett megfigyelhető mintázatot jól illusztrálja Jiao és mtsai.-nak (2014) kísérlete: legelőn tartott tehenek napi koncentrátumadagjának 2-ről 8 kg-ra emelésekor a DMI csak kismértékben változott, a tejhozam viszont számottevően nőtt, míg a napi CH_4 -kibocsátás lényegében stabil maradt (2; 4; 6; 8 kg abrak/nap szinteken rendre kb. 287; 273; 272; 277 g CH_4 /nap).

2.3. Passzázssebesség mint kiegészítő tényező

Az enterális CH_4 -hozamot rövid távon többek között a takarmány bendőből való továbbhaladásának (passzázsának) sebessége is befolyásolja. Magas DMI és nagy tejtermelés mellett a bendőtelítettség és a folyadékforgalom fokozódása élénkítheti a bendőmotilitást, ami gyorsíthatja a bendőtartalom továbbjutását a recés-százrétűgyomor felé. Egységnyi DMI-re vetítve a CH_4 -képződés akkor mérséklődhet, ha a gyorsabb átáramlás a takarmány bendőben töltött idejét valóban érdemben lerövidíti, különösen a lassabban lebomló rostfrakció esetében. A magas DMI miatt a napi CH_4 -kibocsátás többnyire mérsékelten megemelkedik (több fermentálható szerves anyag kerül a bendőbe), de – ha a passzázshatás vagy a fermentáció végtermékarányainak kedvező eltolódása ellensúlyozza a takarmányfelvétel növekedését – akár változatlan is maradhat.

A metanogenezis szempontjából ezért a kulcskérdés az, hogy a passzázs gyorsulása kiterjed-e az NDF-re is, vagy főként a folyadékfázissal együtt mozgó finom részecskéket érinti. Ez utóbbiak (abrak, apró törmelék) továbbjutása szorosan követi a folyadékforgalom és a DMI változását. A nagyobb, rostos részecskéket ezzel szemben a bendő „rostmatraca” jellemzően visszatartja, és többnyire csak rágás/újrarágás, illetve részleges lebontás után, a továbbhaladáshoz szükséges kritikus méret elérésekor hagyják el a bendőt. Emiatt az NDF passzázsának sebességét sokszor nem a DMI önmagában, inkább a szecskahossz, a takarmány egyéb fizikai tulajdonságai és peNDF-tartalma, az NDF emészthetősége, valamint a bendő-pH szabja meg. Következésképp a „nagyobb DMI → gyorsabb passzázs → alacsonyabb CH_4 /DMI” kapcsolat nem minden vizsgálatban jelenik meg konzisztensen.



Táblázat: Különböző takarmányfelvételi (DMI-) szintek hatása a napi CH₄-kibocsátás, a CH₄-intenzitás, a CH₄-hozam és a tejtermelés alakulására

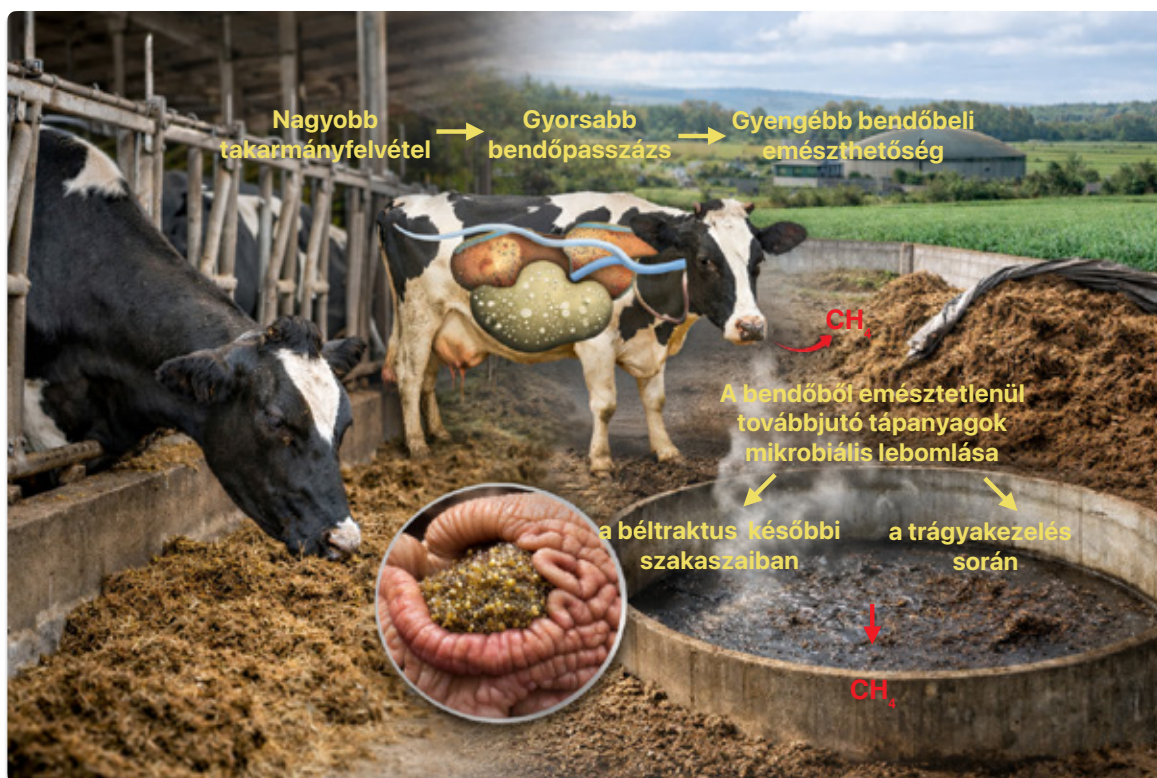
Takarmányfelvételi (DMI-) szint	Napi CH ₄ -kibocsátás	CH ₄ -intenzitás	CH ₄ -hozam	Tejtermelés
Magas (ad libitum; magas ECM-szint mellett)	Általában nő (több fermentálható szerves anyag kerül a bendőbe), de közel változatlan is maradhat (gyorsabb passzázs, alacsonyabb acetát:propionát arány)	Mérséklődhet, ha az ECM növekedésének aránya meghaladja a DMI-ét (DMI/ECM ↓), miközben a CH ₄ /DMI többnyire stabil vagy enyhén csökken; kedvezőtlen bendőviszonyok mellett e javulás elmaradhat	Csökkenhet a fermentáció propionátirányú eltolódása és/vagy a gyorsabb passzázs miatt; ez azonban nem törvényszerű (erősen függ az NDF mennyiségétől/emészthetőségétől, a peNDF-szinttől és a bendő-pH-tól)	Általában nő; elégtelen peNDF-ellátottság és pH-ingadozás mellett a rosthasznosítás romolhat, a SARA-kockázat emelkedhet, a tejtermelés pedig ingadozhat vagy visszaeshet
Optimális/közepes (igény szerinti, precíziós adagolás; a „túlfogyasztás” célzott korrekciója)	Kisebb lehet, főleg a túlfogyasztó, gyengébb takarmányhasznosítású egyedeknél	Jellemzően csökken, ha az ECM stabil (DMI/ECM ↓); plusz előny, ha a CH ₄ /DMI is enyhén javul	Gyakran alig változik, de stabil fermentáció és megfelelő peNDF-ellátás mellett mérséklődhet	Többnyire szinten tartható, a takarmányhatékonyaság javulhat
Alacsony (tartósan szükséglet alatt; nem kívánatos restriktció)	Alacsonyabb, de sokszor nem arányos a DMI-csökkenéssel (adag- és passzázsfüggő)	Nőhet, ha az ECM-visszaesés nagyobb arányú, mint a napi CH ₄ -kibocsátás csökkenése, vagy ha a DMI/ECM romlik (↑)	Nőhet a lassabb bendőpasszázs és a hosszabb fermentáció miatt (főleg rostnál); mértékét az adagösszetétel és a pH-viszonyok szabják meg	Csökken; az energiamérleg romlik, a kondícióvesztés és az egészségi/fertilitási problémák kockázata nő; állományszinten a kieső tej pótlása ronthatja a telepi mérleget

Forrás: Saját összeállítás.

Mindezek alapján a passzázs „gyorsítása” önmagában nem tekinthető megbízható, klímacélú eszköznek. Egyrészt telepi körülmények között csak nehezen kontrollálható, másrészt kedvezőtlen mellékhatásokkal járhat (rosthasznosítás romlása, tejzsírdepresszió, bendő-pH stabilitásának gyengülése, SARA-kockázat növekedése), harmadrészt a romló takarmányhasznosítás miatt több emésztetlen

szerves anyag kerül a trágyába, ami a trágyakezelés ÜHG-kibocsátását növelve rontja az összmérleget. A passzázssebesség változása ugyanakkor a kísérleti és monitoringkörnyezetben hasznos értelmezési keretet adhat a CH₄-hozam rövid távú ingadozásainak magyarázatához. (A trágyakezelésből származó ÜHG-emissiót és az állományszintű kibocsátást a sorozat későbbi részeiben tárgyaljuk részletesen.)

3. ábra: A takarmányfelvétel hatása a CH₄-képződésre



Forrás: Saját szerkesztés.



2.4. A takarmányhasznosítás hatékonyságától a CH₄-intenzitásig és a rendszerszintű klímayereségig

A DMI/ECM mérséklődése tipikusan a takarmányozás finomhangolásával, valamint telepi tartástechnológiai és egészségügyi beavatkozásokkal érhető lehet. Ezek közé tartozik például az adag energia- és fehérjeszintjének termelési szinthez való pontosabb illesztése, a tömegtakarmány minőségének és emészthetőségének (különösen az NDF-emészthetőség) javítása, a TMR szétválogatásának visszaszorítása, a napi etetési gyakorlat stabilizálása, továbbá az állatkomfort és -egészség erősítése (hőstresszcsökkentés, a sántaság és a szubklinikai [tünetmentes] megbetegedések előfordulásának mérséklése stb.). Bár a CH₄-intenzitást a CH₄-hozam is alakítja, a telepi gyakorlatban a takarmányhasznosítás tartós javítása gyakran a legjobban „kézben tartható” út a CH₄/ECM mutató mérséklésére – feltéve, hogy a CH₄-hozam nem romlik érdemben.

A fajlagos kibocsátás kedvező változása hosszabb időtávon, ágazati szinten is dokumentálható. Huhtanen és mtsai. (2022), illetve Ahvenjärvi és mtsai. (2024) Finnország példáján arról számolnak be, hogy 1960 és 2020 között a tejhasznú tehenlétszám 1,15 millióról 258 ezerre esett vissza, miközben az egy tehenre jutó ECM nagyjából háromszorosára nőtt. Ezzel párhuzamosan a tehenenkénti éves CH₄-kibocsátás kb. 80-ról 157 kg CH₄/évre emelkedett, az ország tejhasznú szarvasmarha-állományának teljes CH₄-kibocsátása (tehenek, szárazonállók és utánpótlás/üszők együtt) pedig az 1965. évi csúcscról (≈110 ezer t/év) 2020-ra – a létszámcsökkenés és az ágazat koncentrációdása

mellett – közel 48 ezer t/évre mérséklődött. A fajlagos trendet döntően a takarmányhasznosítás alakulása határozta meg: 1 kg ECM-hez az 1960-as 1,23 kg DMI helyett 2020-ra már 0,82 kg DMI is elegendő volt, míg a CH₄-hozam 1975-ben 24,5, 2020-ban 22,1 g CH₄/kg DMI volt. A CH₄-intenzitás így összességében 36%-kal lett alacsonyabb.

A finn példa jól szétválasztja az egyedi (tehenenkénti) és a rendszerszintű szemléletet, amely ágazati és telepi szinten egyaránt értelmezhető: az egy állatra vetített napi CH₄-kibocsátás akár növekedhet is, miközben az ágazat vagy a telep abszolút CH₄-emissziója csökken (és fordítva). Ennek oka, hogy az összkibocsátást a fajlagos mutatók mellett az állomány mérete és szerkezete (létszám, selejtezési ráta, üszőutánpótlási igény, szárazonállók aránya) is meghatározza. Ezért a CH₄/ECM alacsonyabb értéke önmagában még nem garantálja az abszolút kibocsátás mérséklődését. **Érdemi ágazat- vagy telepszintű klímayereség akkor várható, ha a hatékonyságjavulás lehetővé teszi, hogy ugyanazt a tejmennyiséget kisebb tehen- és utánpótlási létszámmal termeljük meg.** Ez nemcsak az összkibocsátást foghatja vissza, hanem erőforrásokat (takarmányt, férőhelyet, munkaerőt, takarmánytermő területet) is felszabadíthat, ami mozgásteret teremt a további hatékonyságnöveléshez.

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



A Hód-Mezőgazda Zrt. vajhíti tehenészeti telepének fejőháza

