



A KLÍMAVÁLTOZÁS ÁLLAT- TENYÉSZTÉSI VONATKOZÁSAI

LÉGI JÁRMŰVEK, IN VITRO ÉS PROXY MÓDSZEREK: TOVÁBBI ESZKÖZÖK
A SZARVASMARHÁK METÁNKIBOCSÁTÁSÁNAK VIZSGÁLATÁRA

**Szakértő
munkatársunk írása**
Állattenyésztési
Teljesítményvizsgáló Kft.

A szarvasmarhák metán- (CH_4 -) kibocsátásának pontos meghatározása fontos eleme a mezőgazdasági üvegházhatásúgáz- (ÜHG-) emisszió csökkentésére irányuló stratégiáknak. A kutatók ezért folyamatosan dolgoznak az erre szolgáló módszerek bővítésén és fejlesztésén, hogy egyre megbízhatóbb megoldásokkal támogassák a légkörbe kerülő CH_4 mennyiségének mérését, becslését. A rendelkezésre

álló alternatívák jelenleg is széles skálán mozognak, a rovatunkban korábban ismertetett technikáktól kezdve a légi járművekkel végzett méréseken és in vitro vizsgálatokon át a különböző proxy eljárások alkalmazásáig, melyek mindegyike sajátos előnyöket és kihívásokat rejt magában. Jelen cikkünkben az utóbbi három, eddig még nem tárgyalt módszerrel foglalkozunk részletesen.

Légi járművekkel végzett mérések

Az elmúlt évtized során előtérbe került a repülőgépek és a pilóta nélküli légi járművek (unmanned aerial vehicles, UAV-k) használatának lehetősége az állattartó telepek ÜHG- (például CH_4 -) kibocsátásának mérése céljából.

Az erre irányuló kutatások figyelemre méltó példája volt a Kaliforniai Egyetem 2017 és 2020 közötti együttműködése egy tudományos célú légi szolgáltatásokat nyújtó coloradói céggel. A projekt során a repülőgépek több magasságban, koncentrikus, zárt pályákon köröztek a tehenészeti telepek felett, miközben a fedélzetre szerelt műszerek folyamatosan

rögzítették a CH_4 légköri koncentrációját, a légnyomást, a hőmérsékletet, a szélirányt és a szélsébséget (a környezeti paraméterek mérése a földön, az istállók szintjén is megtörtént). A szakemberek a gyűjtött adatok alapján, Gauss divergenciatétele segítségével számították ki a telepek teljes CH_4 -kibocsátását (Conley és mtsai., 2017).

Módszerük lényege abban állt, hogy először a repülés során mért gázkoncentrációkat a légnyomás- és hőmérsékletadatok felhasználásával sűrűségi értékekké konvertálták, majd ezeket és a szélsébséget figyelembe véve meghatározták a



CH₄-fluxus (tehát az adott telep feletti, egységnyi időre és felületre vonatkoztatott gázáramlás) vektorait. Ezt követően kiszámították a pillanatnyi CH₄-fluxust minden zárt repülési pályára, valamint az egységnyi magasságra jutó nettó CH₄-fluxust. Végül az utóbbi eredményeket függőlegesen összegezték, megállapítva ezzel a repülési útvonalak által behatárolt légtér fogat teljes nettó CH₄-fluxusát.



A repülőgépes létesítményi mérésekkel gyorsan és hatékonyan feltérképezhető az emissziók térbeli eloszlása (a függőleges és a horizontális CH₄-kibocsátási profilok), de e járművek széles körű használatát a magas üzemeltetési költségeik korlátozzák. A légi mérések – noha kiterjedt területeket fednek le – nem nyújtanak kellően részletes adatokat, és az ily módon kapott emissziós eredmények csak akkor megbízhatók, ha a vizsgált telepek környékén nincsenek zavaró tényezők, illetve, ha a repülőgépek elég közel tudnak kerülni a kibocsátó forrásokhoz (szarvasmarhákhoz) azok túlzott zavarása nélkül. Az eredmények pontosságát emellett a légköri adatok repülési magasság szerinti extrapolációja is befolyásolja. Továbbá nem feledkezhetünk meg arról sem, hogy a repülési tevékenység maga is ÜHG-kibocsátással jár!



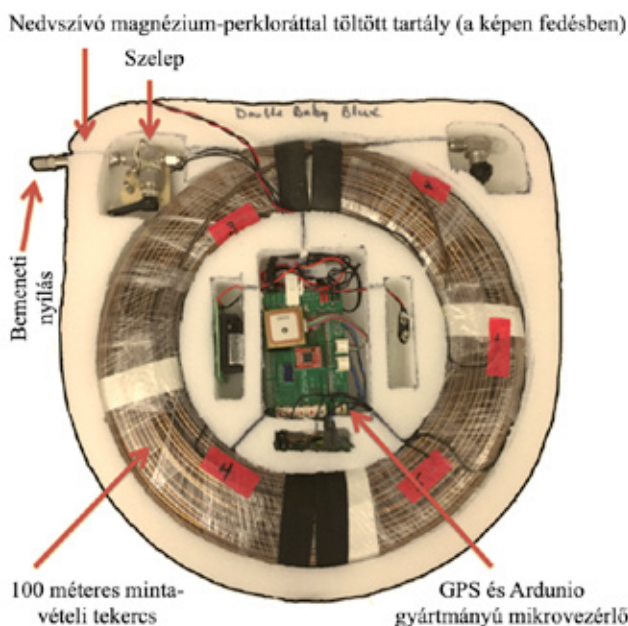
Az UAV-k alkalmazására példaként egy olyan innovatív megoldást említünk, amelynél a légi járművekre

az ún. AirCore-rendszert szerelték fel a tejhasznú tehenészetű telepek CH₄-kibocsátásának mérésére (Vinkovic és mtsai., 2022; Zhu és mtsai., 2024). Ezt a technológiát az Egyesült Államok Nemzeti Óceán- és Légkörkutató Hivatalának (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) egyik munkatársa, Pieter Tans fejlesztette ki az atmoszférikus ÜHG-mérések céljából (Tans, 2009; Karion et al., 2010). Az AirCore a hagyományos, passzív mintavételi rendszerekkel szemben a levegőmintákat nem a légi járművek süllyedésekor, a légköri nyomásváltozást kihasználva gyűjti, hanem a repülés közben egy mikroszivattyú segítségével szívja be azokat a tárolásukra szolgáló, kb. 50–100 méter hosszú, nagyon vékony, spirálisan tekercselt rozsdamentes acélsőbe. Használat előtt ezt a csőszerkezetet szén-dioxiddal vagy egyéb közömbös gázzal töltik fel azért, hogy a környezetből származó CH₄-t és vízpárát eltávolítsák belőle, biztosítva ezzel a rendszer szivárgásmentességét, illetve előkészítve a későbbi analíziseket.



Amikor a légi jármű felszáll, az egyik – ábrán is látható – szelep nyitott állapotban marad, hogy a töltőgáz az acélsőből kiürülhessen. A gép süllyedésekor a mikroszivattyú negatív nyomást hoz létre a rendszerben, amely így aktív módon szívja be a gázmintákat. Ez a folyamat, lévén, hogy lehetővé teszi a különböző magassági szintek és horizontális légrétegek összetételének pontos megismerését, kulcsfontosságú az alsó légköri mérések megfelelő térbeli felbontása és reprezentativitása szempontjából. A befogott levegő a rendszerbe kerülésekor először egy, a nyitott szelephez csatlakozó, kis rozsdamentes acéltartályon halad át, amelynek magnézium-perklorát tartalma leköti annak nedvesgőztartalmát. Végül a jármű földre érkezésekor az AirCore nyitott szelepe az érzékelők jelzésére bezárul, megőrizve a gyűjtött mintákat a későbbi elemzésekhez.





Forrás: NOAA (<https://gml.noaa.gov/ccgg/aircore/>).

A leszállást követően a csőben levő gázokat laboratóriumban spektrométerekkel elemzik, összevetve a kapott eredményeket a repülés során rögzített elektronikus (térinformatikai, légnyomás-, hőmérsékleti stb.) adatokkal. Ennek eredményeként a repülési nyomvonal mentén pontosan lekérdezhető a gázkoncentrációk, és nyomon követhetők azok magasságtól vagy időtől függő változásai.

A különféle légi járművekre (drónokra, meteorológiai ballonokra, repülőgépekre stb.) installálható AirCore-rendszer függőleges és vízszintes mintavételi pályákon, illetve az emissziós források közelében is képes mintavételre. Vinkovic és mtsai. (2022) egy holland tejelő tehenészet felett végeztek légköri CH_4 -molfrakciós méréseket AirCore-ral felszerelt UAV-vel. Tömegmérleg-megközelítést alkalmazva, a vizsgált gazdaságra vonatkozóan 1,1-2,4 g/s CH_4 -emissziós rátát határoztak meg. Miután az összkibocsátásból levonták a helyben keletkező trágya becsült kibocsátási tényezőjét, a tejelő tehenek enterális eredetű kibocsátására 0,20–0,51 kg CH_4 /állategység/nap (1 állategység = 500 kg állattömeg) értéket kaptak. E kutatók megállapítása szerint az UAV-alapú aktív AirCore-rendszer hasznos CH_4 -emissziós becsléseket nyújthat tehenészetek esetén. A mérési adatok megbízhatóságát azonban a szélesebbesség változásai mellett a szélirány és a repülési nyomvonal által bezárt szög is befolyásolhatja. E bizonytalanságokat a helyi szélesebbesség és szélirány pontos mérésével lehet mérsékelni.

Zhu és mtsai. (2024) egy többrotoros UAV-re szerelték fel az AirCore-rendszert, tesztelve annak megbízhatóságát a szélesebbesség és szélirány, valamint a függőleges CH_4 - és szén-dioxid- (CO_2 -) koncentrációs profilok mérése szempontjából. Az UAV-ról származó adatokat egyrészt diszperziós (gázterjedési) modellezéssel kombinálták, hogy meghatározzák egy kaliforniai tehenészeti telep CH_4 -kibocsátását, másrészt összehasonlították egy 11 méter magas meteorológiai torony mérési eredményeivel. Az utóbbi alapján Zhuék azt a következtetést vonták le, hogy a légi járműre szerelt AirCore-rendszer 0,4–1,1 m/s közötti átlagos négyzetes hibával képes mérni a szélesebbességet, ha az 3,5 m/s alatt van; továbbá megbízhatóan rögzíti a CH_4 - és CO_2 -molfrakciók időbeli változásait 10 másodperces vagy hosszabb intervallumokban. Ezért szerintük ez a módszer kiválóan alkalmas a CH_4 -kibocsátás közel valós idejű észlelésére.



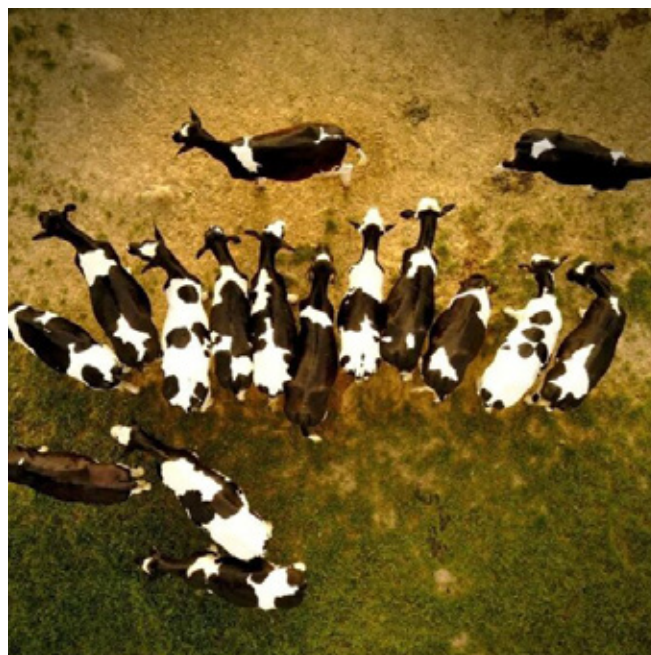
Az AirCore-rendszerrel és egyéb szenzorokkal felszerelt UAV-k alkalmazása többféle előnyt kínál a hagyományos repülőgépekkel szemben, beleértve a



gyorsabb és egyszerűbb „bevezetőséget”, valamint a jelentős költségmegtakarítást a beszerzés, tárolás, karbantartás és üzemeltetés terén. Az UAV-k távolról, akár automatizált rendszerekkel is irányíthatók, gépjárművel könnyen szállíthatók, és gyakorlatilag bárhol, bármikor reptethetők, ha a légtér szabadon használható. Légtérjedési modellezéssel kombinált méréseik részletes képet nyújthatnak a tejtermelő gazdaságok ÜHG-kibocsátásáról. Amennyiben a gyűjtött mintákat egy mobil laboratórium elemzi, a vizsgálatokat közvetlenül a kibocsátó források közelében is el lehet végezni.

Az UAV-k használata azonban bizonyos korlátokkal is jár: a repülőgépekhez képest rövidebb az üzemidejük, kisebb a terhelhetőségük és a hatótávolságuk, valamint érzékenyebbek az erős szélre és esőre. A professzionális modellek szélesebb körű elterjedését emellett még a magas beszerzési költségek is akadályozzák.

Külön említést kell tennünk a pilóta nélküli, kisebb méretű légi járműveket (például drónokat) alkalmazó rendszerekről (small unmanned aerial systems, sUAS-ek), melyek a földi mérések rugalmasságát a légi járművek függőleges légköri profilalkotó képességével ötvözik. Ezek a telepi CH₄-kibocsátások vizsgálatában kifejezetten hasznosak lehetnek, főleg akkor, ha földi mintavételi módszerekkel együtt alkalmazzák őket. A sUAS-ek alacsony magasságban (a földfelszíntől számított 1 km alatt) biztonságosan reptethetők, gyorsan telepíthetők, és ugyanúgy, mint a többi UAV, könnyen szállíthatók, hordozhatók, valamint költséghatékonyan üzemeltethetők. A kisebb méretük és a jobb manőverezőképességük lehetővé teszi, hogy olyan területeken (például zárt tereken) is „dolgozhassanak”, ahol a nagyobb UAV-k erre nem képesek.



A sUAS-eknél azonban fokozottan jelentkeznek a már említett, UAV-kre jellemző hátrányok: kizárólag könnyebb eszközöket, szenzorokat képesek szállítani, illetve egyetlen töltéssel csak rövidebb távolságokat tudnak megtenni. Jelenleg több kutatás is olyan költséghatékony érzékelőtechnológiák kifejlesztésére irányul, amelyek a sUAS-ekre szerelve alkalmasak lehetnek az ÜHG-ok mérésére. Noha néhány projekt biztató eredményekkel zárult, az olcsó CH₄-érzékelők még mindig csak fejlesztési szakaszban vannak, és jelenleg nem képesek érzékelni a gázok ppm- (milliomod rész) koncentrációjú előfordulását (Honeycutt és mtsai., 2019).



Az *in vitro* gáztermelési technika (IVGTT), valamint néhány proxymódszer ismertetése Partnertájékoztató Hírlevelünk következő számában olvasható.

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





A KLÍMAVÁLTOZÁS ÁLLAT- TENYÉSZTÉSI VONATKOZÁSAI

LÉGI JÁRMŰVEK, *IN VITRO* ÉS PROXYMÓDSZEREK: TÖVÁBBI ESZKÖZÖK A SZARVASMARHÁK METÁNKIBOCSÁTÁSÁNAK VIZSGÁLATÁRA II.

**Szakértő
munkatársunk írása**
Állattenyésztési
Teljesítményvizsgáló Kft.

A Partnertájékoztató Hírlevelünk előző számában tárgyalt légi járműves mérések mellett az *in vitro* gáztermelési technika különféle változatai és a proxymódszerek is ígéretes irányokat képviselnek a szarvasmarhák metán- (CH_4 -) kibocsátásának meghatározásában. Ez utóbbiak rugalmasabb és költséghatékonyabb megoldásokat kínálnak a közvetlen megközelítésekhez képest.

Míg az *in vitro* technikák esetén laboratóriumi környezetben zajlik a kérődzők bélrendszerében végbemenő fermentációs folyamatok vizsgálata, addig a proxymódszerekkel közvetlen, helyettesítő paraméterek alapján becsülhető meg az enterális eredetű CH_4 -termelés mértéke. A rovat előző cikkének folytatásaként, jelen és következő írásunkban ezeket az eljárásokat mutatjuk be részletesen.

In vitro gáztermelési technika

Az 1980-as évek eleje óta alkalmazott *in vitro* gáztermelési technika (IVGTT) a takarmányok elemzésére és minősítésére szolgáló laboratóriumi emésztésvizsgálatokat egészíti ki. Ezáltal fontos információk gyűjthetők, mivel a bendőfermentáció során képződő gázok mennyisége közvetlenül jelzi a mikrobiális aktivitást, a takarmányok emészthetőségét és a lebontott tápanyagok mennyiségét, továbbá jól tükrözi a különböző, például az emissziócsökkentés céljából adott takarmánykiegészítők, adalékanyagok mikrobiális és bendőfermentációs hatásait. Az IVGTT segítségével pontosabban megállapítható a takarmányok metabolizálható energiatartalma, mint

más, közvetett *in vitro* mérésekkel. A takarmánylebonthatás kinetikája pedig már egy inkubációs periódus adataiból kiértékelhető, lehetővé téve az emésztés átlagos sebességének kiszámítását.

Az emésztésvizsgálatok különféle változatai az anaerob bendőkörülményeket (hőmérséklet, pH stb.), valamint a takarmányok mikrobiális fermentációját szimulálják kontrollált laboratóriumi környezetben. A lebontási folyamat különböző paraméterei ezáltal stabilan tarthatók, és az *in vivo* kísérletekhez képest könnyebben szabályozhatók. Bár az egyes vizsgálatípusok összetettségükben jelentősen eltérnek

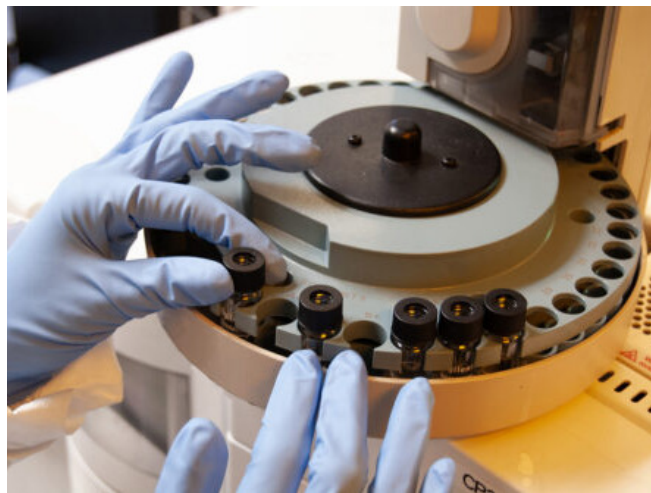


egymástól, legtöbbjük alapját Tilley és Terry (1963) stabil, jól reprodukálható, kétlépcsős technikája képezi. Eszerint az előkészített takarmánymintákat először anaerob körülmények között, 39 °C körüli hőmérsékleten, bendőinokulummal (fisztulával ellátott tehének mikrobákat tartalmazó bendőtartalmával) keverve inkubálják. Amennyiben a vizsgálat nem az állategyedek közötti különbségek feltárására irányul, a kezelések mindegyikéhez akár azonos bendőinokulum is használható, elkerülve ezzel az *in vivo* kísérletekben jellemző egyedi variabilitást. Az inkubációs idő néhány órától néhány napig terjedhet, amely alatt a jelentős pH-változások pufferanyagok (például műnyál) segítségével kerülhetők el, a bendőmikrobák számára pedig tápanyagokat (takarmányt) kell biztosítani. Az IVGTT-val a mikrobiális fermentáció során keletkezett különböző anyagcseretermékek, így a hidrogén, a szén-dioxid és a CH₄ mennyisége is megbízhatóan detektálható. A termelt CH₄ mennyiségének meghatározását korábban főleg Menke és mtsai.-nak (1979) kézi fecskendős eljárásával végezték, mára azonban számos egyéb technológia is rendelkezésre áll. Egyre elterjedtebbek például a vezeték nélküli gáznyomásmérő rendszerek, amelyek esetén a mérésekre a felhasználó által előre beállított időközönként kerül sor, a számítógépekkel való adatkapcsolatot pedig valós idejű rádiófrekvenciás interfész biztosítja. A fermentáció során keletkező CH₄ koncentrációjának pontos kimutatására többnyire gázkromatográfiát használnak.



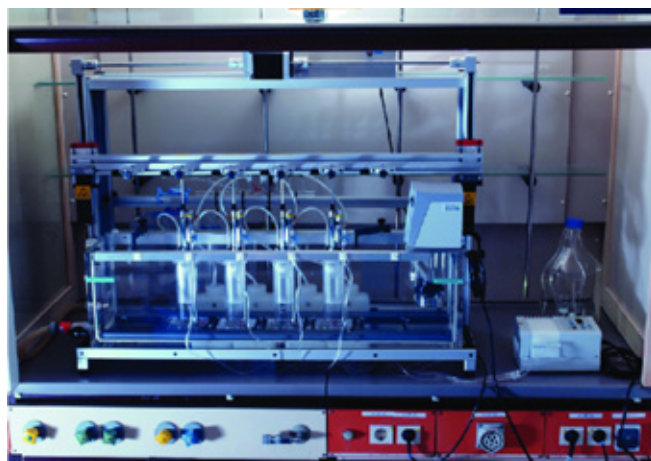
Az IVGTT-rendszerek többsége az inkubációs idő teljes tartama alatt, folyamatosan végez méréseket. Az optimális inkubációs időtartamra vonatkozóan azonban a szakirodalom nem nyújt egyértelmű útmutatást. Mindenesetre azok az eredmények, amelyek a takarmányok bendőben való átlagos tartózkodási idejénél hosszabb inkubációs periódusok

alatt születnek, inkább a takarmányok potenciális CH₄-képző képességét tükrözik, mintsem a szarvasmarhák tényleges CH₄-termelését. Az adott körülményektől függően akár több száz emésztésszimuláció is végezhető egyszerre, lehetővé téve ezáltal a kezelések közötti statisztikailag szignifikáns különbségek feltárását.



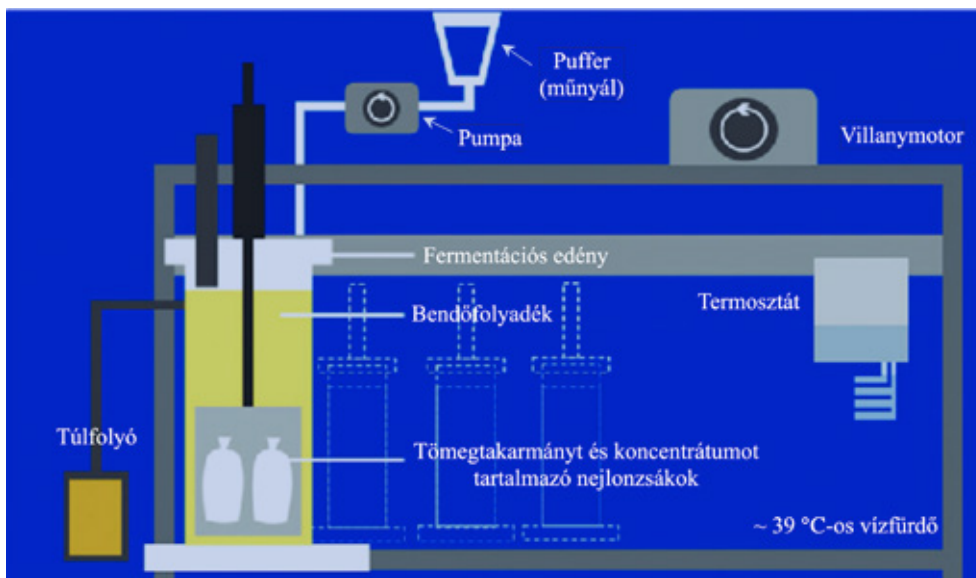
Az 1970-es években Czerkawski, a brit Hannah Kutatóintézet akkori munkatársa kifejlesztett egy mesterséges emésztőrendszert (műbendőt), az ún. RUSITEC-et (Rumen Simulation Technique – bendőszimulációs technika), amelyben megfelelő körülmények teremthetők a mikrobapopuláció hosszú távú fenntartására. A készülék részét képező zsákokba napi rendszerességgel töltenek be kisebb adagokat a szarvasmarhák takarmányából, ami lehetővé teszi a fermentációs folyamatok monitorozását és a keletkező végtermékek, többek között a CH₄ mennyiségének mérését. E szabványosított módszer ugyanakkor nem alkalmas például a lassú bendőpasszázs, az abszorpciós folyamatok vagy a protozoák CH₄-termelésben betöltött szerepének modellezésére (Birk és mtsai., 2018).

1. ábra: Czerkawski RUSITEC-berendezése



Forrás: Birk és mtsai., 2018.





Forrás: Birk és mtsai., 2018.

Az IVGTT összességében hatékony, költségkímélő és praktikus módszer, amely jó kiegészítője, sőt egyes esetekben alternatívája lehet a szarvasmarhák CH_4 -kibocsátásának közvetlen mérésére szolgáló, gyakran bonyolult és drága technikáknak. Segítségével gyorsan meghatározható a különböző takarmányfeleségek CH_4 -termelési potenciálja, valamint a takarmánykiegészítők metanogenezisre gyakorolt hatása, ami megkönnyíti a takarmányadagok optimális összeállítását még az *in vivo* kísérletek megkezdése előtt.

Emellett ez a technika leegyszerűsíti azoknak az emissziócsökkentő anyagoknak a kiválasztását is, amelyek nem/legkevésbé befolyásolják kedvezőtlenül a bendő mikrobiomját vagy a takarmányok emészthetőségét.

Bár az IVGTT hatékonyan modellezi a bendőben zajló fermentációs folyamatokat, alkalmazásával csupán a képződő CH_4 koncentrációja mérhető, ami nem nyújt közvetlen információt a szarvasmarhák tényleges CH_4 -kibocsátásáról. Ráadásul a mért CH_4 -koncentrációs adatok csak a „bendőkörnyezetet adó” állatokra vonatkoznak, ezért még az utókalkulációjukkal korrigált eredmények is gyakran eltérnek az egyedek légzőkamrákkal vagy kén-hexafluoridos (SF_6 -os) nyomjelző technikával mért CH_4 -termelésétől. Az IVGTT-adatok értelmezését tovább nehezíti, hogy ezzel a technikával nem szimulálható a bendő mikroorganizmusainak természetes körülmények közötti, hosszú távú adaptációja a takarmányokhoz. Emiatt a laboratóriumi eredmények megerősítésére *in vivo* kísérleteket kell végezni.

Proxymódszerek

Mint már korábban említettük, a közvetlen mérési eljárások (légzőkamrák, SF_6 -os nyomjelző technika, alagútrendszer stb.) viszonylag pontos eredményeket szolgáltatnak, ám alkalmazásuk gyakran bonyolult és költséges, különösen akkor, ha nagyszámú szarvasmarha egyedi CH_4 -termelését kell rövid idő alatt (például genetikai szelekció céljából) felmérni. E kihívásokra kínálhatnak megoldást a proxy- (helyettesítő) módszerek, amelyek általában nem zavarják az állatokat, és nem igénylik azok előzetes betanítását (eszközökhöz való hozzászoktatását) sem. Fontos ugyanakkor megjegyezni, hogy a rövid távú közvetett mérések önmagukban nem garantálják a teljes megbízhatóságot, és az eredményeik eltérhetnek a légzőkamrás standard vizsgálatokétól. Ezért esetükben az adatgyűjtést többször vagy kellően hosszú ideig szükséges végezni, majd az adatokat

extrapolálni kell a napi CH_4 -termelés becsléséhez. Az ilyen típusú előrejelzések mellett többféle módszer kombinálásával is pontosíthatók.

A proxymérések terén számos alternatíva áll rendelkezésre, kezdve az olyan viszonylag egyszerű és költséghatékony technikáktól, mint a tej zsírtartalmának és a tejsír zsírsavösszetételének elemzése, a bonyolultabb eljárásokig (például a vérmintavétel, a bendő metabolitjainak vizsgálatáig vagy a mikrobiom-profilalkotásig). Ezek pontossága és alkalmazhatósága azonban változó, és jelentősen függ a telepi körülményektől. Egy proxy akkor tekinthető ideálisnak, ha erős korrelációt mutat a CH_4 -kibocsátással, és egyszerűen, nagy léptékben, valamint megbízhatóan mérhető. Mindezek tükrében, a következőkben egy rövid válogatást mutatunk be a jelenleg rendelkezésre álló módszerek közül.



A tejsír zsírsavösszetételének vizsgálata

Számos rövid távú kutatás (például Vlaeminck és Fievez, 2005; Chilliard és mtsai., 2009; Dijkstra és mtsai., 2010; Bougouin és mtsai., 2018) számolt be arról, hogy a tej zsírtartalmának és a tejsír zsírsavösszetételének alakulása értékes információval szolgálhat a szarvasmarhák CH_4 -termeléséről, mivel e tényezők mindegyikét jelentős mértékben befolyásolják az állatok bendőjében zajló mikrobiális takarmányemésztési folyamatok.

A takarmányban levő szénhidrátok, amellett, hogy létfontosságú energiaforrásként szolgálnak a szarvasmarhák számára, a tejsír- és tejcukorszintézisben is fontos szerepet játszanak. Lebontásukkor illó zsírsavak (volatile fatty acids, VFA-k, így például ecetsav, propionsav, vajsav, izo-vajsav, valeriánsav stb.), szén-dioxid, CH_4 , hidrogén stb. termelődik. (A három fő VFA, tehát az ecetsav, a propionsav és a vajsav közül a legnagyobb hányadot az ecetsav, míg a legkisebbet a vajsav teszi ki. A VFA-kra és az egyéb szerves savakra felszívódás után a savmaradékionjukkal – például az ecetsavra acetátként, a vajsavra butirátként, a propionsavra pedig propionátként – hivatkozik a szakirodalom, ezért

a következőkben mi is ezeket az anion-elnevezéseket használjuk).

Ahogy e rovat egy korábbi cikkében már szerepelt, a tejsírszintézisben döntő szerepet betöltő acetát és butirát (β -hidroxibutirát) képződésekor hidrogén szabadul fel, amely többek között a metanogenezisben és a propionát termelésében hasznosul. Így az utóbbi folyamat csökkenti azt a hidrogénmennyiséget, amely a metanogenezis számára rendelkezésre áll. Fontos kiemelni, hogy a bendő hámsejtjeiben a butirát egy része β -hidroxibutiráttá alakul, amely a zsírsavképzés mellett a bendőfal egészségének fenntartásában is kulcsfontosságú szereppel bír. A propionát pedig, mint a glükoneogenezis egyik fő kiindulási anyaga, központi szerepet játszik a glükóz szintézisében, mely vegyület nélkülözhetetlen a tejcukor és a tejsír előállításához.

A tejsír a következő forrásokból származik: 1. a laktáló tügymirigyben *de novo* szintetizálódó zsírsavakból, melyek fő prekursorai az acetát és a β -hidroxibutirát; 2. a takarmányból (trigliceridek, glikolipidek, foszfolipidek, szabad zsírsavak); 3. mikrobiális forrásból; valamint 4. az állatok zsírraktáraiból.

3. ábra: A tejsírsavszintézis és a CH_4 -termelés összefüggéseinek vázlata



Forrás: Saját összeállítás.

A szarvasmarhák CH_4 -termelésének becslésére szolgáló innovatív megközelítések bemutatását Partnertájékoztató Hírlevelünk következő számában folytatjuk. A cikk befejező részében először a tejsír zsírsavösszetételének elemzését fogjuk tárgyalni, ismertetve néhány, a témakörben született tudományos eredményt. Majd kitérünk a CH_4 -koncentráció vérből

történő kimutatásának módszerére és az infravörös termográfia alkalmazásának lehetőségeire, végül pedig a CH_4 -termelés proxyjaiként használt bendőbeli redoxpotenciál és pH intraruminális telemetriás mérésébe nyújtunk betekintést.

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





A KLÍMAVÁLTOZÁS ÁLLAT- TENYÉSZTÉSI VONATKOZÁSAI

LÉGI JÁRMŰVEK, IN VITRO ÉS PROXYMÓDSZEREK: TOVÁBBI ESZKÖZÖK
A SZARVASMARHÁK METÁNKIBOCSÁTÁSÁNAK VIZSGÁLATÁRA III.

**Szakértő
munkatársunk írása**
Állattenyésztési
Teljesítményvizsgáló Kft.

A szarvasmarhák metán- (CH_4 -) termelésének meghatározását segítő proxymódszerek ismertetését folytatva, jelen részben néhány külföldi kutatási eredmény részleteiben mélyedünk el. A tejsír zsírsavösszetételének elemzésével kezdünk, majd a CH_4 -koncentráció vérből történő kimutatásával és az

infravörös termográfia alkalmazásával foglalkozunk. Végül betekintést nyújtunk a bendőfolyadék redoxpotenciáljának és pH-jának intraruminális telemetriás mérésébe, melyek – egyes szakemberek szerint – szoros kapcsolatot mutatnak a CH_4 bendőbeli koncentrációjával.

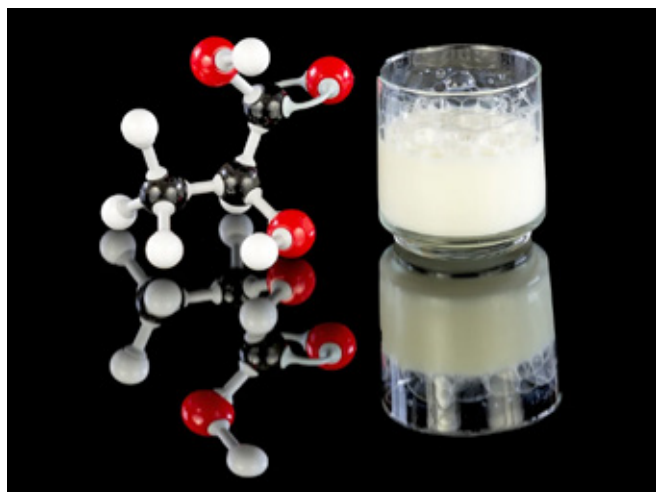
A tejsír zsírsavösszetételének vizsgálata (folytatás)

A tejsírsavprofil proxyként való használatát vizsgáló kutatócsoportok közül Dijkstra és mtsai. (2011) három kísérlet (összesen ötven megfigyelés) adatait felhasználva azt elemezték, hogy miként korrelálnak a holstein-fríz tehének tejsírját alkotó zsírsavak takarmánykiegészítők hatására megváltozott arányai az állatok CH_4 -kibocsátásának alakulásával. A kísérletekben kilencféle takarmánykiegészítőt (kalcium-fumarátot, diallil-diszulfidot, kaprilsavat, kaprinsavat, laurinsavat, mirisztinsavat, extrudált lenmagot, lenmagolajat és jukkagyökérlisztet) használtak. A tehének CH_4 -kibocsátását légzőkamrás mérések alapján, a felvett szárazanyaghoz (dry matter intake, DMI) viszonyítva adták meg, míg a

tejsírsavprofil-elemzést gázkromatográfiával végezték. A tejsír zsírsavösszetétele és a CH_4 -termelés közötti összefüggések meghatározása egyváltozós, kevert regressziós modellek segítségével történt. A kísérletekben a tehének átlagos DMI-je $17,7 \pm 1,83$ kg/nap, tejtermelésük $27,0 \pm 4,64$ kg/nap, míg a CH_4 -termelésük $21,5 \pm 1,69$ g/kg DMI volt. Dijkstraék közepes erősségű kapcsolatot mutattak ki egyes tejsírsavak koncentrációjának alakulása és a tejelő szarvasmarhák enterális CH_4 -termelése között. Elemzésük megerősítette azt a más kutatók által közölt eredményt, hogy a CH_4 mennyiségének növekedésével párhuzamosan bizonyos zsírsavak, különösen az izo-C14:0, az izo-C15:0 és az anteizo-C17:0



koncentrációja is emelkedik, míg más zsírsavaké, például a cisz-9-C17:1 és a transz-10+11-C18:1-é csökken. A várakozásokkal ellentétben ugyanakkor a C15:0 és a C17:0 nem mutatott kapcsolatot a CH₄-termeléssel.



A tej összetételének vizsgálatára a gázkromatográfia mellett az infravörös tartományt lefedő Fourier-transzformációs (Fourier transform infrared, FT-IR), valamint a közép-infravörös (mid-infrared, MIR) tartományban elemzéseket végző FT-MIR-spektroszkópia is alkalmazható, amelyek nagy mennyiségű minta gyors és költséghatékony analízisét teszik lehetővé. Ezeket a módszereket széles körben, rutinszerűen használják a tejátvételi folyamat során, valamint termelésellenőrzés céljából a tejvizsgáló laboratóriumokban (így például nálunk, az ÁT Kft.-nél is) a nyers-, elegy-, illetve egyedtej zsír-, fehérje-, laktóz- és karbamidtartalmának, a tejszírsavak és a tejfehérjék összetételének, a tej technológiai tulajdonságainak, valamint a tehenek egészségi és energiaállapotának meghatározására. Az előbbieken túl e technikák lehetőséget kínálnak arra is, hogy a tejsír összetételének változásai alapján előre jelezzék a szarvasmarhák egyedi CH₄-kibocsátását és annak változásait (Soyeurt és mtsai., 2006, 2011; Mohammed és mtsai., 2011; Rico és mtsai., 2016; Vanlierde és mtsai., 2015). Dehareng és kutatócsapata (2012), valamint Van Gastelen és Dijkstra (2016) ugyanakkor kiemelik: bár a tej MIR-spektrumának vizsgálata ígéretes megközelítésnek tekinthető a telepi/regionális szintű emisszió-előrejelzések, valamint az alacsony CH₄-kibocsátású tehenek azonosítása terén, prediktív képessége egyelőre korlátozott, a vizsgálatokba ezért be kell vonni az egyedek további jellemzőit (például a tehenek laktációs stádiumát) is.

Dehareng és mtsai. (2012) holstein-fríz tehenek CH₄-kibocsátásának nagymértékű változásait próbálták

elérni különféle összetételű takarmányadagok (friss fű és nedves cukorrépaszelet; kukoricaszilázs és széna; roppantott kukoricával, szójadarával és szárított cukorrépaszelettel kiegészített fű- és kukoricaszilázs) etetésével. A kutatók FT-MIR-spektroszkópia segítségével olyan zsírsavakat (például cisz-9-C14:1; cisz-9-, cisz-12- és cisz-15-C18:3) azonosítottak a tejben, amelyek mennyisége pozitívan korrelál a bendőben zajló metanogenezis szintjével, valamint lehetővé teszi a nagy és kis CH₄-termelésű állatok elkülönítését. Vanlierde és mtsai. kutatásuk során (2016) kén-hexafluorid (SF₆-os) nyomjelző technikát alkalmaztak, illetve (2018) légzőkamrás méréseket végeztek holstein-fríz, brown swiss és szimentáli tehenek CH₄-kibocsátásának meghatározására, majd az így nyert eredmények és a vizsgált állatok FT-MIR-tejspektrumjainak összekapcsolásával emissziós egyenleteket dolgoztak ki. E két szerzőpáros CH₄-kibocsátási modelljeinek előrejelzési pontossága (R²) jó volt, 0,68 és 0,79 között mozgott, más kutatók azonban a FT-MIR-spektrumok CH₄-előrejelzési potenciálját csak mérsékeltnek vagy alacsonynak találták. (Az R², tehát a determinációs együttható 0–1 skálán méri a modellek illeszkedését. Minél magasabb az R² értéke, annál pontosabban tükrözi az adott modell az adatkapcsolatokat.)



Lingen és mtsai. (2014) metaanalízissel vizsgálták a tejelő szarvasmarhák tejsírjának zsírsavprofilja és az egységnyi felvett DMI-re, illetve az egységnyi termelt tejjre jutó enterális CH₄-termelés közötti összefüggéseket. Elemzésükben 8 kísérlet 30 éterrendi kezelésének adatait dolgozták fel, amelyek összesen 146 megfigyelésből származtak. A mért átlagos CH₄-termelés 21,50 ± 2,46 g/kg DMI és 13,90 ± 2,30 g/kg zsír- és fehérjekorrigált tej volt. A tejsírban levő C6:0, C8:0, C10:0, C16:0 és izo-C16:0 zsírsavak koncentrációja szignifikáns pozitív korrelációt mutatott az egységnyi DMI-re jutó CH₄-termeléssel, míg a



transz-6+7+8+9-C18:1, transz-10+11-C18:1, cisz-11-C18:1, cisz-12-C18:1, cisz-13-C18:1, transz-16+cisz-14-C18:1 és cisz-9,12-C18:2 zsírsavaké szignifikáns negatív korrelációt jelzett. Lingenké továbbá szignifikáns pozitív kapcsolatot találtak az egységnyi termelt tejre jutó CH₄-termelés és a C10:0, C12:0, izo-C14:0, C14:0, cisz-9-C14:1, C15:0, valamint a C16:0 zsírsavak között, ugyanakkor negatív összefüggéshez jutottak a C4:0, C18:0, transz-10+11-C18:1, cisz-9-C18:1, cisz-11-C18:1 és a cisz-9,12-C18:2 zsírsavak esetén. Eredményeik alapján

két egyenletet dolgoztak ki a CH₄-termelés becslésére:

- CH₄ (g/kg DMI) = 23,39 + 9,74 × izo-C16:0 – 1,06 × transz-10+11-C18:1 – 1,75 × cisz-9,12-C18:2 (R² = 0,54), illetve
- CH₄ (g/kg zsír- és fehérjekorrigált tej) = 21,13 – 1,38 × C4:0 + 8,53 × izo-C16:0 – 0,22 × cisz-9-C18:1 – 0,59 × transz-10+11-C18:1 (R² = 0,47),

ahol az R²-értékek a tejszírsavprofil gyengén közepes előrejelzési potenciáljára utalnak.

CH₄-koncentráció mérése a vérben

A szarvasmarhák vérében mérhető CH₄-koncentráció is felhasználható az enterális CH₄-termelés hozzávetőleges számszerűsítésére. Az erre irányuló vizsgálatok azon az elven alapulnak, hogy a takarmányok lebontása során keletkező CH₄, valamint a nyomjelző gázként alkalmazott SF₆ a bendő falán keresztül felszívódnak, majd a vérárammal a tüdőartériába, ezután pedig gázcserevel a tüdőbe jutnak, ahonnan az állatok kilélegzésekor a környezetbe távoznak (légcseré).

A rovatunk 2024. áprilisi írásában ismertetett SF₆-os nyomjelző technikához hasonlóan, ebben az esetben is kalibrált bóluszt helyeznek az állatok bendőjébe, amelyből folyamatosan, előre meghatározott ütemben szabadul fel a SF₆-gáz. A CH₄ és a SF₆ felszívódási sebessége, fizikai oldhatósági tulajdonságaik, valamint a vérben és a kilélegzett gázkeverékben mérhető koncentrációik között összefüggés mutatható ki (Ramirez-Restrepo és mtsai., 2010). Ennek eredményeként egy tehén CH₄-kibocsátása közelítőleg kiszámítható a SF₆ bóluszból történő kiáramlásának sebessége és a nyaki vénás vérből vett minta CH₄- és SF₆-koncentrációjának aránya alapján.



E módszer hátrányai közé tartozik, hogy a mintavétel munka-, költség- és időigényes, ráadásul csupán egy adott időpontra vonatkozó „pillanatfelvételt” nyújt a CH₄-koncentrációról. Az eredmények megbízhatóságát a vérvétel technikájának precizitása és egyéb tényezők, például a környezet különféle paraméterei is befolyásolhatják. Noha az eljárás rutinműveletnek számít és viszonylag biztonságosnak tekinthető, mégis bizonyos fokú stresszt válthat ki az állatokban, ami állattjölléti aggályokat vet fel. Ezen túlmenően további kutatások szükségesek annak pontosabb ismeretéhez, hogy mely tényezők, miként befolyásolják a CH₄ és a SF₆ vérbeli koncentrációjának változékonyságát.

Infravörös termográfia alkalmazása

Montanholi és mtsai. (2008) laktáló holstein-fríz tehének CH₄-kibocsátásának egyik lehetséges indikátoraként az infravörös termográfia, vagyis a hőkamerák használatát javasolják. Ez a viszonylag egyszerű és költséghatékony módszer alkalmas az állatok által kibocsátott infravörös hősugárzás érzékelésére és az egyes testrészek hőmérsékletének képi megjelenítésére. A kutatók kiemelik: mivel a bendő a szarvasmarhák bal oldali testfelszínéhez közelebb helyezkedik el, a bal oldali horpasz hőmérséklete jellemzően a bendő hőtermelését mutatja, míg a jobb oldali az általános testhőmérsékletet tükrözi. Ezért feltételezhető, hogy a két oldal

közötti hőmérséklet-különbség a takarmányeredésből származó hő mennyiségét jelzi, közvetett módon pedig a CH₄-kibocsátás mértékére is utal. Montanholi és mtsai. (2008) hőkamerás vizsgálataikat az etetés utáni 1-2 órában végezték, a tehének gázcserefolyamatait (O₂ vs. CH₄, CO₂) pedig egy fejbox segítségével mérték. Eredményeik szerint a bal és jobb oldali horpaszok közötti hőmérséklet-különbség bizonyos időpontokban megbízható indikátora a CH₄-termelésnek: az erre vonatkozó korrelációs együttható közvetlenül az etetés után magas (r = 0,77; p = 0,01), míg a nap további részében alacsony volt (r = 0,17; p = 0,63), a 24 órát tekintve pedig közepes



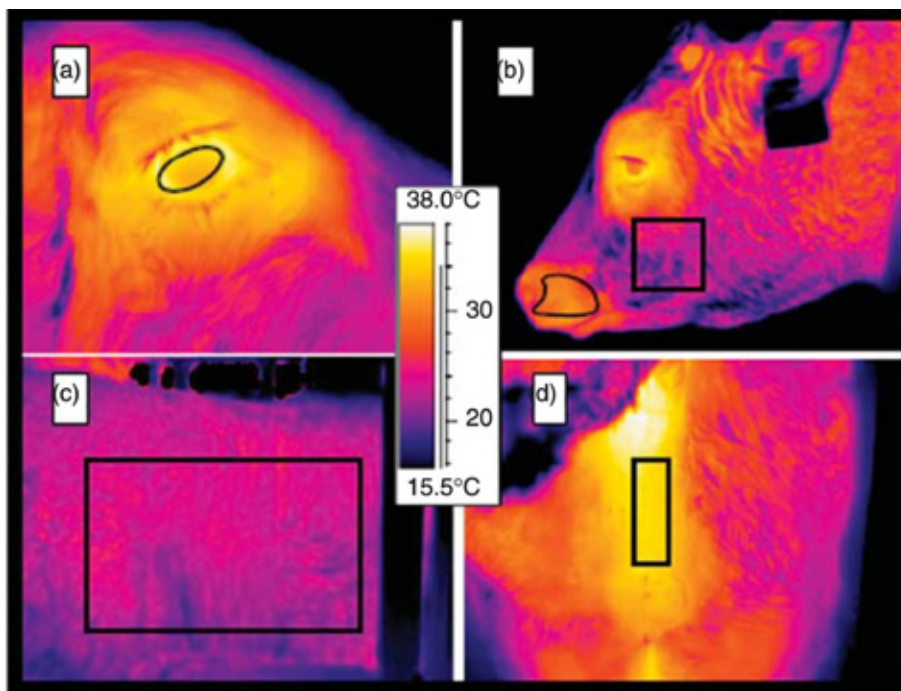
összefüggést mutatott ($r = 0,53$; $p = 0,01$). (A Pearson-féle korrelációs együttható $[r]$ előjele a vizsgált változók közötti kapcsolat irányát, nagysága $[0-1]$ pedig a kapcsolat „erejét” fejezi ki. Ha értéke 0, nincs összefüggés a változók között. A p -érték az elsőfajú hiba valószínűségét, tehát annak esélyét mutatja, hogy tévesen következtetünk a hatás meglétére, miközben az valójában nem létezik. Ha a p -érték 0,01, akkor 99% az esélye annak, hogy helyesen döntünk, míg 1%, hogy hibázunk.)

Bland (2012) hasonló kutatásokat végzett, mint Montanholi és mtsai. (2008), de ő a vizsgálatait nagy légzőkamrákban tartott tehenekkel végezte, melyek két különböző összetételű takarmánykeveréket kaptak (az egyik esetben búza-, a másikban kukoricaabrakkiegészítést). A hőképeket ez esetben az állatok fölé felszerelt kamerák 5 percenként rögzítették. Bland Montanholi és mtsai.-nak (2008) eredményeihez képest alacsonyabb korrelációs együtthatókat talált a CH_4 -kibocsátás és az etetést követően mért horpaszhőmérséklet-különbségek között ($r = 0,35-0,46$),

a nap egészét tekintve pedig nem tapasztalt számottevő összefüggést e tényezők vonatkozásában. Az alacsonyabb korrelációs értékek valószínűleg a zárt kamrás környezetnek tulajdoníthatók, amely nem kedvezett a termográfias képrögzítésnek, ellentétben Montanholiék nyitottabb, az állatok mindkét oldalához közvetlen hozzáférést biztosító fejkamrájával. Bland (2012) egyébként – ellentétben kiinduló hipotézisével – a búza esetén nagyobb átlagos napi hőmérsékletkülönbséget rögzített a tehenek jobb és bal oldala között ($1,43\text{ °C}$), mint a kukoricánál ($0,71\text{ °C}$).

Guadagnin és mtsai. (2023) kimutatták, hogy a holstein-fríz tehenek CH_4 -termelése szignifikánsan összefügg az állatok szemhőmérsékletének alakulásával 5-6 órával az etetés után ($r = 0,88$; $p < 0,05$). Eredményeik szerint a CH_4 -termelés mértéke az etetés utáni hatodik órában a legnagyobb, ami összhangban van Montanholi és mtsai.-nak (2008) azon megállapításával, miszerint ekkor áll rendelkezésre a legtöbb hidrogén a bendő metanogén mikrobái számára.

1. ábra: Infravörös felvételek egy holstein-fríz tehen (a) szeméről, (b) pófájáról, (c) bordáiról és (d) hátulsó testtájáról



Forrás: Montanholi és mtsai., 2010.

Jelenlegi ismereteink szerint az infravörös termográfia ígéretes megoldás lehet a CH_4 -kibocsátás becslésére. A korábban említett tudományos eredményeket

azonban további részletes vizsgálatokkal kell alátámasztani a megfigyelések pontosítása és az összefüggések mélyebb megértése érdekében.

A redoxpotenciál és a pH mérése intraruminális telemetria segítségével

Az előbb ismertetett proxymódszereken kívül felmerült az intraruminális telemetria alkalmazása is a szarvasmarhák CH_4 -kibocsátásának meghatározása céljából. (A telemetria olyan technológia, amely

lehetővé teszi a távoli forrásokból származó adatok rögzítését és továbbítását egy központi rendszerbe.) Ennek keretében korrózió ellen védett, miniatűr érzékelőkkel ellátott telemetriás bóluszt helyeznek



a szarvasmarhák bendőjébe, amely lehetőséget biztosít az ottani hőmérséklet, pH-érték, valamint egyéb fizikai/kémiai paraméterek folyamatos és valós idejű monitorozására. Majd az így nyert adatokat egy központi rendszerbe továbbítják elemzés céljából, amelyhez rendszerint vezeték nélküli hálózati platform nyújt támogatást.

Az új-zélandi Lincoln Egyetemen végzett kismintás kísérletében Gibbs (2008) intraruminális telemetria segítségével vizsgálta a bendőfolyadékban mért CH_4 -koncentráció és pH-érték, redoxpotenciál, illetve hőmérséklet közötti kapcsolatot. E célra a svájci D-Opto Technologies cég által gyártott, kifejezetten vizes környezetre tervezett CH_4 -érzékelőt, a METS #11-t használta. (A CH_4 bendőfolyadékbeli koncentrációja

annak ellenére mérhető, hogy ez a gáz vízben gyakorlatilag oldhatatlan; ebben az esetben csupán fizikai folyamat, diszpergálódás történik, ahol a CH_4 -molekulák gyengén keverednek a vízmolekulákkal, de kémiai reakció nem zajlik le közöttük.) A METS #11 a CH_4 már viszonylag alacsony koncentrációjának ($< 150 \mu\text{mol/l}$) kimutatására is alkalmas, és rövid időközönként (kb. 30 percenként) rögzíti annak kismértékű ($< 50 \mu\text{mol/l}$) változásait. A kutató eredményei szerint a redoxpotenciál és a pH szoros kapcsolatot mutat ($R^2 = 0,91$) a bendőfolyadék CH_4 -koncentrációjával. Amennyiben különböző étrendek mellett további kutatások is igazolni tudják ezt az összefüggést, az említett paraméterek a metanogenezis könnyen mérhető proxyjaként szolgálhatnak.

2. ábra: Két gyártó pH- és redoxpotenciál-szenzorokkal ellátott bólszjai



Természetesen az említett D-Opto Technologies mellett más cégek, például az Electronic Cow Management Ltd. és a Moonsyst is kifejlesztettek pH-

és redoxpotenciál-érzékelőkkel ellátott bendőbólszokat, amelyek szintén rövid időközönként logolják az adatokat.

A jelen cikkünkben tárgyalt kutatások és technológiai fejlesztések reményt keltőek abban a tekintetben, hogy a jövőben széles körben elérhetővé válhatnak olyan egyszerű és költséghatékony módszerek, amelyekkel a szarvasmarhák CH_4 -termelése a mostaniaknál pontosabban mérhető. A folyamatos innováció, valamint a tudományos eredmények integrációja kulcsfontosságú szerepet játszhat a mezőgazdasági emissziók hatékony kezelésében, hozzájárulva ezzel a környezetvédelmi célok megvalósításához.

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

