

Baromfi húshibrid és tojótyúk tenyésztési vonalak ammónia emissziója – irodalmi áttekintés

Ammonia emission of poultry meat hybrid and laying hybrid lines – literature review

ÁDÁM Ferenc  – LENCSES-VARGA Erika  – ALEXY Márta 

ÖSSZEFOGLALÁS

A baromfifajok nitrogén-anyagcseréje alapvetően eltér az emlősökétől, mivel a nitrogén kiválasztása döntően húgysav formájában történik. Ez az urikoteliás kiválasztási mechanizmus evolúciós szempontból a vízvesztés minimalizálását szolgálja, ugyanakkor intenzív állattartási környezetben jelentős környezetvédelmi és állatjólléti problémák forrásává válhat. A baromfitrágyában található húgysav mikrobiális lebontása során ammónia keletkezik, amely kedvezőtlen hatással van az istálló levegőminőségére, az állatok egészségi állapotára, valamint hozzájárul a környezeti nitrogénterheléshez és a savasodási folyamatokhoz. A tanulmány áttekinti a húgysav lebontásának biokémiai és mikrobiológiai folyamatait, bemutatja a különböző hasznosítási típusú baromfivonalak – húshibridek és tojóhibridek – közötti metabolikus, viselkedéssel és mikrobiológiai eltéréseket, amelyek meghatározzák a nitrogénhasznosítás hatékonyságát és az ammónia-emisszió mértékét. A húshibrid vonalak gyors növekedési erélye, magas fehérjeigénye és alacsonyabb aktivitása fokozott ammóniakibocsátással járhat, míg a tojótípusú állományok kedvezőbb állománya és eltérő bélmikrobióta-összetétele mérsékelheti az emissziót. A szerzők bemutatják az ammónia-emisszió csökkentésének lehetőségeit, beleértve a genetikai szelekciót, a precíziós takarmányozást, a többfázisos etetési rendszereket, az alomsavanyító és biológiai alomkezelő technológiákat, valamint a precíziós állattenyésztési monitoring rendszerek alkalmazását. Az integrált technológiai és genetikai megközelítések hozzájárulhatnak a fenntarthatóbb baromfitartási rendszerek kialakításához, az állatjólléti feltételek javításához és a környezeti ammónia-terhelés mérsékléséhez.

Kulcsszavak: baromfi, ammónia, húshibrid és tojóhibrid vonal

SUMMARY

The nitrogen metabolism of poultry species differs fundamentally from that of mammals, as nitrogen excretion occurs predominantly in the form of uric acid. From an evolutionary perspective, this uricotelic excretion mechanism serves to minimize water loss; however, under intensive livestock production conditions, it may become a significant source of environmental and animal welfare concerns. During the microbial degradation of uric acid present in poultry manure, ammonia is produced, adversely affecting air quality in poultry houses, animal health, and contributing to environmental nitrogen loading and acidification processes. This study reviews the biochemical and microbiological processes involved in uric acid degradation and presents the metabolic, behavioral, and microbiological differences between poultry lines bred for different production purposes—broiler hybrids and laying hybrids—which determine the efficiency of nitrogen utilization and the extent of ammonia emissions. The rapid growth rate, high protein requirements, and lower activity levels of broiler lines may result in increased ammonia emissions, whereas laying-type flocks may exhibit reduced emissions due to

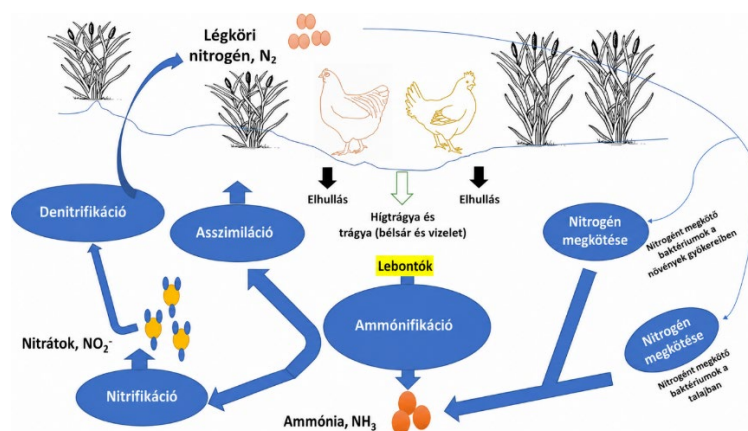
more favorable litter conditions and differences in gut microbiota composition. The authors present potential strategies for reducing ammonia emissions, including genetic selection, precision feeding, multiphase feeding systems, litter acidification and biological litter treatment technologies, as well as the application of precision livestock farming monitoring systems. Integrated technological and genetic approaches may contribute to the development of more sustainable poultry production systems, improved animal welfare conditions, and reduced environmental ammonia burden.

Keywords: poultry, ammonia, meat hybrid and lay hybrid line

1. Bevezetés

Az ammónia (NH_3) a reaktív nitrogén (Nr) fő formája, amely jelentős hatással van a környezetre (Galloway és mtsai., 2003). A légkörbe kerülő, gáz halmazállapotú NH_3 reakcióba lép savas oxidokkal (SO_2 , NO), ami ammónium-szulfát (NH_4SO_4) illetve ammónium-nitrát (NH_4NO_3) aeroszolok képződéséhez vezet (Sutton és mtsai., 2011). Ezek a molekulák befolyásolják a Föld sugárzási egyensúlyát azáltal, hogy szétszórják a fényt és megváltoztatják a Föld visszaverődési képességét (Xu és Penner, 2012). A légköri NH_3 élettartama viszonylag rövid (órák vagy napok), mivel száraz és nedves kicsapódás útján gyorsan lebomlik, vagy az említett aeroszolokká alakul át (Hendriks és mtsai., 2016). A légkörben az ammónia finom szemcséjű szálló port ($\text{PM}_{2.5}$) is képez. Ez a folyamat jelentősen rontja a levegőminőséget és növeli a kardiovaszkuláris megbetegedések kockázatát, szemgyuladást és fokozott oxidatív stresszt is okozhat (Gu és mtsai., 2014). A szárazföldi ökoszisztémákban az ammóniának való kitettség látható levélkárosodáshoz vezet, csökkentve a növényzet kártevőkkel és betegségekkel szembeni tűrőképességét, különösen az őshonos növények és erdők esetében. A vízbe kerülve az NH_3 savasodást és eutrofizációt okozhat (Krupa, 2003). A túlzott nitrogénterhelés eutrofizációs folyamatokat idéz elő a sérülékeny vízi ökoszisztémákban, elősegítve az algák tömeges elszaporodását, amely jelentős mértékben veszélyezteti a helyi biodiverzitás fennmaradását (Sutton és mtsai., 2011).

Az ammónia (NH_3) kibocsátásának különböző forrásai közül a mezőgazdaság képviseli a legjelentősebb szektort, amely az összes emisszió 60 %-áért felelős. Ezen belül az állattenyésztés meghatározó szerepet tölt be, mivel a globális ammóniakibocsátás hozzávetőlegesen 39%-a ehhez az ágazathoz köthető (Clarisse és mtsai., 2009).



1. ábra. A nitrogénciklus rövid áttekintése

Forrás: Saját szerkesztés Swelum és mtsai. (2021) alapján

A II. világháború után az állattenyésztés iparosodásával jelentősen megnőtt a nagylétszámú állattartó telepek száma, ezzel együtt a világ baromfiállománya az elmúlt 50 évben nagyjából ötszörösére nőtt (FAO, 2018). A nagyüzemi állattartó telepek a légköri szennyező anyagok jelentős forrásai, amelyek hatással vannak a környezetre és az ökoszisztémára (Bist és Chai, 2022). Az állattartó telepekről származó fő légszennyezőanyag-kibocsátások közé tartozik az ammónia, a hidrogén-szulfid (H_2S), a dinitrogén-oxid (N_2O), a metán (CH_4), a széndioxid (CO_2) és az illékony szerves vegyületek (VOC-k), amelyek jelentős potenciális kockázatot jelentenek az állatok és gondozóik egészségére és jóllétére (Swelum és mtsai., 2021).

Az istálló magas ammónia-koncentrációja (>25 ppm) károsítja a madarak légzőszervének nyálkahártyáját, növeli a fertőzésekre való hajlamot, rontja a takarmányfelvételt, a növekedési erélyt és ütemet lassítja, sőt akár elhulláshoz is vezethet (Miles és mtsai., 2004).

A tenyésztési cél alapvetően meghatározza a nitrogén-hasznosítás hatékonyságát, ami direkt hatással van az emisszióra. A tenyészállományok aránya a teljes baromfi-populációhoz képest viszonylag alacsony (FAO, 2018), ugyanakkor kritikus genetikai alapot képeznek az összes kereskedelmi hús- és tojástermeléshez.

A brojler-tenyészvonalakat intenzív növekedési erélyre és kedvező takarmányhasznosításra szelektálták, azonban a tenyészállományokat szigorúan korlátozott takarmányozási rendszerben tartják (az ad libitum felvétel akár 40–60%-án), a metabolikus zavarok megelőzése és a reprodukciós teljesítmény fenntartása érdekében (Renema és mtsai., 1999; Renema és Robinson, 2004).

A termelési ciklus során a tojástermelés célja nem a maximális darabszám, hanem a jó minőségű, keltetésre alkalmas tenyésztojások előállítás. A genetikai

szelekció az elmúlt évtizedekben elsősorban a takarmányhasznosítási mutatók (Feed Conversion Ratio, FCR) jelentős javítására irányult. Ennek eredményeként a modern brojlerhibridek – például a Ross 308 – a korábbi, 30–40 évvel ezelőtti genotípusokhoz viszonyítva lényegesen hatékonyabban képesek a takarmány fehérjetartalmát izomszövetté alakítani, ami hozzájárult az egységnyi előállított húsmennyiségre jutó nitrogénürítés mérséklődéséhez (Zuidhof és mtsai., 2014). A fokozott anyagcsere-intenzitás gyakran emelkedett vízfogyasztással társul, amely hozzájárulhat a nedves alom kialakulásához. Amennyiben a takarmány aminosav-összetétele nem megfelelően igazodik az állatok élettani igényeihez, a fel nem használt nitrogén gyorsan kiürül a szervezetből, ezáltal növelve az ammónia képződésének és emissziójának potenciálját (Nahm, 2003).

A tojástermelő tenyésztóvonalaknál a szelekció a perzisztenciára (hosszú termelési ciklus) és a hatékony takarmányfelvételre irányul. A genetikai előrehaladás lehetővé tette, hogy a tyúkok akár 100 hetes korukig termeljenek, ami az életút-alapú emissziót (Life Cycle Assessment, LCA) csökkenti, mivel kevesebb jércét kell felnevelni ugyanannyi tojás megtermeléséhez (Leinonen és mtsai., 2012).

Kutatások rámutattak arra, hogy bár a tojótyúkok egyedi napi nitrogénürítése alacsonyabb lehet a brojlerállományokhoz viszonyítva, a hosszabb termelési ciklus, valamint az alkalmazott tartástechnológia – például az alternatív és ketreces rendszerek közötti különbségek – következtében a nitrogénkibocsátás és az ammóniamenedzsment rendszerszintű kezelése lényegesen összetettebb feladatot jelent (Nicholson és mtsai., 2004).

A hús- és tojástípusú baromfi tenyésztóvonalak eltérő genetikai szelekciós irányai jelentős különbségeket eredményeznek a termelési tulajdonságokban, a takarmányozási stratégiákban és a nitrogén-anyagcserében. A húshibridek esetében a szelekció elsősorban a reprodukciós teljesítményre és az utódok intenzív növekedési erélyére irányul, amely szigorúan kontrollált takarmányozási rendszert tesz szükségessé. Ezzel szemben a tojótípusú tenyésztóvonalaknál a tojástermelés mennyisége, a héjminőség és a perzisztencia állnak a szelekció középpontjában, ami eltérő takarmányozási és menedzsment gyakorlatokat eredményez. A két termelési típus közötti fiziológiai és metabolikus különbségek a nitrogénürítés mértékében és dinamikájában is megmutatkoznak, ami közvetlen hatással van az ammóniakibocsátás és a környezeti terhelés alakulására (1. táblázat).

1. táblázat. Tenyészvonalak takarmányozási és metabolikus különbségei

	Húshibrid tenyészvonal	Tojótípusú tenyészvonal
Szelekciós fókusz	Reprodukció + utódok növekedési erélye	Tojásszám + héjminőség + perzisztencia
Takarmányozás	Szigorú mennyiségi/minőségi korlátozás	Ad libitum vagy enyhe kontroll
Nitrogén-ürítés	Magasabb a metabolikus stressz és a vízfogyasztás miatt	Alacsonyabb, de a hosszú élettartam alatt állandó

Forrás: Saját szerkesztés Miles és mtsai (2004) alapján

2. A nitrogén-anyagcsere élettani sajátosságai baromfinál

A baromfifajok nitrogén-anyagcseréje jelentősen eltér az emlősökére jellemző metabolikus folyamatoktól. Míg emlősökben a fehérjelebontás fő nitrogéntartalmú végterméke a karbamid $[\text{CO}(\text{NH}_2)_2]$, addig a baromfifajokban a nitrogén kiválasztása döntően húgysav $[\text{C}_5\text{H}_4\text{N}_4\text{O}_3]$ formájában történik. Ennek következtében a baromfiürülék magas húgysav-koncentrációval és viszonylag alacsony víztartalommal jellemezhető, ami a madarak víztakarékos nitrogénkiválasztási mechanizmusának következménye (Schefferle, 1965).

Ez az evolúciós adaptáció – az urikoteliás kiválasztási mechanizmus – fiziológiai szempontból a vízvesztesség minimalizálását szolgálja, azonban az intenzív állattartási környezetben sajátos ökológiai és technológiai kihívásokat generál. A bélsárban jelen lévő húgysav és karbamid meghatározott környezeti feltételek (különösen nedvesség, hőmérséklet és mikrobiális aktivitás) mellett gyors ütemben bomlik, amelynek során jelentős mennyiségű ammónia szabadul fel (Rafai, 2003).

A madarak ürülékének nitrogéntartalmú komponensei között a húgysav dominál, amely a bélsár nitrogénfrakciójának megközelítőleg 88%-át teszi ki, míg a karbamid és az ammónia aránya mintegy 3%, illetve 7%. Emellett a bélsár kisebb mennyiségben (2%) egyéb nitrogéntartalmú vegyületeket is tartalmaz, így például allantoint, kreatinint és hippursavat (Krogdahl és Dalsgaard, 1981). A szakirodalmi adatok alapján a madarak által húgysav formájában kiválasztott nitrogén a meg nem emésztett fehérjefrakció hozzávetőleg 50%-ával hozható összefüggésbe (Nahm, 2003).

2.1. Az ammónia képződésének folyamata

Az ammónia a trágyában található nitrogéntartalmú vegyületek – főként a húgysav, kisebb mértékben a karbamid és egyéb szerves nitrogénformák – átalakulása során keletkezik, majd a levegőbe jutva hozzájárul a levegőminőség romlásához, a savasodási folyamatokhoz és a másodlagos aeroszolképződéséhez.

A baromfitrágyában jelen lévő húgysav ammóniává történő átalakulása komplex, többlépcsős, enzimatis és mikrobiális folyamatok eredménye. A húgysavban található nitrogén a környezeti és mikrobiális lebontási folyamatok hatására fokozatosan mobilizálódik. Hidrolízis, mineralizáció és ezt követő volatilizáció révén a nitrogén ammóniává (NH_3), illetve oldott formában ammóniumionná (NH_4^+) alakul át (*Oenema és mtsai., 2001*).

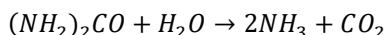
A trágyában nagy számban előforduló aerob és anaerob mikroorganizmusok jelentős szerepet játszanak a purinvegyületek lebontásában. A húgysav-degradációban kiemelt jelentőségűek többek között a *Corynebacterium*, *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Nocardia*, *Streptomyces* és *Achromobacter* nemzetségekhez tartozó törzsek. Ezek az úgynevezett urikolitikus mikroorganizmusok urikáz (urát-oxidáz) enzimet termelnek, amely katalizálja a húgysav oxidatív lebontását (*Schefferle, 1965*).

A mikrobiális urikáz enzim hatására a húgysav allantoinná alakul. Az allantoin ezt követően allantoináz és allantokáz enzimek közreműködésével allantóáttá, majd ureid-glikoláttá bomlik. A lebontási útvonal végső szakaszában karbamid és ammóniumion keletkezik, majd a karbamid ureáz enzim hatására tovább hidrolizál ammóniává és szén-dioxiddá, végül a környezeti feltételektől függően volatilizálódik a levegőbe (*Bacharach, 1957; Kappaun és mtsai., 2018*).

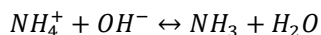
A húgysav mikrobiális dekompozíciója során felszabaduló ammónia jelentős emissziós terhelést jelent, ami környezetvédelmi, állategészségügyi és állatjólléti szempontból meghatározó jelentőséggel bír.

A húgysav lebontásának egyszerűsített reakciósémája a következőképpen írható fel (*Ni és mtsai., 1999*): húgysav $\rightarrow$ allantoin $\rightarrow$ allantóát $\rightarrow$ karbamid $\rightarrow$ $\text{NH}_3 + \text{CO}_2$

A karbamid ammóniává történő átalakulását az ureáz enzim katalizálja:



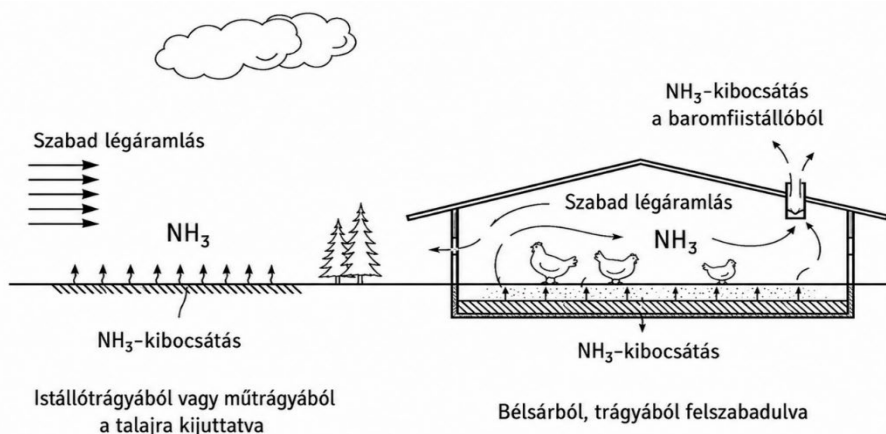
Az így képződő ammónia vizes közegben az ammóniumionnal egyensúlyban van:



Az egyensúly helyzetét elsősorban a pH és a hőmérséklet határozza meg. Alacsonyabb pH mellett az ammóniumion-forma dominál, míg lúgos közegben nő a szabad ammónia aránya, amely könnyen volatilizálódik a légtérbe. Ez magyarázza, hogy a nedves, meleg és lúgos kémhatású baromfialom miért eredményez fokozott ammóniakibocsátást (*Oliviera és mtsai., 2021*).

A kibocsátás mértékét számos tényező befolyásolja, többek között az alom nedvességtartalma, a hőmérséklet, a pH, a szellőztetés intenzitása, valamint a trágya kezelési és tárolási módja. A nyitott környezetben kijuttatott trágya esetében

az ammónia közvetlenül a talajfelszínről párolog el, míg az állattartó épületekben a bélsárból és trágyából felszabaduló ammónia a légáramlással együtt távozik az istállótérből.



2. ábra. Az ammónia keletkezésének és emissziójának főbb útvonalai baromfitartó rendszerekben

Forrás: Saját szerkesztés Ni (1999) alapján

3. Tenyészvonalak metabolikus sajátosságai és az ammónia-emisszió összefüggése

3.1. A nitrogén-hasznosítás útjai: izomfehérje vagy tojásfehérje szintézis

A tojó- és hústípusú baromfi nitrogén-anyagcseréje közötti különbségek elsősorban az eltérő genetikai szelekcióból és a termelési sajátosságokból erednek, amelyek jelentősen befolyásolják a nitrogén-visszatartás (N-retenció) dinamikáját, valamint a nitrogénhasznosítás hatékonyságát

A húshibrid vonalak szelekciója a vázizomzat hipertrófiájára fókuszál. A nitrogén-retenció hatékonysága fiatal korban maximális, hiszen a szervezet szinte minden beépíthető aminosavat az izomszövet gyarapítására fordít. Ugyanakkor a tenyészállományoknál a növekedési erély és a reprodukciós ciklus együttes jelenléte metabolikus stresszt okozhat. Ha a takarmány aminosav-összetétele nem illeszkedik a szükséglethez, a felesleges nitrogén húgysav formájában ürül, ami az ammónia-emisszió közvetlen előanyaga (Clavijo és Flórez, 2018; Woyengo és mtsai., 2023).

Ezzel szemben a tojó típusú baromfiban a nitrogénfelhasználás meghatározó része a tojásképzéshez, különösen a tojásfehérje szintéziséhez kapcsolódik, miközben a testtömeg-növekedés másodlagos szerepet tölt be. Ez a folyamat jellegzetes napi ciklikusságot mutat, amely a tojásképzés ritmusához igazodik. Mivel

a tojóhibridek testtömege általában kisebb, fenntartó energia- és fehérjeszükségletük is alacsonyabb a húshibridekéhez viszonyítva, így egységnyi idő alatt kevesebb nitrogént ürítenek (*Bregendahl és mtsai., 2008*).

A két hasznosítási típus közötti eltérő fiziológiai és termelési jellemzők következtében jelentős különbségek figyelhetők meg a nitrogén-visszatartás mértékében, a fehérjehasznosítás hatékonyságában, valamint a nitrogénürítés és az ammónia-kibocsátás intenzitásában is.

A 2. táblázat szemléletesen mutatja a hús- és tojóhasznosítású végtermékek, valamint azok szülőpár-vonalai közötti különbségeket az ammónia-kibocsátás tekintetében. Az emissziós adatok különböző szakirodalmi forrásokból, emissziós modellekből és normatív becslésekből származó átlagértékek, amelyek a tartástechnológia, a környezeti feltételek és az állománykezelési gyakorlat függvényében eltérést mutathatnak, ezért elsősorban összehasonlító jellegű értékelésre alkalmasak.

2. táblázat. Különböző tenyész- és végtermék-vonalak ammónia-emissziójának összehasonlítása

Hasznosítási típus	Tartási idő (hét)	Átlagos testtömeg (kg)	Napi egyedi emisszió (g NH ₃ / állat / nap)	Éves normatív emisszió (kg NH ₃ /év)	Forrás
Árutojást termelő tojóhibrid (végtermék – mélyalmos)	40	1,7–2,0	0,35–0,48	0,13–0,17	<i>Nicholson és mtsai., (2004), EMEP/EEA Guidebook (2019)</i>
Tojástermelő szülőpár tenyészvonal (mélyalmos)	40	2,1–2,5	0,55–0,68	0,20–0,25	<i>Roberts és mtsai., (2007)</i>
Húshibrid brojler (végtermék – intenzív mélyalmos)	5–6	2,2–2,8	0,75–0,98	0,21–0,28	<i>Groot Koerkamp és mtsai., (1998)</i>
Húshibrid szülőpár tenyészvonal (mélyalmos)	35	3,5–4,5	1,10–1,45	0,42–0,51	<i>Sutton és mtsai., (2011); U.S. EPA normák (2005)</i>

3.2. Takarmányértékesítés és a nitrogén-kiválasztás kapcsolata

A takarmányértékesítési mutató (feed conversion ratio, FCR) javítása az egyik leghatékonyabb eszköz az emisszió csökkentésére. A jobb FCR azt jelenti, hogy a takarmány nitrogénjének nagyobb hányada épül be az állati szervezetbe, és kevesebb kerül kiürítésre. Kutatások igazolták, hogy a nyersfehérje-bevitel 1%-os csökkentése (megfelelő aminosav-kiegészítés mellett) akár 10%-kal is mérsékelheti az ammónia-emissziót (Roberts és mtsai., 2007).

A húshibrid vonalak nagy testtömege és az alom nedvessége közötti összefüggés kritikus pont. A nagytestű szülőpárok nagyobb nyomást gyakorolnak az alomra, ami annak tömörödéséhez és levegőtlenné válásához vezet. A tömörödött, nedves alom kedvez az intenzív mikrobiális aktivitásnak és az ammóniaképződésnek, különösen nem megfelelő szellőzés vagy magas páratartalom esetén. Ha az ammóniaszint meghaladja a 25 ppm-et, az nemcsak a légutakat irritálja, hanem közvetlenül károsítja a talppárnákat is (Miles és mtsai., 2004). A talppárna-dermatitis következtében az állatok mozgása fájdalmassá és nehezítetté válik, ami az aktivitás csökkenésével jár. Ennek következtében mérséklődik a kaparó viselkedés és az alom természetes fellazítása, ami hozzájárul az alom további tömörödéséhez. Ennek következtében az alom felszíne kevésbé szellőzik és lassabban szárad, ami tovább növeli a nedvességtartalmat és az ammónia-felszabadulás intenzitását (Dawkins és mtsai., 2004).

3.3. Viselkedési mintázatok és az alom szellőzése

A viselkedési sajátosságok jelentős szerepet játszanak az alom fizikai állapotának alakulásában és ezen keresztül az ammónia-emisszió dinamikájában is. A különböző hasznosítási típusok eltérő aktivitási szintje és viselkedésformái közvetlenül befolyásolják az alom szerkezetét, szellőzöttségét, nedvességtartalmát és mikrobiológiai folyamatait.

A tojótipusú vonalakra általában nagyobb aktivitás jellemző. Természetes viselkedésük része a folyamatos kaparás, csipegetés és alomforgatás, amely mechanikailag lazítja az alom felső rétegeit. Ez a viselkedés elősegíti az alom levegőzését, javítja az oxigénellátást és fokozza a nedvesség elpárolgását. A szárazabb, morzsálékosabb alom kevésbé kedvez a húgysav mikrobiális lebontásának, így mérséklődik az ammónia képződése és felszabadulása is. Emellett a rendszeresen mozgatott alomban kisebb mértékben alakulnak ki anaerob mikrokörnyezetek, amelyek intenzív mikrobiális aktivitásuk révén fokozhatják a káros gázok képződését.

Ezzel szemben a húshibrid vonalak esetében a szelekció következtében kialakult gyors növekedési erély és nagy testtömeg csökkent aktivitással társul. Ezek az állatok több időt töltenek pihenéssel és fekvéssel, miközben a kaparó és alomforgató viselkedés kevésbé intenzív. Az alacsonyabb aktivitási szint következtében

az alom tömörödik, romlik annak szellőzése, és az ürületekből származó nedvesség az alsóbb rétegekben halmozódik fel. A nedves, levegőtlen környezet kedvez a mikrobiális bontófolyamatoknak, különösen a húgysav ammóniává történő átalakulásának, amely az ammónia-emisszió egyik fő forrása. A folyamatot tovább súlyosbíthatja, hogy a nagyobb testtömeg miatt a húshibrid állatok erőteljesebben tömörítik az almot, ezáltal csökken annak porozitása és párologtató képessége (Groot Koerkamp, 1994).

A viselkedés, az alomállapot és a mikroklíma közötti szoros kapcsolat miatt az ammónia-emisszió mérséklésében nemcsak a takarmányozási és technológiai tényezőknek, hanem az állatok aktivitását és természetes viselkedését támogató tartástechnológiák megoldásainak is jelentős szerepük van.

3.4. Bélmikrobióta és pH-viszonyok

A két hasznosítási típus bélmikrobiótájának eltérése az egyik legújabb és legizgalmasabb kutatási terület a baromfiágazat fenntarthatósági törekvéseiben. A genetikai szelekció ugyanis nemcsak a külső morfológiát és az izom/tojásépítési kapacitást változtatta meg, hanem jelentős szelekciós nyomást gyakorolt az emésztőrendszer anatómiai és funkcionális sajátosságaira, beleértve a bélhosszúságot, az emésztési hatékonyságot, a takarmány passzázsidejét és a tápanyagok felszívódásának dinamikáját is (Clavijo és Flórez, 2018).

E változások közvetlenül befolyásolják a gastrointestinalis traktust kolonizáló mikrobiális közösségek összetételét és metabolikus aktivitását. A bélmikrobióta szerkezete meghatározó szerepet játszik a fehérje- és nitrogénanyagcsere folyamatainak alakulásában, így közvetetten hatással van a kiürített bélsár kémiai és fizikai tulajdonságaira, különösen annak nedvességtartalmára, pH-értékére, valamint a húgysav és egyéb nitrogéntartalmú metabolitok koncentrációjára (Shang és mtsai., 2018). Mindez kulcsfontosságú az ammóniaképződés szempontjából, mivel az ammónia-emisszió intenzitását alapvetően az alom nedvessége, mikrobiális aktivitása, valamint a nitrogénvegyületek mikrobiális lebontásának sebessége határozza meg (Borda-Molina és mtsai., 2018). Ennek következtében a hús- és tojástípusú baromfiállományok eltérő bélmikrobiom-összetétele közvetett, de jelentős hatást gyakorolhat az istálló levegőtisztaságára, az állatjóllétre, valamint a környezeti nitrogénterhelés mértékére.

3.4.1. Különbségek a két hasznosítási típus bélmikrobióta összetételében

A húshibrid vonalak emésztőrendszere viszonylag rövid, a takarmány passzázsideje rendkívül gyors, 2-4 óra. Ezzel összhangban az etetett takarmány jellemzően magas fehérjetartalmú, intenzív növekedést támogató (Oakley és mtsai., 2014). Ezzel szemben a tojótípusú vonalak emésztési folyamatai lassabbak és elnyújtottabbak, a takarmány tranzitideje megközelítőleg 5-8 óra, ami kedvezőbb

feltételeket teremt a vakbélben zajló mikrobiális fermentáció számára. Takarmánnyuk összetétele nagyobb arányban tartalmaz strukturális szénhidrátot (rostot), valamint kalciumot a tojáshéj képződéséhez szükséges fokozott kalciumellátás biztosítása érdekében (Gabriel és mtsai., 2006).

Mikrobiológiai vizsgálatok (főként a 16S RNS génszekvenálás) kimutatták, hogy a két hasznosítási típus vakbél- és bélflórájának összetétele is szignifikánsan eltér egymástól. A húshibrid vonalak bélflórájában általában magasabb a *Firmicutes* törzs aránya (ezen belül a *Clostridiales* rend tagjai dominálnak). Ez a profil a maximális energiakinyerést szolgálja a takarmányból (Videnska és mtsai., 2014). Ezzel szemben a tojóvonalaknál kiegyensúlyozottabb a *Bacteroidetes* törzs jelenléte, amelyek a komplex szénhidrátok (rostok) lebontásáért felelősek. A tojótípusú állományokban gyakran magasabb *Lactobacillus* arány figyelhető meg, mint a húshibridekben, ami különösen az élethét előrehaladtával mutatkozik meg (Videnska és mtsai., 2014).

3.4.2. A mikrobióta hatása a bélsár pH-értékére

A vastagbélben és a vakbélben élő mikroorganizmusok határozzák meg, hogy a rendelkezésre álló szubsztrátokból milyen fermentációs végtermékek (elsősorban rövid szénláncú zsírsavak, valamint egyéb szerves savak) keletkeznek. Ezek a metabolitok alapvetően befolyásolják a béltartalom pH-ját, amely kulcsfontosságú szabályozó tényező az ammónia nitrogénformái közötti egyensúlyban. Az ammónia-emisszió szempontjából meghatározó, hogy a pH közvetlenül befolyásolja az ammónia (NH_3) és az ammónium-ion (NH_4^+) közötti reverzibilis egyensúlyt. Lúgos kémhatás esetén ($\text{pH} > 7$) az egyensúly az illékony, gázfázisba könnyen átjutó ammónia irányába tolódik, ami fokozza az ammónia légköri emisszióját és ezáltal a nitrogén környezeti veszteségét. Ezzel szemben savasabb közegben a protonált, nem illékony ammónium-forma (NH_4^+) dominál, amely stabilabban marad a béltartalomban, és kisebb mértékben járul hozzá az emisszióhoz (Roberts és mtsai., 2007; Bist és mtsai., 2023).

A húshibridek fehérjedús diétája miatt a vékonybélből jelentős mennyiségű emésztetlen aminosav és nitrogénvegyület jut a vastagbélbe. Az itt élő proteolitikus baktériumok (pl. *Clostridium* és *Escherichia coli* törzsek) lebontják ezeket a fehérjéket, miközben bázikus karakterű melléktermékeket (aminokat, ammóniát) termelnek. Ez felemeli a bélsár pH-ját a lúgos tartományba, ami az alomra kerülve azonnali gázképződést indít be (Clavijo és Flórez, 2018; Woyengo és mtsai., 2023).

A tojóvonalak mikrobiótája a rostok bontása során nagy mennyiségű illó zsírsavat (ecetsav, propionsav, vajsav) és tejsavat termel. Ezek a szerves savak lecsökkennek a chymus pH-értékét pH 5,5-6,5 értékre. Ez a savas közeg a nitrogénvegyületek protonált formájának, az ammónium-ionnak (NH_4^+) irányába tolja el az egyensúlyt,

amely kevésbé illékony, és így stabilabban kötődik a bélsár mátrixához. Ennek eredményeként a tojóvonalak ürülékében kezdetben korlátozottabb az ammónia gáz formájában történő felszabadulása (Woyengo és mtsai., 2023).

3.4.3. A mikrobióta rendszer hatása a bélsár nedvességtartalmára

A baromfitartásban az alom nedvességtartalma kritikus környezeti tényező, amelynek alakulásában a bélmikrobióta összetétele és állapota meghatározó szerepet játszik. A nedves alom ugyanis optimális mikrokörnyezetet biztosít az ureáz enzim aktivitásához, amely a nitrogéntartalmú vegyületek lebontásával fokozott ammóniaképződéshez és ebből adódóan technológiai, valamint állategészségügyi problémákhoz vezet. A mikrobióta rendszer egyensúlyának felborulása közvetlenül befolyásolja a bélnyálkahártya vízfelszívó képességét (Awad és mtsai., 2017; Gilani és mtsai., 2021).

A modern húshibrid vonalak szelekciója a maximális növekedési erély irányába mutat, ami az állatokat állandó metabolikus kényszerpályára állítja. Ez az intenzív anyagcsere-állapot fokozott érzékenységet eredményez a bélrendszer mikrobiológiai stabilitásával szemben. Amennyiben a takarmány jelentős mennyiségű nem-keményítő poliszacharidot (NSP) tartalmaz, a béltartalom viszkozitása megnövekszik, ami kedvezőtlen irányba módosítja a bakteriális flórát. A lelassult paszszás és a viszkózus közeg elősegíti a patogén vagy szubpatogén mikroorganizmusok – különösen a *Clostridium perfringens* – elszaporodását. Az ebből kialakuló enyhe, gyakran szubklinikai bélgyulladás (enteritis) károsítja a bélbolyhokat, szignifikánsan rontva azok vízfelszívó képességét, ami végül nedves, nyálkás állagú bélsár ürítéséhez vezet (Teirlynck és mtsai., 2011).

A húshibrid szülőpárok esetében a technológiai indokolt takarmánykorlátozás további élettani kockázatot hordoz magában. Az etetés körüli pszichés stressz és a kompetitív viselkedés megváltoztatja a bél motilitását és felborítja a mikrobióta egyensúlyát (diszbiózis). Ezen állományokban gyakran megfigyelhető a kompenzatórikus jellegű, túlzott vízfelvétel, amely során az állatok rövid idő alatt nagy mennyiségű vizet fogyasztanak. Ez tovább terheli a már irritált és csökkent felszívókapacitású bélhámot, romlik a víz reszorpciója, melynek eredményeként a felesleges folyadék nagyobb arányban jut a distalis bélszakaszba, majd közvetlenül az alomba kerül kiválasztásra (Miles és mtsai., 2004).

Ezzel szemben a tojóvonalaknál a stabilabb mikrobióta-összetétel kulcsszerepet játszik a bél integritásának megőrzésében. A diverz baktériumközösség által termelt rövid szénláncú zsírsavak (SCFA), mint például a vajsav, elsődleges energiaforrásként szolgálnak a bélfal sejtjei (kolonociták és enterociták) számára. Az egészséges bélnyálkahártya hatékonyabban tartja fenn az ozmotikus egyensúlyt, optimális nátrium- és vízfelszívást biztosítva a distalis bélszakaszokban. Ennek eredményeként az ürülék konzisztenciája szárazabb és formázottabb marad,

ami érdemben hozzájárul az alom szárazon tartásához és az istállóklíma javításához, valamint mérsékli az ammónia-emissziót is, mivel a szárazabb alom kedvezőtlenebb mikrobiális környezetet biztosít az ureáz-aktív baktériumok számára (Gabriel és mtsai., 2006).

4. Emissziócsökkentő eljárások és jövőkép

4.1. A genetikai szelekció lehetőségei az alacsonyabb nitrogén-ürítés irányába

A baromfitenyésztésben a genetikai szelekció hagyományosan a kibocsátott végtermék (hús vagy tojás) mennyiségének maximalizálására és a takarmányértékesítés (FCR) javítására fókuszált. Ezen indirekt szelekciós stratégia a termelési hatékonyság fokozásán keresztül már eddig is jelentős mértékben hozzájárult az egységnyi állati termékre jutó környezeti terhelés mérsékléséhez. Ugyanakkor a modern genomikai eszközök (pl. SNP-chipek, marker-asszisztált szelekció) fejlődése ma már lehetővé teszi a közvetlen szelekciót a nitrogénürítés és az ammónia-emisszió csökkentése irányába (Mignon-Grasteau és mtsai., 2015).

Aggrey és mtsai (2010) kutatásai szerint a magasabb FCR hatékonyságra szelektált vonalak jobb nitrogén-hasznosítást mutatnak, mivel kevesebb felesleges fehérjét fogyasztanak el, így csökken a vakbélbe jutó emésztetlen nitrogén mennyisége. Ezzel összefüggésben a húshibrid genotípusok esetében jelenleg is zajlik azoknak a genetikai háttérmechanizmusoknak a szelekciója, amelyek az anyagcserét az anabolikus folyamatok, különösen a fehérjebeépítés irányába terelik. A nitrogénretenció növekedése egyúttal a húgysavszintézis csökkenését eredményezi a májban, ezáltal mérséklődik a bélsárral ürülő húgysav mennyisége is, amely az ammóniaképződés egyik meghatározó prekursora (Mignon-Grasteau és mtsai., 2015).

A modern genomikai eszközök alkalmazása lehetővé teszi a metabolikus folyamatok, valamint egyes anatómiai és élettani tulajdonságok célzott genetikai befolyásolását az emissziós terhelés mérséklése érdekében. Az aminosav-transzporter fehérjéket kódoló gének expressziójának szelekciója révén az állatok hatékonyabban hasznosítják a takarmány aminosav-összetételét, így alacsonyabb nyersfehérje-tartalmú takarmányozási rendszerek mellett is képesek genetikai potenciáljuk optimális kifejezésére. Ennek eredményeként az ürített nitrogén mennyisége akár 10–20%-kal is csökkenthető (Mignon-Grasteau és mtsai., 2015).

A húshibrid tenyészvonalak esetében a takarmányrestrikció és az intenzív növekedési potenciál következtében gyakran megfigyelhető fokozott vízfelvétel (polidipszia), amelynek háttérben genetikai hajlam és stresszreakciók is szerepet játszanak. Azoknak az egyedeknek a szelekciója, amelyek jobb stressztűrő

képességgel vagy mérsékeltebb kompenzatorikus ivási viselkedéssel rendelkeznek, hozzájárulhat az alom nedvességtartalmának csökkenéséhez. Ez közvetetten kedvezőtlenebb feltételeket teremthet az ureáz-aktivitású mikroorganizmusok számára, ezáltal mérsékelve az ammónia-képződés intenzitását is (*Miles és mtsai., 2004*).

A tojótípusú vonalakban a természetes kaparási és táplálékkereső viselkedés genetikai hátterének megőrzése hozzájárul az alom folyamatos mechanikai lazításához és aerob állapotának fenntartásához, ezáltal kedvezőtlenebb környezetet teremtve az anaerob lebontási folyamatok és az intenzív ammóniaképződés számára. A tojóhibridek genetikai szelekciója során elért takarmányhasznosítási javulás egyúttal az egységnyi tojástermelésre jutó nitrogén-kibocsátás mérséklődését is eredményezte, azonban a túlzottan lecsökkentett nitrogén-kiválasztás korlátozhatja a tojásfehérje-szintézishez szükséges aminosav-pufferkapacitást, ami kedvezőtlenül befolyásolhatja a tojástömeget, a tojástermelés perzisztenciáját, illetve a termelési stabilitást (*Pelletier és mtsai., 2014; Shim és mtsai., 2013*). Emellett a fehérje-anyagcsere túlzott restriktiója az immunfunkciók romlásához is vezethet, mivel az immunoglobulinok és egyéb immunológiai aktív molekulák szintézise jelentős mennyiségű aminosavat igényel (*Clavijo és Flórez, 2018*).

4.2. Vonat-specifikus takarmányozási stratégiák

A genetikai szelekció mellett a takarmányozási stratégiák jelentik a leggyorsabban és leghatékonyabban alkalmazható gyakorlati eszközt a baromfi tenyésztóvonalak nitrogén-ürítésének és az abból származó ammónia-emisszióinak a mérséklésére. A precíziós takarmányozás alapelve, hogy az állatok tápanyagellátását a fiziológiai szükségletekhez minél pontosabban igazítsa, ezáltal minimalizálva a felesleges nitrogénkiválasztást. Ennek megvalósítása elsősorban két stratégiai elemre épül: a takarmány nyersfehérje-tartalmának csökkentésére szintetikus aminosavak célzott kiegészítése mellett, valamint a különböző életkori és termelési szakaszok igényeihez igazított fázisos takarmányozási rendszerek alkalmazására.

4.2.1. Fázisos takarmányozás

A hagyományos takarmányozásban a biztonságra törekedve gyakran túl adagolják a nyersfehérjét, hogy a legfontosabb limitáló aminosavakból (metionin, lizin) biztosan elegendő álljon rendelkezésre, míg a modern takarmányozás nem nyersfehérjére, hanem emészthető aminosav-profilra formuláz. A nyersfehérje szintje drasztikusan csökkenthető, ha a hiányzó esszenciális aminosavakat ipari (kristályos vagy folyékony) formában (L-lizin, DL-metionin, L-treonin, L-valin) pótolják (*Roberts és mtsai., 2007*).

Az állatok tápanyag- és aminosav-szükséglete az életkorral és a termelési ciklussal (pl. tojásrakás intenzitása, testtömeg-növekedés lelassulása) folyamatosan változik. Nem megfelelően kialakított, illetve túl kevés takarmányozási fázist alkalmazó rendszerek esetén az állatok nitrogénellátása az egyes termelési periódusokban nem igazodik pontosan a fiziológiai igényekhez, ami az életpálya jelentős részében alul- vagy túlellátottságot eredményezhet. A fázisos takarmányozás lényege, hogy a nevelési és termelési időszakot több, rövidebb szakaszra bontják (pl. a korábbi 3 fázis helyett 5–6 fázis alkalmazása). Az egyes fázisok során a takarmány nyersfehérje-tartalmát fokozatosan mérséklik, igazodva az állatok életkorral változó fiziológiai igényeihez, a növekedési intenzitás csökkenéséhez, illetve a tojástermelési görbe perzisztenciájához (Norton és mtsai., 2019).

A legmodernebb telepeken a takarmány fázisait nem hetente váltják, hanem a precíziós állattenyésztési rendszerek segítségével naponta két alap-takarmánykeverék (egy magas fehérjetartalmú és egy alacsony fehérjetartalmú) automatizált, változó arányú online keverésével állítják elő a napi igényeknek megfelelő optimális diétát (Norton és mtsai., 2019). Ez a megközelítés jelentősen csökkenti a szükségletet meghaladó nitrogénbevitelből eredő nitrogénürítést, ezáltal mérsékelve az ammónia-emisszió környezeti terhelését is.

4.2.2. Kiegészítő takarmányozási stratégiák a bélműködés és az alomállapot optimalizálásában

A takarmányok elektrolit-tartalma (pl. nátrium-, kalium-, kloridion) befolyásolja a vér és az ürülék pH-ját. A takarmányok elektrolitegyensúly-értékének (dietary Electrolyte Balance; dEB) tudatos csökkentésével (enyhén savanyító diéta) elérhető, hogy a kiürített bélsár pH-ja 7 alá süllyedjen. Savas közegben a nitrogén nem-illékony ammónium-ion (NH_4^+) formájában kötődik meg az alomban, csökkentve a légköri emissziót (Bist és mtsai., 2023).

A nem-keményítő poliszacharidokat (NSP, pl. xilánok, béta-glükánok) bontó enzimek alkalmazása csökkenti a béltartalom viszkózitását. Ennek következtében javul az aminosavak felszívódása a vékonybélben, miközben csökken a vastagbélbe jutó emészthetetlen szubsztrátok mennyisége, ezáltal korlátozva a proteolitikus mikrobiális fermentációt. Mindez hozzájárul a híg, lúgos jellegű hasmenés kialakulásának megelőzéséhez (Teirlinck és mtsai., 2011).

3.táblázat. Takarmányozási stratégiák és környezeti hatásai

Stratégia	Mechanizmus	Ammónia-csökkentő hatás	Gazdasági / Biológiai előny
Nyersfehérje csökkentés + kristályos aminosavak adagolása	Kevesebb felesleges aminosav deaminálás a májban	10% emisszió-csökkenés minden 1% nyersfehérje csökkenés után	Kisebb vízfogyasztás, szárazabb alom, kevesebb láb-végprobléma
Többfázisos takarmányozás	A diéta folyamatosan követi a szükségesleti görbét	15–20%-os kumulatív nitrogén-ürítés csökkenés	Megszűnik a felesleges, drága fehérjehordozók etetése
Alacsonyabb dEB érték	Bélsár pH savanyítása (pH < 7)	Az ammónia gáz helyett NH_4^+ ion formában az alomban marad	Csökken az istállón belüli légzőszervi irritáció
Exogén proteázok és NSP-bontók	Javuló fehérje-emészthetőség a vékonybélben	Mérsékelt, de stabil emisszió-kontroll	Stabilabb bélmikrobióta, jobb takarmány-értékesítés

Forrás: Roberts és mtsai (2007), Bist és mtsai (2023)

4.3. Az ammóniakibocsátás mérséklésére irányuló eljárások

A megelőző beavatkozások mellett kiemelt jelentőséggel bírnak az utólagos, kibocsátáskezelő technológiák is. Amennyiben a nitrogén már kiválasztásra került, a fő cél annak mikrobiális átalakulásának – különösen a húgysav ammóniává történő lebontásának – gátlása, valamint az így keletkező ammónia gázfázisba jutásának és diffúziójának mérséklése. Az ammónia-emisszió intenzitását döntően befolyásolja az alom nedvességtartalma, pH-ja, hőmérséklete, valamint mikrobiális összetétele, ezért az alomkezelés komplex technológiai és biológiai szabályozási kérdés.

4.3.1. Alomszárítás és szellőztetés

Az ammónia képződéséhez nedvességre, megfelelő hőmérsékletre és lúgos pH-ra van szükség.

A száraz alomban az ureáz baktériumok inaktívak, ezért az istálló klímáját vezérlő rendszerek összehangolt működése nélkülözhetetlen a jó alomállapot kialakításához és fenntartásához. Lényeges, hogy a szellőztetési kapacitások beállítása az évszakos és meteorológiai viszonyokhoz igazodjon, a szakmai irányelvek figye-

lembevételével, továbbá – amennyiben rendelkezésre áll – a fűtési és hűtési rendszerek integrált alkalmazásával biztosítsuk az optimális környezeti feltételeket (*Liu és mtsai., 2007*).

4.3.2. Kémiai alomkezelők (alomsavanyítók)

Az ammónia képződésének és felszabadulásának kulcstényezője az alom pH-ja, mivel a NH_3 és NH_4^+ közötti egyensúly pH-függő. Semleges vagy lúgos környezetben az ammónia illékony formája dominál, amely könnyen a levegőbe jut, míg savas közegben az ammóniumion (NH_4^+) stabilizálódik, és az alomban marad. Ennek megfelelően az alom pH-jának csökkentése az egyik leghatékonyabb eszköz az ammóniaemisszió mérséklésére, amelyet mind biológiai, mind kémiai módszerekkel el lehet érni.

A kémiai alomkezelők, más néven alomsavanyítók, célzott beavatkozást jelentenek az ammóniaemisszió csökkentésére. Az alumínium-szulfát ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{--}18\text{H}_2\text{O}$), a nátrium-hidrogén-szulfát (NaHSO_4), valamint kisebb mértékben a kalcium-szulfát (CaSO_4) alkalmazása az alom pH-jának gyors csökkentését eredményezi. Ezek az anyagok az alom vízfázisában oldódva protonleadással savas közeget hoznak létre, amely az ammónia–ammónium egyensúlyt az illékony NH_3 forma helyett a nem illékony NH_4^+ irányába tolja el, ezáltal kémiaiilag „megköti” a nitrogént az alomban. A pH csökkenése jellemzően 7,0 körüli értékről 4,0–6,0 tartományba történik, amely nemcsak a kémiai egyensúlyt, hanem a mikrobiális aktivitást is jelentősen befolyásolja, különösen az ureáz-enzim termelő baktériumok gátlásán keresztül (*Miles és mtsai., 2004; Choi és Moore, 2008*).

4.3.3. Biológiai alomkezelők

A biológiai alomkezelők – a mikrobiológiai inokulumok (célzottan szelektált, élő, funkcionális mikroorganizmus-törzseket tartalmazó készítmények), enzimmészítmények, valamint ezek kombinációi – a modern, fenntartható baromfitenyésztési rendszerek és a precíziós istállómenedzsment egyre szélesebb körben alkalmazott eszközei. Míg a kémiai alomkezelők elsősorban a pH gyors csökkentésével és az ammónia (NH_3) protonálásával (NH_4^+ -képzés) hatnak, addig a biológiai készítmények az ammóniaképződés biológiai és mikrobiális alapfolyamatait módosítják, elsősorban az ureáz-aktivitás, a mikrobiális közösség összetétele és a nitrogén-mineralizáció dinamikájának befolyásolásán keresztül (*Bist és mtsai., 2023*). A biológiai alomkezelők hatásmechanizmusa azon alapul, hogy az alom mikrobiális összetételét célzottan módosítják jótékony mikroorganizmusok (baktériumok, élesztőgombák) és enzimek bevitelével, ezáltal versengési előnyt biztosítva a nemkívánatos, ammóniaképző mikroflórával szemben. A kijuttatott probiotikus törzsek – leggyakrabban *Bacillus spp.*, tejsavbaktériumok és élesztők – gyors kolonizációra képesek, és a rendelkezésre álló tápanyagok, valamint mikroélelőhelyek

hatékony felhasználásával kompetitív módon kiszorítják az ureolitikus, ammónia-termelő baktériumokat, így alapvetően átrendezik az alom mikrobiális egyensúlyát (*Clavijo és Flórez, 2018*).

Ezzel párhuzamosan egyes *Bacillus* törzsek olyan bioaktív metabolitokat is termelhetnek, amelyek közvetlenül befolyásolják az ureáz enzim aktivitását. Ez különösen jelentős, mivel az ammóniaképződés kulcslépése a húgysav mikrobiális bontása, amelyet az ureáz enzim katalizál; ennek gátlása a nitrogén ammóniává alakulásának sebességét jelentősen mérsékli, ezáltal csökkentve a gázképződést (*Miles és mtsai., 2004*).

A hatásmechanizmus harmadik fontos eleme a mikrobiális nitrogén-asszimiláció, amely során a heterotróf mikroorganizmusok az alomban jelen lévő ammónia-nitrogént nem gázfázisba juttatják, hanem saját biomasszájuk felépítéséhez használják fel. A rendelkezésre álló szerves szénforrások mellett így a nitrogén stabil, mikrobiális fehérjeformába épül be, ami csökkenti az illékony ammónia mennyiségét és hozzájárul az alom nitrogén-visszatartásához (*Shah és mtsai., 2007*).

Kísérletes vizsgálatok igazolták, hogy biológiai vagy metabolikus stimulánsok (pl. enzimeket, szénforrásokat vagy probiotikus törzseket tartalmazó készítmények) akár 40-60%-kal is csökkenthetik az istálló levegőjének ammónia-koncentrációját, bár hatásuk gyakran időben korlátozott és a környezeti feltételektől (hőmérséklet, nedvesség, alomösszetétel) függ (*Shah és mtsai., 2007*).

A tenyészvonalak hosszú termelési ciklusa miatt a biológiai alomkezelők alkalmazása több szinten is gazdaságilag és állategészségügyi szempontból is indokolt. A jótékony mikroorganizmusokat tartalmazó készítmények elősegítik az alom szerves komponenseinek (pl. szalma, faforgács) fokozott aerob degradációját, amely a komposztálódási folyamat gyorsulásához vezet. Ennek mellékhatásként mérsékelt hőtermelés alakul ki, ami fokozza az alom felszíni rétegének párolgását, ezáltal csökkenti annak nedvességtartalmát. A szárazabb alomkörnyezet következtében az ammóniaképződés feltételei romlanak, ami egyben a talpárna-gyulladás előfordulási gyakoriságának csökkenéséhez is hozzájárul (*Dawkins és mtsai., 2004*).

Ezzel szemben a kémiai savanyító kezelések hatása általában időben korlátozott, mivel a rendszer pufferkapacitása miatt hatóanyaguk relatíve gyorsan semlegesül. A biológiai készítményekben jelen lévő mikroorganizmusok – különösen a spóráképző törzsek – azonban képesek tartósan fennmaradni az alom mikrokörnyezetében. A frissen ürülő bélsár szubsztrátként szolgál számukra, így folyamatos kolonizáció és aktivitás révén egy dinamikus fenntartott, önszabályozó mikrobiológiai egyensúly alakul ki. Ennek eredményeként a rendszer hosszú távon is képes mérsékelni az ammóniatermelést és stabilizálni az alom higiéniai állapotát a teljes tartási ciklus során (*Bist és mtsai., 2023*).

4.4. A precíziós állattenyésztés (szenzorok, valós idejű monitoring) szerepe az ammóniaemisszió csökkentésében

A precíziós állattenyésztés és a valós idejű monitoring rendszerek integrálása kritikus fontosságúvá vált a baromfi tenyésztés menedzsmentjében. Mivel a hústípusú és tojótípusú szülőpárok genetikai értéke és biológiai érzékenysége rendkívül magas, az ammónia koncentrációjának és az azt befolyásoló mikroklimatikus tényezőknek a folyamatos követése ma már nem csupán jólléti, hanem komoly gazdasági és környezetvédelmi elvárás (Norton és mtsai., 2019).

A hagyományos, szakaszos és kézi ammóniamérések képtelenek követni az istállóklíma dinamikus változásait. A modern tenyésztéseken a folyamatos monitoring alapját az online gázzenzorok jelentik. Az elektrokémiai szenzorok mellett megjelentek a pontosabb, karbantartást alig igénylő optikai elven működő (pl. hangolható lézerdíódás abszorpciós spektroszkópia – TDLAS) mérőeszközök, amelyek képesek a madarak közvetlen környezetében mérni (Qi és mtsai., 2023).

Lehetőség van már arra is, hogy a szenzorok által közvetített valós idejű adatokat közvetlenül összekössék az istálló szellőztető számítógépével. Ha a rendszer az ammóniaszint emelkedő tendenciáját észleli – még a kritikus határértékek elérése előtt –, automatikusan növeli a légcserét vagy módosítja a légbeejtők szögét (Norton és mtsai., 2019; Banhazi és mtsai., 2012). Ez a prediktív beavatkozás minimalizálja azt az időszakot, amit a nagyértékű tenyészállatok irritatív gázkörnyezetben töltenek.

Banhazi és mtsai (2012) hangsúlyozzák, hogy a precíziós technológiák segítségével a nagyüzemi, zárt tartástechnológiájú telepeken is megvalósítható az úgynevezett „egyedi állatmenedzsment”. Az ammónia-emisszió kontextusában ez a megközelítés lehetővé teszi, hogy a rendszer ne csupán az egész istálló átlagos légminőségére reagáljon, hanem lokálisan, a kritikus zónákban avatkozzon be prediktív módon, a légcseré vagy a mikroklima célzott szabályozásával. Ez különösen fontos a heterogén istállóterekben, ahol az ammónia-felhalmozódás térben és időben erősen változó mintázatot mutat, és ahol a hagyományos, aggregált szenzoradatok gyakran elfedik a lokális emissziós csúcspontokat. A szenzorhálózatokra és valós idejű adatfeldolgozásra épülő rendszerek így lehetővé teszik a dinamikus ventilációvezérlést, a légáram optimalizálását, valamint a takarmányozási és alomkezelési beavatkozások finomhangolását is, ami végső soron az ammónia-kibocsátás csökkentését és az állatjólléti feltételek javítását eredményezi.

5. Következtetések és javaslatok

A baromfifajok sajátos, húgysav-alapú nitrogén-anyagcseréje meghatározó szerepet játszik az ammóniaképződés és az ammónia-emisszió kialakulásában. A húgysav mikrobiális lebontása során felszabaduló ammónia nemcsak az istálló levegőminőségét rontja, hanem jelentős állategészségügyi, állatjólléti és környezetvédelmi kockázatot is jelent. Az ammóniakibocsátás intenzitását komplex módon befolyásolják az alom fizikai tulajdonságai, a mikroklima, a takarmányozás, a bélmikrobióta összetétele, valamint az adott genetikai vonal termelési sajátosságai.

A húshibrid és a tojótípusú vonalak közötti különbségek jól mutatják, hogy a genetikai szelekció nemcsak a termelési paramétereket, hanem a nitrogénhasznosítás hatékonyságát és az emissziós terhelést is jelentősen módosítja. A gyors növekedésre szelektált húshibrid állományok nagyobb nitrogénürítése, sokszor nedvesebb alomállapota és eltérő mikrobiológiai környezete fokozott ammóniaképződéssel járhat, míg a tojótípusú állományok aktivitása, eltérő bélmikrobiótája és szárazabb alomállapota kedvezőbb emissziós viszonyokat eredményezhet.

A vizsgált szakirodalmi eredmények alapján megállapítható, hogy az ammónia-emisszió hatékony mérséklése csak komplex, integrált megközelítéssel valósítható meg. A precíziós takarmányozás, a nyersfehérje-szint optimalizálása, a fázisos etetés, az alomkezelési technológiák, valamint a genetikai szelekció együttes alkalmazása jelentős mértékben csökkentheti a nitrogénvesztéseket és az ammóniakibocsátást. Emellett a valós idejű monitoring rendszerek és a precíziós állattenyésztési technológiák lehetővé teszik a mikroklima és az emissziós folyamatok folyamatos szabályozását, ami a jövő fenntartható baromfitartási rendszereinek egyik kulcseleme lehet.

Összességében a nitrogén-anyagcsere, a bélmikrobióta összetétele, a tartástechnológia és a genetikai háttér közötti összefüggések mélyebb megértése alapvető fontosságú a környezetterhelés csökkentése, az állatjóllét javítása és a gazdaságos baromfitermelés fenntartása szempontjából.

6. Felhasznált irodalom

- Aggrey, S. E. – Karnuah, A. B. – Sebastian, B. – Anthony, N. B. (2010): Genetic properties of feed efficiency parameters in meat-type chickens. *Poultry Science*, 89(10), 2081–2088. <https://doi.org/10.1186/1297-9686-42-25>
- Awad, W. A. – Hess, C. – Hess, M. (2017): Enteric pathogens and their toxin-induced disruption of intestinal barrier function in poultry. *Avian Pathology*, 46(6), 643–655.
- Bacharach, U. (1957): The aerobic breakdown of uric acid by certain pseudomonads. *Journal of General Microbiology*, 17(1), 1–11. <https://doi.org/10.1099/00221287-17-1-1>

- Banhazi, T. M. – Lehr, H. – Black, J. L. – Crabtree, H. – Schofield, P. – Tschärke, M. – Berckmans, D. (2012): Precision Livestock Farming: An international review of scientific and commercial aspects. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 5(3), 1–9. <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20120503.001>
- Bist, R. B. – Chai, L. (2022): Advanced strategies for mitigating particulate matter generations in poultry houses. *Applied Sciences*, 12(22), Article 11323. <https://doi.org/10.3390/app122211323>
- Bist, R. B. – Subedi, S. – Chai, L. – Yang, X. (2023): Ammonia emissions, impacts, and mitigation strategies for poultry production: A critical review. *Journal of Environmental Management*, 328, Article 116919. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116919>
- Borda-Molina, D. – Seifert, J. – Camarinha-Silva, A. (2018): Current perspectives of the chicken gastrointestinal tract and its microbiome. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 16, 131–139. <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2018.03.002>
- Bregendahl, K. – Roberts, S. A. – Kerr, B. – Hoehler, D. (2008): Ideal ratios of indispensable amino acids in laying hens during early production. *Poultry Science*, 87(9), 1858–1864. <https://doi.org/10.3382/ps.2007-00412>
- Choi, I. H. – Moore, P. A. (2008): Effect of various litter amendments on ammonia volatilization and nitrogen content of poultry litter. *Journal of Applied Poultry Research*, 17(4), 454–462. <https://doi.org/10.3382/japr.2008-00012>
- Clarisse, L. – Clerbaux, C. – Dentener, F. – Hurtmans, D. – Coheur, P.-F. (2009): Global ammonia distribution derived from infrared satellite observations. *Nature Geoscience*, 2(7), 479–483. <https://doi.org/10.1038/ngeo551>
- Clavijo, V. – Flórez, M. J. (2018): The gastrointestinal microbiome and its association with the control of pathogens in broiler chicken production: A review. *Poultry Science*, 97(3), 1006–1021. <https://doi.org/10.3382/ps/pex359>
- Dawkins, M. S. – Donnelly, C. A. – Jones, T. A. (2004): Chicken welfare is influenced more by housing conditions than by stocking density. *Nature*, 427(6972), 342–344. <https://doi.org/10.1038/nature02226>
- European Environment Agency (2019): EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019: Technical guidance to prepare national emission inventories (EEA Report No. 13/2019). Publications Office of the European Union.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (2018): Nitrogen inputs to agricultural soils from livestock manure. New statistics from FAOSTAT. FAO Statistics Division. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i8153en>
- Gabriel, I. – Lessire, M. – Mallet, S. – Guillot, J. F. (2006): Microflora of the digestive tract: Critical factors and consequences for poultry. *World's Poultry Science Journal*, 62(3), 499–511. <https://doi.org/10.1017/S0043933906001115>
- Galloway, J. N. – Aber, J. D. – Erisman, J. W. – Seitzinger, S. P. – Howarth, R. W. – Cowling, E. B. – Cosby, B. J. (2003): The nitrogen cascade. *BioScience*, 53(4), 341–356. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2003\)053\[0341:TNC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2003)053[0341:TNC]2.0.CO;2)
- Gilani, S. – Chrystal, P. V. – Barekatain, R. (2021): Current experimental models, assessment and dietary modulations of intestinal permeability in broiler chickens. *Animal Nutrition*, 7(3), 801–811. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2021.03.001>

- Groot Koerkamp, P. W. G. (1994): Review on emissions of ammonia from housing systems for laying hens in relation to sources, processes, building design and manure handling. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 59(2), 73–87. <https://doi.org/10.1006/jaer.1994.1065>
- Groot Koerkamp, P. W. G. – Metz, J. H. M. – Uenk, G. H. – Phillips – V. R. – Holden, M. R. – Sneath, R. W. – Short, J. L. – White, R. P. – Hartung, J. – Seedorf, J. – Schröder, M. – Linkert, K. H. – Pedersen, S. (1998): Concentrations and emissions of ammonia in livestock buildings in Northern Europe. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 70(1), 79–95. <https://doi.org/10.1006/jaer.1998.0275>
- Gu, B. – Sutton, M. A. – Chang, S. X. – Ge, Y. – Chang, J. (2014): The role of ammonia in determining particulate matter formation and its health effects. *Environmental Science & Technology*, 48(24), 14104–14106.
- Hendriks, C. – Kranenburg, R. – Kuenen, J. J. P. – Van den Bril, B. – Verguts, V. – Schaap, M. (2016): Ammonia emission time profiles based on manure transport data improve ammonia modelling across north western Europe. *Atmospheric Environment*, 131, 83–96. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.01.043>
- Hertel, O. – Reis, S. – Skjøth, C. A. – Bleeker, A. – Harrison, R. – Cape, J. N. – Fowler, D. – Skiba, U. – Simpson, D. – Jickells, T. – Baker, A. – Kulmala, M. – Gyldenkerne, S. – Sørensen, L. L. – Erisman, J. W. (2011): Nitrogen processes in the atmosphere. In M. A. Sutton, C. M. Howard, J. W. Erisman, G. Billen, A. Bleeker, P. Grennfelt, H. van Grinsven, & B. Grizzetti (Eds.), *The European Nitrogen Assessment* (pp. 177–208). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511976988.012>
- Kappaun, K. – Piovesan, A. R. – Carlini, C. R. – Ligabue-Braun, R. (2018): Ureases: Historical aspects, catalytic, and non-catalytic properties – A review. *Journal of Advanced Research*, 13, 3–17. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2018.05.010>
- Krogdahl, A., – Dalsgaard, B. (1981). Estimation of nitrogen digestibility in poultry: Content and distribution of major urinary nitrogen compounds in excreta. *Poultry Science*, 60(11), 2480–2485. <https://doi.org/10.3382/ps.0602480>
- Krupa, S. V. (2003): Effects of atmospheric ammonia (NH₃) on terrestrial vegetation: A review. *Environmental Pollution*, 124(2), 179–221. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(02\)00434-7](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(02)00434-7)
- Leinonen, I. – Williams, A. G. – Wiseman, J. – Guy, J. – Kyriazakis, I. (2012): Predicting the environmental impacts of chicken systems: Egg production systems. *Poultry Science*, 91(8), 2066–2077. <https://doi.org/10.3382/ps.2011-01634>
- Liu, Z. – Wang, L. – Beasley, D. – Oviedo, E. (2007): Effect of moisture content on ammonia emissions from broiler litter: A laboratory study. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 58(1), 41–53. <https://doi.org/10.1007/s10874-007-9076-8>
- Mignon-Grasteau, S. – Chahnamian, M. – Chaumeil, J. – Alnahhas, N. – Bihan-Duval, E. – Carré, B. – Bastianelli, D. (2015): Genetic parameters of excretion in broilers and relationships with feed efficiency and anatomy of the gastrointestinal tract. *Poultry Science*, 94(9), 2045–2051.
- Miles, D. M. – Branton, S. L. – Lott, B. D. (2004): Atmospheric ammonia is detrimental to the performance of modern commercial broilers. *Poultry Science*, 83(10), 1650–1654. <https://doi.org/10.1093/ps/83.10.1650>
- Nahm, K. H. (2003): Evaluation of the nitrogen content in poultry manure. *World's Poultry Science Journal*, 59(1), 77–88. <https://doi.org/10.1079/WPS20030004>

- Ni, J. Q. (1999): Mechanistic models of ammonia release from liquid manure: A review. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 72(1), 1–17. <https://doi.org/10.1006/jaer.1998.0342>
- Nicholson, F. A. – Chambers, B. J. – Walker, A. W. (2004): Ammonia emissions from broiler litter and laying hen manure management systems. *Biosystems Engineering*, 89(2), 175–185. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.06.006>
- Norton, T. – Chen, C. – Croft, R. – Berckmans, D. (2019): Review: Precision livestock farming in poultry production – Current status and future prospects. *Animal*, 13(12), 2883–2894. <https://doi.org/10.1017/S175173111900199X>
- Oakley, B. B. – Lillehoj, H. S. – Kogut, M. H. – Kim, W. K. – Maurer, J. J. – Pedrosa, A. – Lee, M. D. – Collett, S. R. – Johnson, T. J. – Cox, N. A. (2014): The poultry gastrointestinal microbiome with a focus on broilers. *World's Poultry Science Journal*, 70(2), 311–322.
- Oenema, O. – Bannink, A. – Sommer, S. G. – Velthof, G. L. (2001): Gaseous nitrogen emissions from livestock farming systems. In R. F. Follett & J. L. Hatfield (Eds.), *Nitrogen in the Environment: Sources, Problems, and Management* (pp. 255–289). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-044450486-9/50012-1>
- Oliveira, M. D. – Sousa, F. C. – Saraz, J. O. – Calderano, A. A. – Tinôco, I. F. F. – Carneiro, A. P. S. (2021): Ammonia emission in poultry facilities: A review for tropical climate areas. *Atmosphere*, 12(9), Article 1091. <https://doi.org/10.3390/atmos12091091>
- Pelletier, N. – Ibarburu, M. – Xin, H. (2014): Environmental profile of the Canadian egg industry: The 50-year evolution of environmental footprinting and resource efficiency. *Poultry Science*, 93(1), 230–243.
- Qi, F. – Zhao, X. – Shi, Z. – Li, H. – Zhao, W. (2023): Environmental factor detection and analysis technologies in livestock and poultry houses: A review. *Agriculture*, 13(8), Article 1489. <https://doi.org/10.3390/agriculture13081489>
- Rafai, P. (2003): Állathigiénia és állomány-egészség. *Agroinform Kiadó*.
- Renema, R. A. – Robinson, F. E. – Newcombe, M. – McKay, R. I. (1999): Effects of body weight and feed allocation during sexual maturation in broiler breeder hens. 1. Growth and carcass characteristics. *Poultry Science*, 78(5), 619–628. <https://doi.org/10.1093/ps/78.5.619>
- Renema, R. A. – Robinson, F. E. (2004): Defining normal: Comparison of feed restriction and full feeding of female broiler breeders. *World's Poultry Science Journal*, 60(4), 508–522. <https://doi.org/10.1079/WPS200434>
- Roberts, S. A. – Xin, H. – Kerr, B. J. – Russell, J. R. – Bregendahl, K. (2007): Effects of dietary fiber and reduced crude protein on ammonia emission from laying-hen manure. *Poultry Science*, 86(8), 1625–1632. <https://doi.org/10.1093/ps/86.8.1625>
- Schefferle, H. E. (1965): The decomposition of uric acid in built up poultry litter. *Journal of Applied Bacteriology*, 28(3), 412–420. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.1965.tb02171.x>
- Shah, S. B. – Baird, C. L. – Rice, J. M. (2007): Effect of a metabolic stimulant on ammonia volatilization from broiler litter. *Journal of Applied Poultry Research*, 16(2), 240–247. <https://doi.org/10.1093/japr/16.2.240>
- Shang, Y. – Kumar, S. – Oakley, B. – Kim, W. K. (2018): Chicken gut microbiota: Importance and detection technology. *Frontiers in Veterinary Science*, 5, Article 254. <https://doi.org/10.3389/fvets.2018.00254>

- Shim, M. Y. – Song, E. – Billard, L. – Aggrey, S. E. – Pesti, G. M. – Sodsee, P. (2013): Effects of balanced dietary protein levels on egg production and egg quality parameters of individual commercial layers. *Poultry Science*, 92(10), 2687–2696. <https://doi.org/10.3382/ps.2012-02569>
- Sutton, M. A. – Howard, C. M. – Erisman, J. W. – Billen, G. – Bleeker, A. – Grennfelt, P. – van Grinsven, H. – Grizzetti, B. (2011): Assessing our nitrogen inheritance. *The European Nitrogen Assessment* (pp. 1–6). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511976988.004>
- Swelum, A. A. – El-Saadony, M. T. – Abd El-Hack, M. E. – Abo Ghanima, M. M. – Shukry, M. – Alhotan, R. A. – Hussein, E. O. S. – Suliman, G. M. – Ba-Awad, H. – Ammari, A. A. – Taha, A. E. – El-Tarabily, K. A. (2021): Ammonia emissions in poultry houses and microbial nitrification as a promising reduction strategy. *Science of The Total Environment*, 781, Article 146696. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146696>
- Teirlynck, E. – De Gussem, M. – Dewulf, J. – Haesebrouck, F. – Ducatelle, R. – Van Immerseel, F. (2011): Morphometric evaluation of “dysbacteriosis” in broilers. *Avian Pathology*, 40(2), 139–144. <https://doi.org/10.1080/03079457.2010.543414>
- United States Environmental Protection Agency (EPA) (2005): National Emission Inventory – Ammonia emissions from animal husbandry operations. U.S. Environmental Protection Agency.
- Videnska, P. – Rahman, M. M. – Faldynova, M. – Babak, V. – Matulova, M. – Prukner-Radovic, E. – Krizek, I. – Spiessova, Z. – Karahoda, L. – Rychlik, I. (2014): Succession and replacement of bacterial populations in the caecum of egg-laying hens over their whole life span. *PLoS ONE*, 9(12), Article e115142. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0115142>
- Woyengo, T. A. – Bach Knudsen, K. E. – Børsting, C. F. (2023): Low-protein diets for broilers: Current knowledge and potential strategies to improve performance and health, and to reduce environmental impact. *Animal Feed Science and Technology*, 297, Article 115574. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2023.115574>
- Xu, L. – Penner, J. E. (2012): Global simulations of nitrate and ammonium aerosols and their radiative effects. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(20), 9479–9504. <https://doi.org/10.5194/acp-12-9479-2012>
- Zuidhof, M. J. – Schneider, B. L. – Carney, V. L. – Korver, D. R. – Robinson, F. E. (2014): Growth, efficiency, and yield of commercial broilers from 1957, 1978, and 2005. *Poultry Science*, 93(12), 2970–2982. <https://doi.org/10.3382/ps.2014-04291>

Szerzők/Authors

Ádám, Ferenc

Széchenyi István Egyetem, Albert Kázmér Mosonmagyaróvári Kar
Széchenyi István University, Albert Kázmér Faculty of Mosonmagyaróvár
H-9200 Mosonmagyaróvár, Vár tér 2., e-mail: adam.ferenc@sze.hu

Lencsés-Varga, Erika

<https://orcid.org/0000-0002-6922-8551>

Széchenyi István Egyetem, Albert Kázmér Mosonmagyaróvári Kar
Széchenyi István University, Albert Kázmér Faculty of Mosonmagyaróvár
H-9200 Mosonmagyaróvár, Vár tér 2., e-mail: lencses-varga.erika@sze.hu

Alexy, Márta

<https://orcid.org/0000-0002-6252-2889>

Óbudai Egyetem, Neumann János Informatikai Kar
Óbuda University, John von Neumann Faculty of Informatics
H-1034 Budapest, Bécsi út 96/B, Hungary, e-mail: alexymarta@uni-obuda.hu

Érkezett/Recived: 2026. június 17.
Elfogadva/Accepted: 2026. június 24.



A cikkre a Creative Commons 4.0 standard licenc alábbi típusa vonatkozik: [CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)
The article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International license: [CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)