

STRATEGIJE ZMANJŠEVANJA EMISIJ METANA IZ PREBAVIL PREŽVEKOVALCEV

Marija Bric¹, Anton Hohler², Tomaž Cör³, Marija Klopčič⁴, Andrej Lavrenčič⁵

IZVLEČEK

Živinoreja velja za enega pomembnih virov emisij toplogrednih plinov antropogenega izvora, predvsem metana (CH₄) in didušikovega oksida (N₂O). Po navedbah Gerber in sod. (2010) naj bi živinoreja na globalni ravni prispevala 14,5 % vseh emisij toplogrednih plinov antropogenega izvora. Znotraj živinoreje naj bi reja prežvekovalcev prispevala okoli 80 % emisij, reja neprežvekovalcev pa okoli 9 % emisij toplogrednih plinov. Emisije metana iz prebavil prežvekovalcev niso samo vir emisij toplogrednih plinov, ampak predstavljajo tudi izgube potencialno izkoristljive bruto energije krmnega obroka. Sprememba krmnega obroka pri prežvekovalcih je neposredno povezana s spremembami v poteku procesa fermentacije v vampu, obenem pa predstavlja enega najučinkovitejših načinov za zmanjšanje sproščanja metana iz prebavil prežvekovalcev. Ustrezna sprememba krmnega obroka zagotavlja tako zmanjšanje emisij metana, kot tudi izboljšanje učinkovitosti prireje živali. V preteklosti je bilo opravljenih mnogo raziskav na temo zmanjševanja emisij metana s spreminjanjem poteka fermentacije v vampu, od sprememb v sestavi krmnega obroka in pogostosti krmjenja do uporabe raznoraznih krmnih dodatkov za živali, kot so maščobe, organske kisline, sekundarni rastlinski presnovki, kot so tanini, saponini, eterična olja, poleg njih pa še antibiotiki, probiotiki in encimi. Ker se reja prežvekovalcev v zadnjih letih srečuje z velikimi izzivi, saj mora istočasno zmanjšati izpuste emisij toplogrednih plinov ter zagotoviti zadostne količine kakovostne hrane za rastočo populacijo ljudi na svetu, bomo v tem prispevku predstavili možne strategije zmanjševanja emisij metana v prebavilih prežvekovalcev s pomočjo prilagajanja in spreminjanja krmnih obrokov živali.

KLJUČNE BESEDE: prežvekovalci, emisije metana, prilagajanje krmnih obrokov

MITIGATION STRATEGIES FOR REDUCING ENTERIC METHANE EMISSIONS FROM RUMINANTS

Livestock is considered to be an important source of greenhouse gas emissions of anthropogenic origin, especially methane (CH₄), ammonia (NH₃) and nitrous oxide (N₂O). According to Gerber et al. (2010), global livestock production is expected to contribute 14.5 % of all anthropogenic greenhouse gas emissions. Within the livestock sector, ruminant rearing is expected to contribute around 80 % of emissions and non-ruminant rearing around 9 % of greenhouse gas emissions. Methane emissions from the gastrointestinal tract of ruminants are not only a source of greenhouse gas emissions but also a source of losses of potentially utilizable

¹ mag. inž. zoot., Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za zootehniko, Groblje 3, 1230 Domžale

² mag. dipl. univ. inž. zoot., KGZS, KGZ Ptuj, Ormoška cesta 28, 2250 Ptuj

³ univ. dipl. inž. zoot., KGZS, KGZ Kranj, Cesta Iva Slavca 1, 4000 Kranj

⁴ izr. prof. dr., Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za zootehniko, Groblje 3, 1230 Domžale

⁵ izr. prof. dr., Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za zootehniko, Groblje 3, 1230 Domžale

gross energy of diet. The changes in the ruminant diets are directly related to the changes in the rumen fermentation process, and at the same time, they represent one of the most effective ways to reduce the releases of methane from the ruminant gastrointestinal tract. An appropriate change in the feed ration ensures both a reduction in methane emissions and an improvement in the efficiency of animal production. In the past, many research has been oriented to the reduction of methane emissions by changing the fermentation process in the rumen, from changes in the composition of feed ratio and frequency of feeding to the use of various feed supplements such as fats, organic acids, secondary plant metabolites (e.g. tannins, saponins, essential oils), antibiotics, probiotics and enzymes. As ruminant rearing is facing major challenges in recent years by simultaneously reducing greenhouse gas emissions and providing sufficient food for a growing human population in the world, we will present possible strategies to reduce methane emissions from ruminant digestive tracts with adjustment of feed rations.

KEYWORDS: ruminants, methane emissions, adjustment of feed rations

1 UVOD

Živinoreja prispeva h globalnim klimatskim spremembam tako posredno kot tudi neposredno. Najpomembnejši toplogredni plini, ki nastajajo pri reji živali so ogljikov dioksid (CO_2), metan (CH_4) in didušikov oksid (N_2O). Živinoreje nikoli ne obravnavamo kot neto producenta CO_2 , saj živali konzumirajo rastline, ki CO_2 porabljajo v procesu fotosinteze. Glavna toplogredna plina v sistemih reje domačih živali torej predstavljata CH_4 in N_2O (Steinfeld in sod., 2006). Omenjena plina imata tudi velik potencial globalnega segrevanja (GWP). Ena molekula CH_4 ima namreč $25\times$ večji toplogredni učinek kot ena molekula CO_2 ($\text{GWP} = 25 \text{ CO}_{2\text{eq}}$), ena molekula N_2O pa ima kar $298\times$ večji toplogredni učinek kot ena molekula CO_2 ($\text{GWP} = 298 \text{ CO}_{2\text{eq}}$) (Place in Mitloehner, 2021).

Kmetijstvo se v zadnjih letih srečuje z velikimi izzivi, saj mora bistveno zmanjšati svoj okoljski odtis in hkrati zagotoviti zadostno količino živalskih proizvodov za prehrano ljudi. Glede na predvideno rast svetovne populacije pričakujemo, do bo do leta 2050 potrebno povečati obseg pridelave hrane za okoli 70 %, kar posledično pomeni tudi večjo obremenitev okolja (Gerber in sod., 2010). Ker je kmetijski sektor v zelo veliki meri odvisen od okoljskih in podnebnih razmer, je potrebno razmišljati o takojšnji uvedbi trajnostnih strategij ublažitve vpliva kmetijske pridelave na okolje (Haque, 2018). V tem prispevku bomo predstavili predvsem tiste strategije zmanjševanja emisij CH_4 iz prebavil prežvekovalcev, na katere lahko vplivamo s spreminjanjem krmnih obrokov, tako njihove sestave kot s krmnimi dodatki.

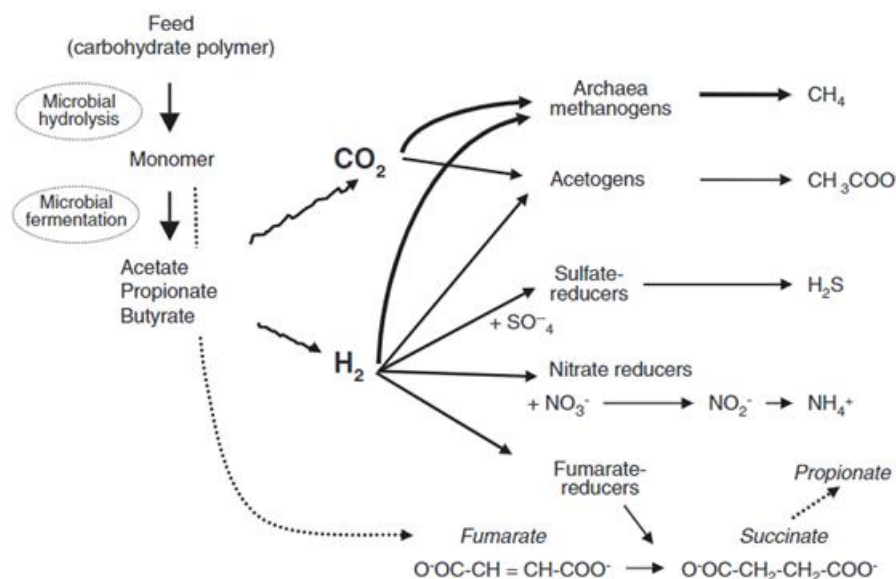


Figure 1: Schematic microbial fermentation of feed polysaccharides and H₂ reduction pathways in the rumen (Morgavi in sod., 2010)

Vsi (prehranski) ukrepi za zmanjševanje sproščanja metana se nanašajo na dva dejavnika, posredno preko spreminjanja količin in razmerij končnih produktov fermentacije v predželodcih (RR), kot so hlapne maščobne kisline (HMK), ob tvorbi katerih nastaja vodik in na neposredno inhibicijo delovanja metanogenih arhej oz. na preusmerjanje porabe (ponorov) vodika s tvorbe metana na npr. reduktivno acetogenezo, tvorbo jantarne kisline (slika 1).

2 UKREPI ZA ZMANJŠEVANJE PRODUKCIJE METANA V PREBAVILIH PREŽVEKOVALCEV

V zadnjih letih je bilo opravljenih mnogo študij na temo preučevanja možnih strategij zmanjševanja tvorbe in sproščanja CH₄ iz prebavil prežvekovalcev (Beauchemin in sod., 2008; Haque, 2018; Martin in sod., 2010; Morgavi in sod., 2010). Sprememba sestave krmnega obroka je enostaven in pragmatičen pristop, s katerim lahko hkrati izboljšamo produktivnost živali in istočasno tudi zmanjšamo sproščanje CH₄ (Beauchemin in sod., 2008). Količina v predželodcih nastalega CH₄ je odvisna predvsem od količine zaužite krme, vrste ogljikovih hidratov v krmnem obroku, sestave mikrobiološke združbe v predželodcih in hitrosti prehoda krme skozi prebavni trakt živali (Kumar in sod., 2014). Rezultat mikrobne prebave v predželodcih je produkcija hlapnih maščobnih kislin, večinoma očetne, propionske in maslene kisline, ki predstavljajo vir energije in substrate za sintezo drugih hranljivih snovi. Kot stranski produkt fermentacije v predželodcih nastajajo tudi plini (CO₂ in CH₄), ki jih žival izloča s pomočjo izrigavanja. Okoli 90 % CH₄, ki ga proizvedejo prežvekovalci, izvira iz predželodcev (Martin in sod., 2010). Fermentacija je proces, med katerim pride do dehidrogenacije kofaktorjev NADH, NADPH in FADH v NAD⁺, NADP⁺ in FAD⁺. Pri tem se sprosti vodik, ki ga metanogene arheje porabijo za redukcijo CO₂ v CH₄ po sledeči enačbi: $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$. Po tej presnovni poti nastane večina v predželodcih nastalega CH₄. Proces metanogeneze je torej nujno potreben za optimalno delovanje vampa, saj se z njim izognemo

prekomernemu kopičenju H_2 v vampu, kar lahko inhibitorno vpliva na delovanje dehidrogenaz (Martin in sod., 2010), po drugi strani pa se z CH_4 izgubi okrog od 2 do 12 % energije krme (Johnson in Johnson, 1995). Z mikrobn fermentacijo substratov dobimo torej različne končne produkte, pri tvorbi katerih ne nastanejo enake količine H_2 . Produkcija očetne in maslene kisline rezultira v neto sproščanju H_2 , kar spodbuja nastajanje CH_4 , medtem ko se v procesu nastajanja propionske kisline H_2 porablja (Martin in sod., 2010). Na sliki 2 so prikazani potencialni ukrepi za zmanjšanje emisij CH_4 iz prebavil prežvekovalcev. Emisije CH_4 lahko zmanjšamo s pomočjo modifikacij vampove mikrobiološke združbe, prilagajanja krmnih obrokov ali s spremembo samega načina reje in upravljanja na kmetiji (Cottle in sod., 2011). Strategije prilagajanja krmnih obrokov z namenom zmanjšanja izpustov CH_4 navadno delimo v dve kategoriji, in sicer: 1) izboljšanje kakovosti krmnega obroka in 2) krmljenje krmnih dodatkov, ki neposredno inhibirajo delovanje metanogenih arhej v predželodcih, ali pa spreminjajo presnovne procese tako, da je količina izhodiščnega substrata, potrebnega za potek metanogeneze, zmanjšana (Haque, 2018).

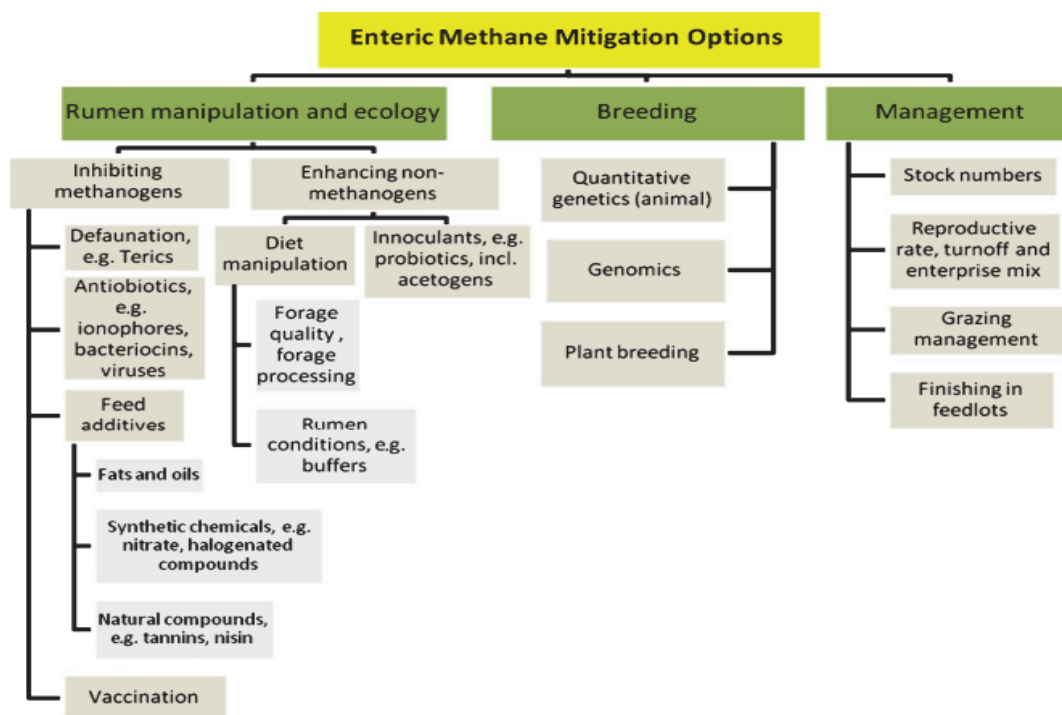


Figure 2: Potential options for reducing enteric methane production (Cottle et al., 2011)

2.1 HRANILNA VREDNOST KRMNEGA OBROKA

2.1.1 Voluminozna krma

Hranilna vrednost voluminozne krme, vključene v krmni obrok, vpliva na količino nastalega CH_4 v vampu. Voluminozna krma z veliko hranilno vrednostjo (HV), kot je denimo mlada voluminozna krma, zmanjšuje produkcijo CH_4 v vampu, saj takšna krma vsebuje veliko lahko topnih ogljikovih hidratov in malo vlaknine (NDV), kar se kaže v dobri prebavljivosti in krajšem času zadrževanja krme v prebavilih živali (Beever in sod., 1989). Nasprotno pa krmljenje starejše voluminozne krme rezultira v večjem obsegu nastajanja CH_4 v vampu

prežvekovalcev, saj vsebuje več vlaknine, iz katere nastajata med fermentacijo predvsem očetna in maslena kislina (Milich, 1999). Procesiranje npr. rezanje in peletiranje krme in različni postopki konzerviranja krme prav tako vplivajo na količino nastalega CH_4 v predželodcih. Manjši delčki krme se v predželodcih zadržujejo krajši čas, zato je obseg njihove razgradnje v predželodcih manjši (Boadi in sod., 2004), s tem pa ob fermentaciji nastane tudi manj očetne in maslene kisline. Obseg metanogeneze naj bi bil manjši pri silirani krmi, saj silirana krma že delno fermentira med procesom siliranja (Haque, 2018; Martin in sod., 2010). Spravilo travne silaže v primerjavi s pašo navadno poteka pri večji zrelosti rastlin, kar se odraža v nižji vsebnosti prebavljive organske snovi, nižjih vsebnostih sladkorjev in dušika ter vsebnosti laktata, kot posledice procesa siliranja. Pričakujemo, da bodo živali, krmljene s tovrstno krmo, proizvedle več CH_4 , kot živali na paši (Tamminga in sod., 2007). Robertson in Waghorn (2002) sta v svoji raziskavi ugotovila, da se je produkcija CH_4 pri kravah molznicah na paši linearno povečevala skupaj s povečevanjem zrelosti paše. Nasprotno pa koruzna silaža običajno vsebuje višje vsebnosti lahko prebavljivih ogljikovih hidratov, kot je denimo škrob, zaradi katerih je zauživanje SS večje, posledično se izboljša tudi prireja. Ob fermentaciji škroba nastaja veliko propionske kisline, kar se odraža v manjšem obsegu nastajanja CH_4 . Obstajajo različne možne razlage, po katerih naj bi s krmljenjem koruzne silaže zmanjšali emisije CH_4 iz prebavil prežvekovalcev (O'Mara in sod., 1998). Prvo smo že omenili, saj višje vsebnosti škroba v obroku favorizirajo nastajanje propionske kisline in ne očetne ali maslene kisline. Nadalje lahko večje zauživanje SS in posledično hitrejši prehod krme skozi prebavni trakt živali skrajša čas prebave in posledično zmanjšata obseg fermentacije, predvsem fermentacije vlaknine.

2.1.1.1 Močna krma

Visoko-produktivne živali imajo večje potrebe po hranilih, ki pa jih v sami voluminozni krmi ni dovolj oz. je ne morejo zaužiti v zadostnih količinah. Iz tega razloga moramo takšnim živalim poleg voluminozne krme ustrezne hranilne vrednosti ponuditi tudi krmo v obliki močne krme, ki vsebuje veliko dobro prebavljivih hranljivih snovi in skladno s tem tudi manjšo vsebnost vlaknine (Martin in sod., 2010). Večinoma krmljenje energijsko bogate močne krme povezujemo s povečanim zauživanjem suhe snovi in povečanim obsegom fermentacije, kar lahko povzroči velike spremembe okolja v predželodcih in sestavi mikrobiološke združbe v njih. Povečana količina močnih krmil v obroku zmanjša produkcijo CH_4 , saj so njihova pomembna sestavina škrob, ter v manjši meri tudi sladkorji, vsebujejo pa tudi malo vlaknine. Zato ta krma spodbuja nastajanje propionske kisline in posledično zmanjšuje obseg nastajanja CH_4 (Martin in sod., 2010). Najmanj izgub v obliki CH_4 od vseh vrst ogljikovih hidratov prispeva razgradnja škroba (Tamminga in sod., 2007). Vendar pa skladno s fermentacijo škroba nastaja veliko kislin, zato se pH v predželodcih znižuje. Nižji pH v vampu inhibira rast metanogenih arhej, zmanjšuje število protozojev in omejuje medvrstni prenos H_2 med metanogenimi arhejami in protozoji (Haque, 2018). Še hitreje kot škrob so v predželodcih fermentirani sladkorji, a v nasprotju s škrobom je sladkor hitro in popolnoma razgradljiv, ob njegovi fermentaciji pa nastaja veliko maslene kisline ter manj propionske kisline (Haque, 2018). Hindrischen in Kreuzer (2009) sta ugotovila, da se ob krmljenju saharoze zniža pH vampa in za 40 % poveča sproščanje CH_4 v primerjavi s krmljenjem obrokov z veliko škroba, vendar le pri visokih vrednostih pH v vampu. Krmljenje obrokov z visoko vsebnostjo škroba v

primerjavi s krmljenjem obrokov, ki temeljijo na voluminozni krmi, znižuje sproščanje CH₄ (Haque, 2018). Krmila z visokimi vsebnostmi škroba (pšenica, ječmen, koruza) bolj zavrejo produkcijo CH₄ kot krmila, bogata z vlaknino, kot so npr. pesni rezanci. Zamenjava pesnih rezancev z ječmenom v krmnem obroku z visoko vsebnostjo močne krme (70 %) je pri kravah molznicah zmanjšala sproščanje CH₄ za do 34 % (Beever in sod., 1989). Vendar moramo biti pozorni, saj koncentradi vsebujejo malo fizikalno učinkovite vlaknine, kar dolgoročno negativno vpliva na normalno delovanje vampa, in lahko vodi do pojava subakutne ali celo akutne acidoze. Tovrstna sestava krmnega obroka torej dolgoročno ne vpliva pozitivno na zdravje, dobro počutje in produktivnost prežvekovalcev (Haque, 2018). Krmljenje obrokov z ustreznim razmerjem med voluminozno krmo in močno krmo bi potencialno lahko vplivalo tako na zmanjšanje sproščanja CH₄ iz prebavil prežvekovalcev kot tudi na prirejo živali (Haque, 2018).

2.1.2 Uporaba krmnih dodatkov

2.1.2.1 Maščobe in maščobne kisline

Dodajanje maščob v krmni obrok živali je ena izmed možnosti zmanjšanja sproščanja emisij CH₄ s pomočjo prilagajanja krmnih obrokov za prežvekovalce. Poleg inhibitornega učinka, ki ga imajo maščobe na proces metanogeneze, te pogosto vključujemo v krmne obroke predvsem visoko produktivnih krav molznic z namenom zvišanja energetske vrednosti krmnih obrokov (Patra, 2013). Poznamo več načinov delovanja lipidov v prebavilih prežvekovalcev. Maščobe inhibirajo proces metanogeneze z zmanjševanjem števila in presnovne aktivnosti metanogenih arhej in protozojev, zmanjševanjem količine fermentirane krme v vampu in z biohidrogenacijo nenasičenih maščobnih kislin (Patra, 2013). Omenjene spremembe izzovejo spremembe v poteku fermentacije v smeri nastajanja propionske kisline in s tem tudi k povečanju porabe H₂. Vse te spremembe lahko negativno vplivajo na potek prebave, če sta število in aktivnost mikroorganizmov prizadeta, ali če negativen učinek na metanogene arheje vodi v akumulacijo H₂ v vampu živali (Martin in sod., 2010).

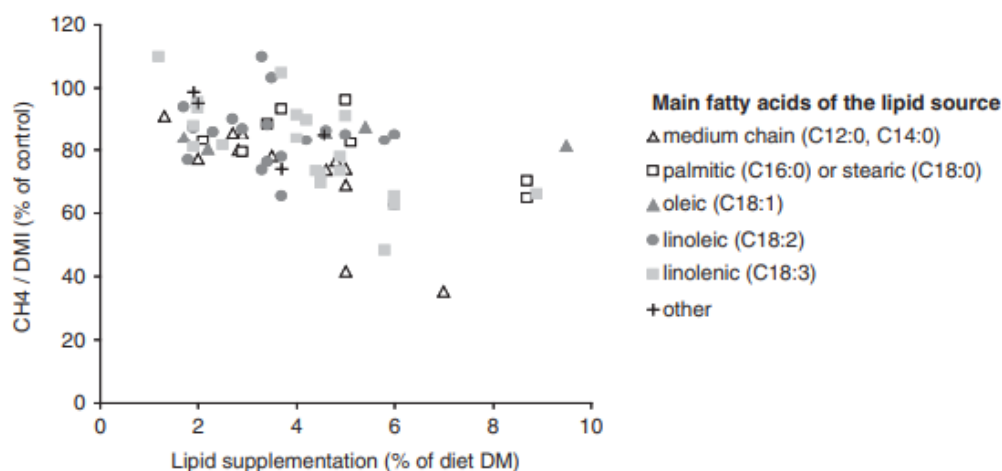


Figure 3: Effect of lipid supply on methane production in ruminants (Martin et al., 2010)

Zaviralni vpliv maščob na proizvodnjo CH₄ je odvisen od koncentracije, vrste in kemijske sestave v krmni obrok vključenih maščobnih kislin ter tudi same sestave krmnega obroka (Patra, 2013). Na to temo je bilo v preteklosti opravljenih že veliko tako *in vitro* kot tudi *in vivo* raziskav. Martin in sod. (2010) ugotavljajo, da srednje-verižne maščobne kisline najbolj zavirajo sproščanje CH₄, saj v povprečju povzročijo upad sproščanja emisij CH₄ za 7,3 % na vsak % dodane maščobe v krmni obrok. Dohme in sod. (2001) ugotavljajo, da imata dodatka lavrinske (C12:0) in miristinske (C14:0) maščobne kisline podoben vpliv na sproščanje CH₄, medtem ko ima dodatek kombinacije obeh omenjenih kislin sinergijski učinek, ki vodi v močno zmanjšanje sproščanja CH₄. Tudi vključevanje dodatkov, bogatih z večkrat nenasičenimi maščobnimi kislinami v krmni obrok za prežvekovalce, kot sta linolna (C18:2) in linolenska (C18:3) kislina, zaviralno vpliva na produkcijo CH₄ (Martin in sod., 2010). Precej manj izsledkov raziskav je na voljo za vpliv enkrat nenasičenih maščobnih kislin, kot je denimo oleinska kislina (C18:1) in nasičenih maščobnih kislin, kot sta palmitinska in stearinska kislina (C16 in C18). Van der Honig in sod. (1981) so ugotovili 30 % zmanjšanje sproščanja CH₄ pri živalih, ki so imele v krmni obrok vključen dodatek 12 % loja. Za razliko od omenjenih študij, pa nekatere študije (Johnson in sod., 2002) niso ugotovile inhibitornega učinka dodatka maščobnih kislin na količino nastalega CH₄ v vampu. Tudi Woodward in sod. (2006) niso odkrili vpliva dolgoročnega dodajanja maščob v krmni obrok za krave molznice na sproščanje emisij CH₄, kar bi lahko bila posledica prilagoditve vampovih mikroorganizmov na krmni obrok, bogat z maščobami (Woodward in sod., 2006). Večje koncentracije maščob v krmnih obrokih za prežvekovalce lahko sicer bistveno zmanjšajo tvorbo CH₄, vendar imajo pogosto negativen vpliv na prebavljivost krme in potek procesa fermentacije, kar posledično negativno vpliva tudi na proizvodno zmogljivost živali, zato je ključno določiti optimalno koncentracijo maščob v krmnih obrokih živali, ki izboljša produktivnost živali in hkrati zmanjša sproščanje CH₄ v ozračje (Patra, 2013).

2.1.2.2 Organske kisline

Tudi dodajanje organskih kislin, tj. vmesnih produktov anaerobne mikrobne razgradnje ogljikovih hidratov, predstavlja enega izmed možnih ukrepov za ublažitev produkcije CH₄. Organske kisline spodbudno vplivajo na nastajanje propionske kisline v predželodcih, da delujejo kot ponor H₂ in s tem zmanjšajo količino v vampu nastalega CH₄ (Haque, 2018). Newbold in Rode (2006) sta preučevala vpliv organskih kislin (jabolčna, fumarne in akrilne kislina) na produkcijo CH₄ v vampu prežvekovalcev. V *in vitro* pogojih sta se kot najučinkovitejša pri zmanjševanju produkcije CH₄ izkazala dodatka fumarne in akrilne kisline (Newbold in Rode, 2006), medtem ko je vpliv tovrstnih krmnih dodatkov v *in vivo* pogojih postregel z zelo variabilnimi rezultati in še ni dokončno potrjen (Martin in sod., 2010). Na primer McGinn in sod. (2004) niso ugotovili statistično značilnega vpliva tovrstnih dodatkov na sproščanje emisij CH₄ pri plemenskih telicah. Wood in sod. (2009) so ugotovili 60 do 76 % zmanjšanje nastajanja CH₄ po krmljenju obrokov z dodatkom 100 g fumarne kisline/kg SS jagnjetom, medtem ko so Foley in sod. (2009) na drugi strani ugotovili le 6 oz. 16 % zmanjšanje sproščanja CH₄ pri telicah, ki so jim v krmni obrok dodali 37,5 g jabolčne kisline/kg SS oz. 75 g jabolčne kisline/kg SS krmnega obroka. Pri dodajanju fumarne kisline v obliki kapsul jagnjetom, je bilo ugotovljeno kar 75 % zmanjšanje produkcije CH₄, brez negativnega vpliva

na prirast jagnjet (Wallace in sod., 2006). V nasprotju z jagnjeti pa inkapsulirana fumarna kislina ni imela statistično značilnega vpliva na zmanjšanje produkcije CH₄ pri kravah molznicah (McCourt in sod., 2008). Glede na različne izsledke različnih avtorjev raziskav bi bilo v bodoče potrebnih še več tovrstnih raziskav, ki bi dokončno potrdile oz. ovrgle vpliv dodajanja organskih kislin v krmne obroke za prežvekovalce na sproščanje emisij CH₄ (Martin in sod., 2010). Vsekakor pa visoke cene organskih kislin zavirajo obseg uporabe tovrstnih dodatkov v krmnih obrokih za prežvekovalce v optimalnih koncentracijah (Kumar in sod., 2014). Poleg vsega naštetega pa je bil učinek dodajanja organskih kislin na sproščanje CH₄ večinoma preverjan v *in vitro* pogojih, kar zmanjšuje zanesljivost rezultatov v praksi. Iz tega razloga bi bilo zato priporočljivo vložiti več truda v raziskave v *in vivo* pogojih (Haque, 2018).

2.1.2.3 Sekundarni rastlinski presnovki

Vse več je zanimanja za uporabo sekundarnih rastlinskih presnovkov kot strategijo blaženja sproščanja CH₄ (Jouany in Morgavi, 2007). Pripravki iz rastlin veljajo za naravno alternativo kemičnim dodatkom, katerih uporaba je bila prepovedana oz. njihova uporaba vzbuja pomisleke in odpor pri potrošnikih. Večina poskusov z rastlinskimi izvlečki je bila opravljena v *in vitro* pogojih, vpliv posameznih izvlečkov na proces metanogeneze pa ni povsem enoznačen. Večina pozitivnih rezultatov zadeva uporabo taninov in saponinov ter heterogeno skupino spojin, znanih kot eterična olja (Martin in sod., 2010).

Pri uporabi rastlin, ki vsebujejo tanine, so antimetanogeno delovanje pripisali predvsem rastlinam, ki vsebujejo kondenzirane tanine (Martin in sod., 2010). Ugotovljeno je bilo, da kondenzirani tanini, zmanjšajo obseg metanogeneze (Kumar in sod., 2014). Dodajanje ali krmljenje rastlin ali njihovih izvlečkov, ki vsebujejo kondenzirane tanine, kot so npr. *Lotus corniculatus*, *Lotus pedunculatus* in *Acacia mearnsii*, so zmanjšali tvorbo CH₄ pri drobnici (ovce, alpake, koze) do 30 %, niso pa vplivali na prebavljivost krme (Pinares-Patino in sod., 2003; Carulla in sod., 2005; Puchala in sod., 2005). Tanini lahko z baktericidnim ali bakteriostatičnim delovanjem zavirajo rast ali aktivnost metanogenih mikroorganizmov in protozojev v vampu (Haque, 2018). Mehanizem, ki zmanjšuje stopnjo metanogeneze, je odvisen od lastnosti kondenziranih taninov. Dodatek *Ficus pedunculatus* ali *Autocarous integrifolis* v krmni obrok prežvekovalcev zmanjša tvorbo CH₄, kot posledico defaunacije, a dodatek *Azadirachta indica* zmanjša stopnjo metanogeneze z neposrednim vplivom na delovanje metanogenih mikroorganizmov (Kumar in sod., 2014). Na splošno gledano je vpliv kondenziranih taninov na proces metanogeneze v vampu prežvekovalcev odvisen od strukture in koncentracije le-teh v krmnem obroku (Kumar in sod., 2014). Čeprav se zdi uporaba taninov obetavna strategija za ublažitev sproščanja CH₄ iz prebavil prežvekovalcev, ti zmanjšujejo prebavljivost krme in produktivnost živali, če je njihova koncentracija v krmnih obrokih previsoka. Le z dodatnimi raziskavami bi lahko ugotovili, kako doseči ravnovesje med zmanjšanjem CH₄ in možnimi antinutritivnimi stranskimi učinki, povezanimi z dodatkom taninov v krmni obrok prežvekovalcev (Haque, 2018).

Saponini so naravno prisotni površinsko aktivni glikozidi, ki jih najdemo v številnih vrstah gojenih in divjih rastlin, ki zmanjšujejo nastajanje CH₄ v vampu. Njihovo delovanje pri nižjih

koncentracijah negativno vpliva na praživali v vampu, medtem ko lahko višje koncentracije zavirajo delovanje metanogenih mikroorganizmov, bakterij in gliv v vampu (Martin in sod., 2010). Delujejo tako, da omejujejo razpoložljivost H_2 v vampu, s čimer zmanjšujejo obseg metanogeneze. Z dodatkom saponinov v krmni obrok živali lahko zmanjšamo sproščanje CH_4 za do 50 % (Haque, 2018). Guo in sod. (2008) so v *in vitro* pogojih preučevali učinek in način delovanja saponinov iz čajevca (*Camellia sinensis*) na mikrobno skupnost v vampu in proizvodnjo CH_4 . Ugotovili so zmanjšan obseg metanogeneze (8 %), pa tudi številčnost protozojev (50 %). Zmanjšala se je tudi aktivnost (76 %), ne pa tudi število metanogenih mikroorganizmov (Guo in sod., 2008).

Eterična olja so rastlinski sekundarni presnovki z zelo močnimi protimikrobnimi lastnostmi, ki zavirajo rast in preživetje večine mikroorganizmov v vampu. Način delovanja se razlikuje glede na uporabljeno vrsto eteričnega olja (Haque, 2018). V zadnjih letih je bilo opravljenih veliko raziskav, v katerih so preučevali potencial tovrstnih dodatkov na potek fermentacije v vampu. Dokazano je, da široka paleta eteričnih olj zmanjšuje proizvodnjo CH_4 v *in vitro* pogojih, učinek pa je odvisen od odmerka, s tem, da so visoki odmerki negativno vplivali na sam potek procesa fermentacije zaradi zmanjšanja tvorbe hlapnih maščobnih kislin in prebavljivosti krme (Patra in Yu, 2012). Bosquet in sod. (2005) so ugotovili, da česново olje zmanjša sproščanje CH_4 v *in vitro* pogojih. V bodoče bodo potrebne dodatne raziskave *in vivo*, z namenom določitve optimalnega odmerka tovrstnih aktivnih spojin, z upoštevanjem možne prilagoditve vampovih mikrobov, prisotnosti ostankov le-teh v živalskih proizvodih kot tudi možnih antinutritivnih stranskih učinkih na živali (Calsamiglia in sod., 2007).

2.1.2.4 Ionoformni antibiotiki

Med prehranskimi dodatki so ionoformni antibiotiki, kakršna sta denimo monensin in lasaloccid, ki sta se v preteklosti tipično uporabljala za izboljšanje produktivnosti živalske proizvodnje, znani po svojem učinku na zmanjšanje produkcije CH_4 v vampu (Beauchemin in sod., 2008). Antibiotiki, krmljeni v priporočenih koncentracijah, nimajo vpliva na metanogene mikroorganizme, pač pa vplivajo predvsem na delovanje drugih mikroorganizmov, prisotnih v prebavilih prežvekovalcev, pri katerih sprožijo spremembe v poteku fermentacije v smeri večje tvorbe propionske kisline in manjše tvorbe očetne kisline (Martin in sod., 2010). Ionoformni antibiotiki prav tako vplivajo na zmanjšanje števila praživali v prebavilih prežvekovalcev (Guan in sod., 2006). Omenjeni dodatki so zmanjšali količino sproščenega CH_4 za 0 do 25 %, učinek pa je trajal od nekaj dni do šest mesecev (Rumpler in sod., 1986; Odongo in sod., 2007). Duffield in sod. (2008) so ugotovili, da dodatek monensina v krmni obrok pri kravah molznicah zmanjša vnos suhe snovi za 0,3 kg/dan, poveča mlečnost za 0,7 kg/dan in izboljša učinkovitost prireje mleka za 2,5 %. Beauchemin in sod. (2008) so ugotavljali učinek dodatka monensina na produkcijo CH_4 in ugotovili, da dodatek manj kot 19 mg monensina/kg SS krmnega obroka ni imel vpliva na zmanjšanje sproščanja CH_4 , medtem ko je dodatek 24 do 35 mg monensina/kg SS v obroku zmanjšal sproščanje CH_4 za 3 do 8 % (Preglednica 1) (Beauchemin in sod., 2008). Uporaba antibiotikov v prehrani živali je v mnogih državah, vključno z Evropsko unijo, prepovedana (Martin in sod., 2010). Poleg tega zaviralni učinki antibiotikov na proizvodnjo

CH₄ najverjetneje niso dolgoročni, saj se vampovi mikroorganizmi lahko prilagodijo na njihovo delovanje (Haque, 2018).

Table 1: Effect of monensin on methane production (Beauchemin et al., 2008)

Animals	Diet	Dose		Days after dose	Methane emissions				Reference
		(mg/day)	(mg/kg DMI)		Control (g/day)	Monensin (g/day)	Control (g/kg DMI)	Monensin (g/kg DMI)	
<i>Controlled-release capsules</i>									
Dairy cows	Ryegrass pasture	166	11	30–90	328	313 n.s.	19.2	20.0 n.s.	Waghorn <i>et al.</i> (2007)
Dairy cows	Ryegrass pasture	320	29.6	11	179a	158b	16.9a	15.3b	Van Vugt <i>et al.</i> (2005)
Non-lactating cows	Ryegrass pasture	320	35.2	72	246a	223b	25.5	24.8 n.s.	Van Vugt <i>et al.</i> (2005)
Dairy cows	Ryegrass + white clover	320	17.5	23	330a	309b	17.5	16.9 n.s.	Van Vugt <i>et al.</i> (2005)
Dairy cows	Ryegrass + maize silage	320	18.1	58	350	356 n.s.	19.2	20.5 n.s.	Van Vugt <i>et al.</i> (2005)
Dairy cows	Ryegrass + grain	240	13	25, 85	341	365 n.s.	–	–	C. Grainger <i>et al.</i> (unpubl. data)
Dairy cows	Ryegrass + grain	240	13	83	376	386	–	–	C. Grainger <i>et al.</i> (unpubl. data)
Dairy cows	Ryegrass + grain	240	13	75	309	306 n.s.	16.7	17.0 n.s.	C. Grainger <i>et al.</i> (unpubl. data)
<i>Added to the ration</i>									
Dairy cows	Grain and forage	385	24	8–28	572a	517b	38.6a	35.7b	Sauer <i>et al.</i> (1998)
		385	24	8–28	599	598 n.s.	34.9	33.7 n.s.	Sauer <i>et al.</i> (1998)
Dairy cows	Grain and forage	473	24	(2nd time) monthly for 6 months	458.7a	428.6b	23.3a	22.4b	Odongo <i>et al.</i> (2007)
Beef cattle	High forage	246	33	19	166.2a	159.6b	22.6a	20.7b	McGinn <i>et al.</i> (2004)
Beef cattle	High grain	271	33	weekly for 16 weeks		–27% for 2 weeks, 0 by week 6	–	–	Guan <i>et al.</i> (2006)
Beef cattle	High forage	240	33	weekly for 16 weeks		–30% for 4 weeks, 0 by week 8	–	–	Guen <i>et al.</i> (2006)

2.1.2.5 Probiotiki

Probiotiki, kot so mlečno kislinske bakterije (*Lactobacillus plantarum*, *L. casei*, *L. acidophilus* in *Enterococcus faecium*), oacetnokislinske in propionokislinske bakterije (*Selenomonas ruminantium* in *Megasphaera elsdenii*) ter kvasovke (*Saccharomyces cerevisiae* in *Aspergillus oryzae*), se pogosto uporabljajo kot nutritivni dodatki v prehrani ljudi in živali. Probiotiki, ki temeljijo predvsem na delovanju kvasovk rodu *Saccharomyces cerevisiae* se vse pogosteje uporabljajo v prehrani prežvekovalcev za izboljšanje poteka fermentacije v vampu, povečanja zauživanja suhe snovi krmnega obroka in mlečnosti (Martin in sod., 2010). Zaradi dostopne cene in širokih možnosti uporabe v reji prežvekovalcev, ima uporaba probiotikov, ki znižujejo produkcijo CH₄, veliko potenciala pri zmanjševanju emisij CH₄ (Haque, 2018).

2.1.2.6 Encimi

Vse več je dokazov, ki nakazujejo, da lahko uporaba encimov izboljša prebavo vlaknin in izboljša produktivnost prežvekovalcev (Beauchemin in sod., 2003). Encimi, ki izboljšajo razgradnjo vlaknine na enostavnejše ogljikove hidrate, običajno ožijo razmerje med očetno in propionsko kislino v predželodcih (Eun in Beauchemin, 2007), kar naj bi bil primarni mehanizem, s katerim se zmanjša nastajanje CH₄ (Beauchemin in sod., 2008). Dosedanje

ugotovitve kažejo, da potencial encimskih dodatkov na zmanjšanje emisij CH₄ v rejah prežvekovalcev zahteva nadaljnje raziskave (Beauchemin in sod., 2008).

3 ZAKLJUČKI

Trenutno imamo na voljo številne možnosti za zmanjšanje emisij CH₄ s pomočjo prilagoditve krmnih obrokov za prežvekovalce. Izbira in uporaba visokokakovostne krme, strateško dopolnjevanje krmnih obrokov z močno krmo in drugimi prehranskimi dodatki, veljajo za takojšnje in trajnostne pristope k zmanjšanju sproščanja CH₄ iz prebavil prežvekovalcev. Krmljenje obrokov z večjo vsebnostjo lahko topnih ogljikovih hidratov in manj vlakninami ne pripomore le k manjšemu sproščanju emisij CH₄ na kg zaužite krme, temveč omogoča tudi večjo prirejo živali, kar pomeni, da omenjeni pristop predstavlja trenutno najučinkovitejši način za zmanjševanje emisij CH₄. Uporaba antibiotikov in rastlinskih sekundarnih presnovkov omogoča prehodne učinke na zmanjšanje CH₄, vendar pa vpliv tovrstnih dodatkov na tvorbo CH₄ še ni dokončno dokazan. Pričakujemo lahko, da bo uvedba tovrstnih strategij v praksi na kmetijah postopna in omejena predvsem na ukrepe, ki izboljšujejo konverzijo krme in proizvodnost živali.

4 ZAHVALA

Študijo je finančno podprla Evropska komisija iz programa EIP-AGRI in Programa razvoja podeželja Ministrstva za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano RS, za kar se iskreno zahvaljujemo. Raziskava je bila izvedena v okviru projekta EIP-AGRI »Kroženje hranil, organske snovi, procesov in informacij v kmetijstvu (primer govedorejske kmetije)« in EIP-AGRI projekta »Inovativni okoljsko-podnebno naravnani sistemi upravljanja govedorejske kmetije za zagotavljanje pridelave krme in optimalnih pogojev reje govedi«.

5 VIRI IN LITERATURA

- Beauchemin K. A., Colombatto D., Morgavi D. P., Yang W. Z. 2003. Use of exogenous fibrolytic enzymes to improve feed utilization by ruminants. *J. Anim. Sci.*, 81: E37-47.
- Beauchemin K. A., Kreuzer M., O'Mara F., McAllister T. A. 2008. Nutritional management of enteric methane abatement: a review. *Australian J. Experim. Agric.*, 48, 21-27.
- Beever D. E., Cammell S. B., Sutto J. D., Spooner M. C., Haines M. J., Harland J. I. 1989. Effects of concentrate type on energy utilization in lactating dairy cows. *EAAP Publication No. 43: 33-36*. Wageningen, The Netherlands.
- Boadi D., Benchaar C., Chiquette J., Masse D. 2004. Mitigation strategies to reduce enteric methane emissions from dairy cows: update review. *Can. J. of Anim. Sci.*, 84: 319-335.
- Bosquet M., Calsamiglia S., Ferret A., Carro M. D., Kamel C. 2005. Effect of garlic oil and four of its compounds on rumen microbial fermentation. *J. Dairy Sci.*, 88, 4393-4404.
- Calsamiglia S., Busquet M., Cardazo P. W., Castillejos L., Ferret A. 2007. Essential oils modifiers of rumen microbial fermentation. *J. Dairy Sci.*, 90, 2580-2595.

- Carulla J.E., Kreuzer M., Machmüller A., Hess H.D. 2005. Supplementation of *Acacia mearnsii* tannins decreases methanogenesis and urinary nitrogen in forage-fed sheep. *Australian J. Agric. Res.*, 56, 961-970.
- Cottle D. J., Nolan V. J., Wiedemann S. G. 2011. Ruminant enteric methane mitigation: a review. *Anim. Prod. Sci.*, 51, 491-514.
- Dohme F., Machmüller A., Wasserfallen A., Kreuzer M. 2001. Ruminant methanogenesis as influenced by individual fatty acids supplemented to complete ruminant diets. *Letters Appl. Microbiol.* 32: 47-51.
- Duffield T. F., Rabiee A. R., Lean I. J. 2008. A meta-analysis of the impact of monensin in lactating dairy cattle. *J. Dairy. Sci.*, 91: 1347-1360.
- Eun S. J., Beauchemin K. A. 2007. Assessment of the efficacy of varying experimental exogenous fibrolytic enzymes using in vitro fermentation characteristics. *Anim. Feed. Sci. Technol.* 137: 298-315.
- Foley P.A., Kenny D.A., Callan J.J., Boland T.M., O'Mara F.P. 2009. Effect of DL-malic acid supplementation on feed intake, methane emission, and rumen fermentation in beef cattle. *J. Anim. Sci.*, 87, 1048-1057.
- Gerber P., Vellinga T., Opio C., Henderson B., Steinfeld H. 2010. Greenhouse gas emissions from the dairy sector – A life cycle assessment. FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Animal Production and Health Division, Rome, Italy.
- Guan H., Wittenberg K. M., Ominski K. H., Krause D. O. 2006. Efficacy of ionophores in cattle diets for mitigation of enteric methane. *J. Anim. Sci.*, 84, 1896-1906.
- Guo Y. Q., Liu J. X., Lu Y., Zhu W. Y., Denman S. E., McSweeney C. S. 2008. Effect of tea saponin on methanogenesis, microbial community structure and expression of *mcrA* gene, in cultures of rumen micro-organisms. *Letters Appl. Microbiol.*, 47, 421-426.
- Haque M. N. 2018. Dietary manipulation: a sustainable way to mitigate methane emissions from ruminants. *Jo. Anim. Sci. Technol.*, 60, 15.
- Hindrischen I. K. in Kreuzer M. 2009. High methanogenic potential of sucrose compared with starch at high ruminal pH. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.*, 93, 61-65.
- Johnson K. A. in Johnson D. E. 1995. Methane emissions from cattle. *J. Anim. Sci.*, 73, 2483-2492.
- Johnson K. A., Kincaid R. L., Westberg H. H., Gaskins C. T., Lamb B. K., Cronrath J. D. 2002. The effect of oilseeds in diets of lactating cows on milk production and methane emissions. *J. Dairy Sci.*, 85, 1509-1515.
- Jouany J. P., Morgavi D. P. 2007. Use of 'natural' products as alternatives to antibiotic feed additives in ruminant production. *Animal*, 1, 1443-1466.
- Kumar S., Choudhury P. K., Carro M. D., Griffith G. W., Dagar S. S., Puniya M., Calabro S., Ravella S. R., Dhewa T., Upadhyay R. C., Sirohi S. K., Kundu S. S., Wanapat M., Puniya A. K. 2014. New aspects and strategies for methane mitigation from ruminants. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 98, 31-44.
- Martin C., Morgavi D. P., Doreau M. 2010. Methane mitigation in ruminants: from microbe to the farm scale. *Animal*, 4, 351-365.
- McCourt A.R., Yan T., Mayne S., Wallace J. 2008. Effect of dietary inclusion of encapsulated fumaric acid on methane production from grazing dairy cows. V: Proceedings of the British Society of Animal Science, 31 March–2 April 2008, Scarborough, UK, 64 str.

- McGinn S.M., Beauchemin K.A., Coates T., Colombatto D. 2004. Methane emissions from beef cattle: effect of monensin, sunflower oil, enzymes, yeast and fumaric acid. *J. Anim. Sci.*, 82, 3346-3356.
- Milich L. 1999. The role of methane in global warming: where might mitigation strategies be focused? *Glob. Environ. Chang.*, 9, 179-201.
- Morgavi D. P., Forano E., Martin C., Newbold C. J. 2010. Microbial ecosystem and methanogenesis in ruminants. *Animal*, 4, 1024-1036.
- Newbold C. J., Rode L. M. 2006. Dietary additives to control methanogenesis in the rumen. V: Greenhouse gases and animal agriculture: an update. Elsevier International Congress Series 1293, 138–147. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Odongo N. E., Bagg R., Vessie G., Dick P., Or-Rashid M. M., Hook S. E., Gray J. T., Kebreab E. France J., McBride B. W. 2007. Long-term effects of feeding monensin on methane production in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.*, 90, 1781-1788.
- O'Mara F. P., Fitzgerald J. J., Murphy J. J., Rath M. 1998. The effect on milk production of replacing grass silage with maize silage in the diet of dairy cows. *Livest. Prod. Sci.*, 55: 79-87.
- Patra A. K. 2013. The effect of dietary fats on methane emissions, and its other effects on digestibility, rumen fermentation and lactation performance in cattle: A meta-analysis. *Livestock Sci.*, 155, 244-254.
- Patra A. K. in Yu Z. 2012. Effects of essential oils on methane production and fermentation by, and abundance and diversity of rumen microbial populations. *Appl. Environ. Microbiol.*, 78: 4271-4280.
- Pinares – Patiño C. S., Ulyatt M. J., Lassey K. R., Barry T. N., Holmes C. W. 2003. Persistence of differences between sheep and methane emission under generous grazing conditions. *J. Agric. Sci.*, 140: 227-233.
- Place S. E., Mitloehner F. M. 2021. Pathway to climate neutrality for U.S. beef and dairy cattle production. University of California, Davis, Clear Center; 16 str.
- Puchala R., Min B. R., Goetsch A. L., Sahlu T. 2005. The effect of a condensed tannin-containing forage on methane emission by goats. *J. Anim. Sci.*, 83, 182-186.
- Robertson L. J., Waghorn G. C. 2002. Dairy industry perspectives on methane emissions and production from cattle fed pasture or total mixed rations in New Zealand. *Proc. New Zealand Soc. Anim. Prod.*, 62, 213-218.
- Rumpler W. V., Johnson D. E., Bates D. B. 1986. The effect of high dietary cation concentration on methanogenesis by steers fed diets with and without ionophores. *J. Anim. Sci.*, 62, 1737-1741.
- Steinfeld H., Gerber P., Wassenaar T., Castel V., Rosales M., de Haan C. 2006. Livestocks long shadow: environmental issues and options. Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome, Italy.
- Tamminga S., Bannink A., Dijkstra J., Zom R. 2007. Feeding strategies to reduce methane loss in cattle. Lelystad: The Netherlands: Animal Nutrition and Animal Sciences Group, Wageningen Report.
- Van der Honing Y., Wiema, B.J., Steg A., van Donselaar B. 1981. The effect of fat supplementation of concentrates on digestion and utilization of energy by productive dairy cows. *Netherlands J. Agric. Sci.*, 29, 79-92.

- Wallace R. J., Wood T. A., Rowe A., Price J., Yanez D. R., Williams S. P., Newbold C. J. 2006. Encapsulated fumaric acid as a means of decreasing ruminal methane emissions. V: Greenhouse gases and animal agriculture: an update. Elsevier International Congress Series 1293: 148-151. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Wood T., Wallace R., Rowe A., Price J., Yañez-Ruiz D., Murray P., Newbold C. 2009. Encapsulated fumaric acid as a feed ingredient to decrease ruminal methane emissions. *Anim. Feed. Sci. Technol.*, 152: 62-71.
- Woodward S. L., Waghorn G. C., Thomson N. A. 2006. Supplementing dairy cows with oils to improve performance and reduce methane – does it work? *Proc. New Zealand Soc. Anim. Prod.*, 66, 176-181.