



Anaerobic Co-Digestion of Cattle Manure with Ruminant Waste to Increase Biogas Production

Fatih Şevki Erkuş^{1,a,*}, Koray Tuncay^{1,b}

¹Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Van Yüzüncü Yıl University, 65080 Van, Türkiye

*Corresponding author

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p><i>Research Article</i></p> <p>Received : 27/04/2022 Accepted : 08/06/2022</p> <p>Keywords: Anaerobic co-digestion Biogas Biomethane potential Ruminant waste Cattle manure</p>	<p>Cattle manure (CM) is mostly used as an inoculum in order to start-up of agricultural biogas plants or as a co-substrate in the anaerobic digestion of lignocellulosic content. Rumen fluid microbiota is also considered to be effective in lignocellulose digestion. It is known that microorganisms in the ruminal waste facilitate the hydrolysis of lignocellulosic structures. However, there are few studies on the inoculum effect of rumen microorganisms on bioreactor performances when rumen content is used as co-substrate and inoculum together with cattle manure, and it is not clear how rumen waste can be used in various anaerobic digestion systems. In this study, biogas production efficiencies obtained from lignocellulosic content in mono and cosubstrate (1:1 and 1:2 Volatile Solids) bioreactors formed by using ruminal waste (RW) and CM microbial communities were investigated. In order to determine the biogas production efficiencies, biomethane potential (BMP) experiments that simulate anaerobic digestion process conditions in a laboratory environment were applied. Treatment with 50% application of RW cosubstrate, 65.51% biogas and 70.64% methane production efficiency increases were achieved compared to monosubstrate CM bioreactor.</p>

Türk Tarım – Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi, 10(7): 1264-1269, 2022

Biyogaz Miktarının Artırılması Amacıyla Sığır Gübresi ve Rumen Atıklarının Anaerobik Birlikte Sindirimi

MAKALE BİLGİSİ	ÖZ
<p><i>Araştırma Makalesi</i></p> <p>Geliş : 27/04/2022 Kabul : 08/06/2022</p> <p>Anahtar Kelimeler: Anaerobik birlikte çürütme Biyogaz Biyometan potansiyeli Rumen atığı Sığır gübresi</p>	<p>Tarımsal biyogaz tesislerinin başlatılması için çoğunlukla büyükbaş hayvan gübresi inokulum (aşı) veya lignoselülozik hammaddenin anaerobik sindiriminde kosubstrat olarak kullanılır. Rumen sıvısı mikrobiyotasının da lignoselüloz sindiriminde etkili olduğu kabul edilmektedir. Rumen atığında (RA) bulunan mikroorganizmaların, lignoselülozik yapıların hidrolizini kolaylaştırdığı bilinmektedir. Ancak rumen atığının sığır gübresi (SG) ile birlikte kosubstrat ve inokulum olarak kullanıldığı durumda rumen mikroorganizmalarının biyoreaktör performanslarında gösterdikleri inokulum etkisi konusunda sınırlı çalışma vardır ve çeşitli anaerobik çürütme sistemlerinde rumen atığının nasıl kullanılabileceği açık değildir. Bu çalışmada RA ve SG mikrobiyal toplulukları ile oluşturulan mono ve kosubstrat (1:1 ve 1:2 Uçucu Katı Madde) biyoreaktörlerinde lignoselülozik içerikten elde edilen biyogaz üretim verimleri araştırılmıştır. Biyogaz üretim verimlerini tespit edebilmek amacıyla anaerobik sindirim süreci koşullarını laboratuvar ortamında simüle eden biyometan potansiyeli (BMP) denemeleri uygulanmıştır. RA kosubstratının %50 oranında uygulanmasıyla monosubstrat SG biyoreaktörüne göre %65,51 biyogaz ve %70,64 biyometan üretim verim artışı sağlanmıştır.</p>

^a fatiherkus@yyu.edu.tr

^{id} <https://orcid.org/0000-0001-8541-7048>

^b krytncy@gmail.com

^{id} <https://orcid.org/0000-0002-5851-5985>



Giriş

Anaerobik sindirim, bir dizi mikroorganizma faaliyeti ile selüloz içeren biyokütleyi (organik maddeyi) biyogaza dönüştürebilen karmaşık doğal bir biyolojik süreçtir (Mirmohamadsadeghi ve ark., 2021). Biyokütle atıkları, en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olarak kabul edilmektedir (Appels ve ark., 2011). Anaerobik çürütme, biyoenerji geri kazanımı, bitki besin maddesi geri kazanımı ve karbon ayak izinin azaltılması amacıyla alternatif çözümler sunabilmektedir (Ma ve ark., 2018).

Lignoselüloz tükenmeyen ve her yerde bulunabilen doğal bir kaynaktır. Toplumsal ve çevresel sürdürülebilirlik kapsamında lignoselülozik biyokütleden biyogaz üretimi, fosil yakıt kullanımının azaltılmasında önemli bir adımdır. Ancak lignoselülozun doğası gereği heterojen ve anaerobik sindirime dirençli yapısı, biyogaz tesislerinde kullanımını kısıtlamaktadır (Wagner ve ark., 2018). Biyokütle kaynaklarından biri olan mezbaha atıkları yüksek düzeyde organik madde ve kirletici içerikleriyle çevre sorunlarına neden olabilmektedir. Anaerobik çürütme (AÇ), ekosistemi ve halk sağlığını olumsuz etkileyebilen bu gibi kirleticilerin etkilerini en aza indirmek için uygulanan biyolojik arıtma yöntemlerinden biridir (Mohammed ve ark., 2019).

Mezbaha atıklarından biri olan rumen atığı, tam olarak sindirilmemiş yüksek miktarda lignoselülozik biyokütle ve mikroorganizmalarca enerji kaynağı olarak kullanılabilir besin maddeleri içeren mezbaha atıklarından biridir. Rumende yaşayan çok sayıda mikroorganizma, biyokütleye kompostlaştırma yapılan organik tarım çiftlikleri için de çok değerlidir. Rumende bakteri, protozoa ve bir dizi mantar dahil olmak üzere birçok mikroorganizma bulunduğu organik kompostun olgunlaşma sürecini hızlandırmak için bir biyoaktivatör olarak kullanılmaktadır (Bernal ve ark., 2009; Suhardjadinata ve ark., 2018). Ek olarak besin açısından da zengin olmasına rağmen sığır ve keçi gibi ruminant kesimhanelerinin rumen içerikleri, genellikle çöpe atılmaktadır (Pancapalaga ve ark., 2021).

Hayvan gübresi içeriğinde bulunan lignoselülozik bileşikler, anaerobik çürütmede hidroliz aşamasını sınırlamaktadır (Barakat ve ark., 2012; Obiukwu ve Nwafor, 2016). Kosubstrat ilavesi, besin dengesini geliştirerek, tamponlama kapasitesini artırarak ve toksik bileşikler seyrelterek kararlı anaerobik fermentasyon elde etmeye yardımcı olur (Mata-Alvarez ve ark., 2014).

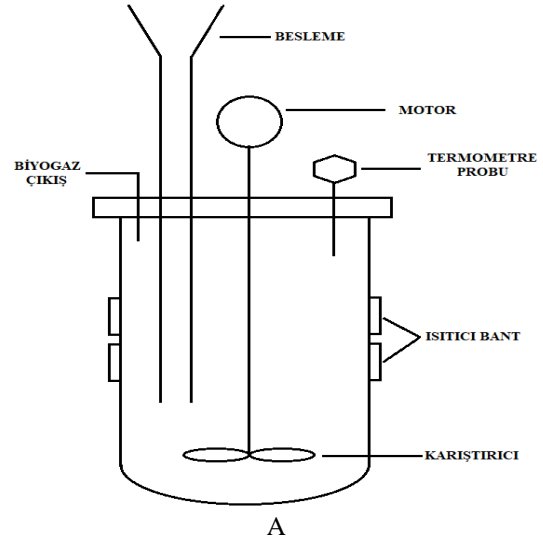
Zhang ve ark. (2013), inek gübresi ve gıda atıklarında kosubstrat stratejileri uygulayarak anaerobik fermentasyonda biyogaz üretim miktarını ve biyometan verimini artırabilmişlerdir. Literatürde lignoselüloz bozunmasını arttırmak için rumen atıklarının kosubstrat olarak kullanım stratejileri ile ilgili çalışmalar ilgi görmektedir (Xing ve ark., 2020). Rumen içeriğinin inokulum olarak kullanılması, rumen popülasyonlarının anaerobik sindirimi sırasında hidrolizi artırabileceğini göstermiştir (Deng ve ark., 2018).

Bu çalışma, rumen atığı ve sığır gübresinin laboratuvar ölçekli biyoreaktörlerde birlikte çürütülerek başlangıç prosesinin hızlandırılmasını, hidroliz aşamasının iyileştirilmesini, lignoselülozik materyalin maksimum düzeyde kullanılmasını ve biyogaz üretim miktarının artırılması amacıyla yapılmıştır. Ayrıca büyük ölçekte

işletilecek bir tarımsal biyogaz tesisinin başlatılması aşamasında inokulum ve kosubstrat olarak kullanılabilir optimum SG ve RA karışım oranları belirlenmiştir.

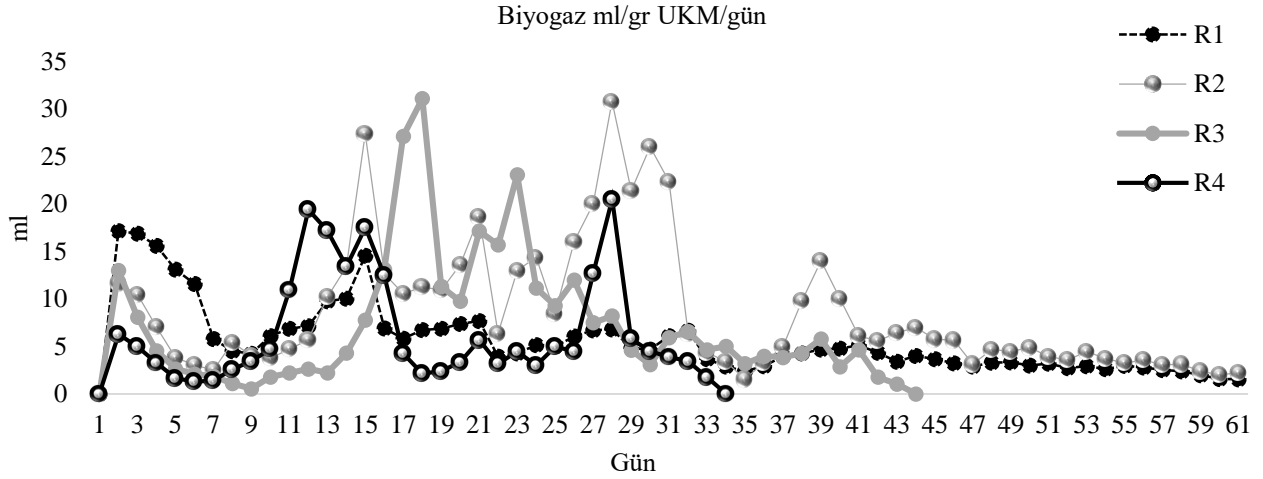
Materyal ve Yöntem

Çalışmada kullanılan sığır gübresi taze olarak Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi hayvan çiftliğinden, rumen atıkları ise Van ilinde yer alan özel bir kesimhaneden temin edilmiştir. Bu çalışmada VDI 4630 standardı referans alınarak teşkil edilen, ıslak hacmi 6 L olan, toplam 10 L hacimli kesikli biyoreaktörler işletilmiştir (Şekil 1.A). Biyoreaktörler anaerobik ortamda ve mezofilik koşullarda çalıştırılmıştır. Deney süresince tüm biyoreaktörler, Fonoll ve ark. (2021) tarafından bildirilen rumen sıcaklığı da göz önünde bulundurularak $39 \pm 1^\circ\text{C}$ ' de 60 gün boyunca işletilmiştir. Şekil 1.B'de gösterilen ve 80 devir/dk dönme hızındaki karıştırıcılar yardımıyla işletilen biyoreaktörler, 10 dk aralıklarla 10 dk boyunca karıştırılmıştır (Kariyama ve ark., 2018).

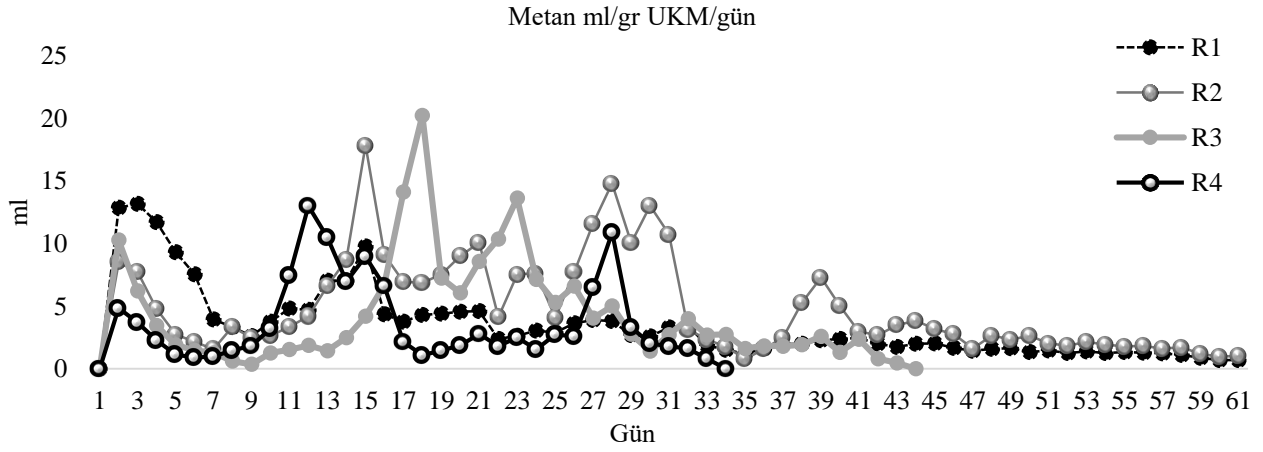


Şekil 1. (A) Biyometan potansiyelinin belirlenmesinde kullanılan biyoreaktörlerin şematik gösterimi, (B) BMP deney düzeneği.

Figure 1. (A) Schematic representation of bioreactors used to determine biomethane potential, (B) BMP experimental setup.



Şekil 2. R1, R2, R3, R4 biyoreaktörlerinde üretilen günlük spesifik biyogaz miktarları (ml/gr UKM/gün)
Figure 2. Daily specific biogas amount (ml/gr VS/day) produced in R1, R2, R3, R4 bioreactors



Şekil 3. R1, R2, R3, R4 biyoreaktörlerinde üretilen günlük spesifik metan konsantrasyonları (ml/gr UKM/gün)
Figure 3. Daily specific methane concentrations (ml/gr VS/day) produced in R1, R2, R3, R4 bioreactors

Çizelge 1. Biyokütellerin başlangıç kimyasal ve fiziksel özellikleri.

Table 1. Initial chemical and physical properties of the biomass

	pH	TKM (%)	UKM (%)	Karbon/Azot	Hemiselüloz	Selüloz	Lignin
R1	7,35	7,72	82,39	15,8	22,60	38,72	6,99
R2	6,70	9,44	85,48	17,5	26,70	32,09	6,91
R3	6,32	8,07	84,01	19,8	24,76	31,23	6,48
R4	5,48	9,86	85,41	24,2	25,13	31,37	5,21

Çizelge 2. Kümülatif biyogaz ve metan üretim değerleri ile spesifik biyogaz verim miktarları ve metan konsantrasyonları

Table 2. Cumulative biogas and methane production values, specific biogas yield amounts and methane concentrations

	Kümülatif Biyogaz (L)	Kümülatif Metan (L)	Spesifik Biyogaz (ml/gr UKM)	Spesifik Metan (ml/gr UKM)
R1	59,1	36,25	338,07	207,37
R2	95,03	54,01	516,60	293,57
R3	44,43	26,23	312,55	184,51
R4	31,14	17,9	211,19	121,40

Çizelge 3. Çıkış numunelerindeki hemiselüloz, selüloz ve lignin miktarları

Table 3. Amounts of hemicellulose, cellulose and lignin in the output samples

	Hemiselüloz	Selüloz	Lignin	T.UYA
R1	17,17	35,51	10,49	236,09
R2	17,38	27,74	9,6	56,14
R3	19,54	23,04	7,68	58,04
R4	16,90	23,49	7,12	104,23

Hazırlanan materyaller biyoreaktörlere beslenmeden önce, UKM içerikleri yaklaşık 25 g/L olacak şekilde distile su ile seyreltilip elle karıştırılmak suretiyle homojen hale getirilmiştir (Fonoll ve ark., 2021). Monosubstrat ve kosubstrat biyoreaktörleri sırasıyla aşağıdaki şekilde işletmeye alınmıştır.

- R1 → %100 Sığır Gübresi,
R2 → Sığır Gübresi + Rumen atığı (1:1 UKM),
R3 → Sığır Gübresi + Rumen atığı (1:2 UKM),
R4 → %100 Rumen atığı.

Toplam Katı Madde içeriği (TKM) ve UKM içeriği analizleri Standart Metotlar APHA-2540'a (2005) göre yapılmıştır. pH değerleri WTW pH 3110 SET 2 marka taşınabilir bir pH metre ile ölçülmüştür. Monosubstrat ve kosubstrat numunelerinin nötr deterjan fiber (NDF), asit deterjan fiber (ADF) ve asit deterjan lignin (ADL) içerik analizleri için Van Soest yöntemi kullanılmıştır (Van Soest ve ark., 1991). Lignoselülozik analizlerden önce numuneler 12 saat boyunca, 105 °C'de etüvde kurutulduktan sonra mekanik parçalayıcı ile 1 mm'den küçük olacak şekilde parçalanmıştır. NDF ve ADF analizleri, ANKOM220 Fiber Analiz cihazında (ANKOM Technology, Macedon, NY, Amerika) üretici protokollerine uygun olarak gerçekleştirilmiştir. ADL analizi ise ADF kalıntılarının kullanımı sonrası tartılması ile tespit edilmiştir. Bu amaçla ADF kalıntıları içeren keseler %72'lik H₂SO₄ içerisinde 30 dakikada bir çalkalanarak 3 saat süresince bekletilmiş, bu süre sonunda tartımı yapılarak ADL miktarı belirlenmiştir (Van Soest ve ark., 1991). ADF esas olarak hücre duvarlarındaki bileşenler olan selüloz, lignin ve çözünmeyen proteinlerden oluşmaktadır. Selüloz miktarı, ADF ile ADL arasındaki fark, hemiselüloz miktarı ise ADF ve NDF arasındaki fark olarak hesaplanmıştır. Lignin içeriği ise, Triolo ve ark. (2011) tarafından bildirildiği üzere lignine bağlı azot fraksiyonunun önemsiz olduğu varsayımıyla ADL değeri olarak hesaplanmıştır.

Karbon ve azot analizleri elemental analiz cihazı ile üretici prosedürüne göre yapılmıştır (Thermo scientific, flash 2000, Amerika). Uçucu Yağ Asidi (UYA) analizleri Standart Metotlar'a göre yüksek performanslı sıvı kromatografisi (HPLC Agilent, 1100, Almanya) ile ölçülmüştür (APHA, 2005).

Üretilen biyogaz, günlük olarak 10 L'lik gaz numune torbalarında (Tedlar bag, Dupont, Amerika) toplanmıştır. İçinde gaz biriktirilen torbalar her gün, biyoreaktörlerin ve torbaların üzerinde yer alan pnömatik vanalar kapatıldıktan sonra bağlı olduğu reaktörden ayrılıp, bir biyogaz sayacına (Ritter milligascounter, Dr. Ing. Ritter Apparatebau GmbH, Bochum, Almanya) bağlanarak biyogaz miktarları (ml/gün) ölçülmüştür. Biyogazın ölçülmesi esnasında bir biyogaz analizörü (BenchOne, BlueSens, Almanya) aracılığıyla metan konsantrasyonları (CH₄ içeriği) analiz edilmiştir. Okunan biyogaz miktarları VDI4630, (2006) standardına göre standart şartlara (273 K, 1,013 bar) dönüştürülerek normalize edilmiştir.

Bulgular ve Tartışma

Biyogaz ve Metan Üretim Değerleri

Çalışmada elde edilen kümülatif biyogaz ve metan miktarları ile spesifik biyogaz verimleri ve metan

konsantrasyonları Tablo 2'de, günlük üretilen spesifik biyogaz ve metan miktarları ise Şekil 2 ve Şekil 3'te belirtilmiştir.

Liu ve ark. (2021), pirinç samanı, saf selüloz ve saf hemiselülozun domuz gübresi inokulumu ile gerçekleştirdikleri anaerobik çürütmede biyogaz üretim potansiyellerini sırasıyla 283,75, 412,50 ve 620,64 ml/g UKM değerleriyle bildirmişlerdir. Chynoweth ve Owen (1993), rumen sıvısı inokulumu ile yaptıkları BMP çalışmalarında metan verim miktarlarını bitkisel yağ, ilk çökeltme çamuru, gıda atıkları, selüloz (kontrol), şeker kamışı, napier çimi ve kentsel katı atık için sırasıyla 940, 590, 540, 390 (kontrol), 290, 290 ve 220 ml/g UKM olarak bildirmişlerdir. Bu çalışmada Tablo 2'de gösterildiği üzere spesifik biyogaz verimleri R1, R2, R3 ve R4 biyoreaktörleri için sırasıyla 338,07, 516,60, 312,55 ve 211,19 ml/gr UKM, metan verimleri ise 207,37, 293,57, 184,51 ve 121,40 ml/gr UKM olarak tespit edilmiştir. Elde edilen verilere göre en yüksek biyogaz ve metan verimliliği R2, 1:1 sığır gübresi ve rumen atığı biyoreaktöründe gerçekleşmiştir. RA kosubstratının 1:1 oranında uygulanmasıyla monosubstrat SG biyoreaktörüne göre %60,79 biyogaz ve %49 biyometan üretim verim artışı sağlanmıştır.

Standart BMP prosedüründeki inokulum-substrat oranı uçucu katı bazında yaklaşık 1,0'dır. Selüloz, şeker kamışı, napier otu ve rumen sıvısı inokulumu ile yapılan çalışmalarda düşük inokulum-substrat değerlerinde yüksek uçucu organik asit değerleri elde edildiğinden standart BMP prosedürü modifiye edilerek bu oranın 2,0'a çıkarılması tavsiye edilmektedir (Chynoweth ve Owen, 1993). Bu çalışmada elde edilen en yüksek biyogaz verimi standart BMP prosedürüne uygun olarak 1:1 değerinde görülmüştür. Bu durumun nedeni SG ve RA substratlarında bulunan lignoselülozik içerik miktarının inhibisyon oluşturacak seviyelerde olmaması şeklinde açıklanabilir. Ayrıca yukarıda özetlenen çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada rumen içeriğinin tümü alınarak elde edilen rumen atığı değerlendirilerek sığır gübresinin anaerobik sindirilmesinde hem inokulum ve hem de kosubstrat etkileri incelenmiştir.

pH

Anaerobik çürütmenin başlatılmasında kabul edilebilir pH aralığının teorik olarak 5,5 ila 8,5 arasında olduğu bildirilmiştir (Buekens, 2005). Çalışmada, kullanılan monosubstrat ve kosubstrat pH değerleri 5,48 ila 7,35 aralığında ölçülmüş ve biyoreaktörler literatürde belirtilen sınır değerler içerisinde başlatılmıştır (Tablo 1).

Toplam Katı Madde ve Uçucu Katı Madde

TKM değeri, asitlerin metan üreten arkeler tarafından metana dönüştürülmesinde ihtiyaç duyulan su miktarının göstergesidir. UKM konsantrasyonu ise bir substratın biyogaz potansiyelini tahmin etmek ve bozunma derecesini belirlemek amacıyla kullanılabilir. Sığır gübresi ile yapılan çalışmalarda sistemin başlatılması için en uygun TKM değerinin %7-9 aralığında olduğunu belirtilmiştir (Zennaki-Bensouda ve ark., 1996). Bu çalışmada kullanılan substrat, inokulum ve substrat-inokulum karışımlarında TKM değerleri referans değerler göz önünde bulundurularak %8-10 aralığında tutulmuştur. Tablo 1 incelendiğinde sistemin başlatılması için

hazırlanan içeriklerin TKM oranları literatüre uygun olarak %7,72 ile 9,86 arasında gözlenmiştir.

Karbon/Azot

Bu çalışmada düşük karbon/azot oranına sahip sığır gübresi, karbon/azot oranı bakımından daha zengin olan rumen içeriği ile birlikte çürütülerek ideal karbon/azot oranı elde edilmeye çalışılmıştır. Tek aşamalı anaerobik çürütmede uygun fermentasyon ortamı sağlamak amacı ile karbon/azot oranının 15 ile 25 arasında olması gerektiğini bildirilmiştir (Dobre ve ark., 2014). Bu çalışmada başlangıç karbon/azot oranları Tablo 1'de belirtildiği gibi 15,8 ile 24,2 arasında tespit edilmiştir.

Uçucu Yağ Asitleri

Literatürde anaerobik bir fermentasyonun sağlıklı bir şekilde ilerlemesi için uçucu yağ asitleri konsantrasyonunun 2,000 mg/L'nin altında olması gerektiği bildirilmiştir (Sreekrishnan ve ark., 2004). Bu çalışmada çıkış numuneleri incelendiğinde UYA miktarları 2000 mg/L altında tespit edilmiş ve birikimin söz konusu olmayarak herhangi bir inhibisyon etkisinin olmadığı gözlenmiştir (Tablo 3).

Hemiselüloz, Selüloz ve Lignin

Çalışmada, lignoselülozik malzemelerin giderimini incelemek amacıyla ADF-NDF-ADL analizleri yapmak suretiyle başlangıç ve çıkış numunelerindeki hemiselüloz, selüloz ve lignin miktarları tespit edilmiştir. Başlangıç numunelerindeki hemiselüloz, selüloz ve lignin miktarları Tablo 1'de, çıkış numunelerine ait hemiselüloz, selüloz ve lignin miktarları ise Tablo 3'te belirtilmiştir.

Elde edilen verilere göre hemiselüloz giderimi R1, R2, R3 ve R4 biyoreaktörleri için sırasıyla %24,03, 34,91, 21,08 ve 32,75 olarak, selüloz giderimi ise %8,29, 13,56, 26,22 ve 25,12 olarak hesaplanmıştır.

Sonuçlar

Bu çalışmada SG monosubstratında literatür verileriyle benzer miktarda spesifik biyogaz üretim değeri (338 ml/g UKM) elde edilmiştir. SG ve RA kosubstrat denemelerinde ise standart BMP prosedürüne uygun olarak uygulanan inokulum/substrat değerinin 1:1 olduğu durumda en yüksek biyogaz verimi (516,60 ml/g UKM) elde edilmiştir. SG monosubstratında, RA monosubstratına kıyasla daha yüksek kümülatif biyogaz üretilmiştir. RA kosubstratının 1:1 oranında uygulanmasıyla monosubstrat SG biyoreaktörüne göre %60,79 biyogaz ve %49 metan üretim verim artışı sağlanmıştır. Bu çalışma sonunda elde edilen lignoselülozik içerik (hemiselüloz, selüloz ve lignin) analizlerine göre, biyogaz ve metan verimine benzer şekilde, SG ve RA'nın 1:1 oranında birlikte sindirilmesi ile en yüksek verim elde edilmiştir.

Kaynaklar

APHA, 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater: American Public Health Association, Washington, USA. ISBN 0-87553-047-8.

Appels L, Lauwers J, Degrève J, Helsen L, Lievens B, Willems K, Dewil R. 2011. Anaerobic digestion in global bio-energy production: potential and research challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9): 4295-4301. doi: 10.1016/j.rser.2011.07.121

Barakat A, Monlau F, Steyer JP, Carrere H. 2012. Effect of lignin-derived and furan compounds found in lignocellulosic

hydrolysates on biomethane production. *Bioresource technology*, 104: 90-99. doi: 10.1016/j.biortech.2011.10.060

Bernal MP, Alburquerque JA, Moral R. 2009. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource technology*, 100(22): 5444-5453. doi: 10.1016/j.biortech.2008.11.027

Buekens A. 2005. Energy recovery from residual waste by means of anaerobic digestion technologies. The future of residual waste management in Europe, 17-18.

Chynoweth DP, Turick CE, Owens JM, Jerger D E, Peck MW. 1993. Biochemical methane potential of biomass and waste feedstocks. *Biomass and bioenergy*, 5(1): 95-111. doi: 10.1016/0961-9534(93)90010-2

Deng Y, Huang Z, Ruan W, Miao H, Shi W, Zhao M. 2018. Enriching ruminal polysaccharide-degrading consortia via co-inoculation with methanogenic sludge and microbial mechanisms of acidification across lignocellulose loading gradients. *Applied microbiology and biotechnology*, 102(8): 3819-3830. doi: 10.1007/s00253-018-8877-9

Dobre P, Nicolae F, Matei F. 2014. Main factors affecting biogas production-an overview. *Romanian Biotechnological Letters*, 19(3): 9283-9296.

Fonoll X, Shrestha S, Khanal SK, Dosta J, Mata-Alvarez J, Raskin L, 2021. Understanding the Anaerobic Digestibility of Lignocellulosic Substrates Using Rumen Content as a Cosubstrate and an Inoculum. *ACS ES&T Engineering*, 1(3): 424-435. doi: 10.1021/acsestengg.0c00164

Kariyama ID, Zhai X, Wu B. 2018. Influence of mixing on anaerobic digestion efficiency in stirred tank digesters: a review. *Water research*, 143: 503-517. doi: 10.1016/j.watres.2018.06.065

Liu J, Zuo X, Peng K, He R, Yang L, Liu R. 2021. Biogas and volatile fatty acid production during anaerobic digestion of straw, cellulose, and hemicellulose with analysis of microbial communities and functions. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 194: 762-782. doi: 10.1007/s12010-021-03675-w

Ma H, Guo Y, Qin Y, Li YY. 2018. Nutrient recovery technologies integrated with energy recovery by waste biomass anaerobic digestion. *Bioresource technology*, 269: 520-531. doi: 10.1016/j.biortech.2018.08.114

Mata-Alvarez J, Dosta J, Romero-Güiza MS, Fonoll X, Peces M, Astals S. 2014. A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. *Renewable and sustainable energy reviews*, 36: 412-427. doi: 10.1016/j.rser.2014.04.039

Mirmohamadsadeghi S, Karimi K, Azarbaijani R, Yeganeh LP, Angelidaki I, Nizami AS, Tabatabaei M. 2021. Pretreatment of lignocelluloses for enhanced biogas production: A review on influencing mechanisms and the importance of microbial diversity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135: 110173. doi: 10.1016/j.rser.2020.110173

Mohammed MK, Gasmelseed GA, Abuuznien MH. 2019. Production of biogas from cattle paunch manure. *European Journal of Engineering and Technology Research*, 4(4): 1-3. doi: 10.24018/ejeng.2019.4.4.1140

Obiukwu OO, Nwafor MO. 2016. Comparative evaluation of batch and continuous process biogas production from animal wastes. *International Journal of Ambient Energy*, 37(1): 29-35. doi: 10.1080/01430750.2013.874369

Pancapalaga W, Suyatno S, Sedlacek D. 2021. The Use of Rumen Contents as Bio-Activators for Fermentation in Goat Manure Fertilizer Production. In *E3S Web of Conferences Vol. 226*, p. 00048. EDP Sciences.

Sreekrishnan TR, Kohli S, Rana V. 2004. Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques—a review. *Bioresource technology*, 95(1): 1-10. doi: 10.1016/j.biortech.2004.02.010

Suhardjadinata S, Pangesti D, Tedjaningsih T. 2018. Aplikasi pupuk organik limbah rumah potong hewan untuk

- meningkatkan kesuburan tanah dan produktivitas padi. *Jurnal Agro*, 5(1): 39-47. doi: 10.15575/1675
- Triolo JM, Sommer SG, Møller HB, Weisbjerg MR, Jiang XY. 2011. A new algorithm to characterize biodegradability of biomass during anaerobic digestion: influence of lignin concentration on methane production potential. *Bioresource technology*, 102(20): 9395-9402. doi: 10.1016/j.biortech.2011.07.026
- Van Soest PV, Robertson JB, Lewis BA. 1991. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of dairy science*, 74(10): 3583-3597. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2
- VDI 4630, 2006. Fermentation of organic materials: characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests. In: Verein Deutscher Ingenieure (Ed.): VDI-Handbuch Energietechnik, Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin, Germany.
- Wagner AO, Lackner N, Mutschlechner M, Prem EM, Markt R, Illmer P. 2018. Biological pretreatment strategies for second-generation lignocellulosic resources to enhance biogas production. *Energies*, 11(7): 1797. doi: 10.3390/en11071797
- Xing BS, Han Y, Cao S, Wen J, Zhang K, Yuan H, Wang XC. 2020. Cosubstrate strategy for enhancing lignocellulose degradation during rumen fermentation in vitro: Characteristics and microorganism composition. *Chemosphere*, 250: 126104. doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126104
- Zennaki-Bensouda Z, Zaid A, Lamini H, Aubineau M, Boulif M. 1996. Methane fermentation of cattle manure: effects of hydraulic retention time, temperature and substrate concentration. *Tropicultura*, 14: 134-140.
- Zhang C, Xiao G, Peng L, Su H, Tan T. 2013. The anaerobic co-digestion of food waste and cattle manure. *Bioresource technology*, 129: 170-176. doi: 10.1016/j.biortech.2012.10.138