



# Elektrik Ark Ocağı Cürufunun Biyogaz Üretiminde Katkı Maddesi Olarak Kullanılması ve Etkileri

Rahman Çalhan<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup> Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Karabük, Türkiye, (ORCID: 0000-0002-3894-8468), [rahmancalhan@karabuk.edu.tr](mailto:rahmancalhan@karabuk.edu.tr)

(İlk Geliş Tarihi 19 Aralık 2021 ve Kabul Tarihi 09 Ağustos 2022)

(DOI: 10.31590/ejosat.1038595)

**ATIF/REFERENCE:** Çalhan, R. (2022). Elektrik Ark Ocağı Cürufunun Biyogaz Üretiminde Katkı Maddesi Olarak Kullanılması ve Etkileri. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (38), 335-340.

## Öz

Anaerobik parçalanma prosesi organik atıkların mikroorganizmalar tarafından CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>S gibi gazlara dönüştürüldüğü biyolojik bir süreçtir. Anaerobik sistemde katkı maddeleri kullanılması, mikrobiyal toplulukların anaerobik ortamlarını iyileştirmek, mikroorganizmaların aktivitesini artırmak ve daha fazla biyogaz üretimi sağlamak için yaygın olarak kullanılan bir yaklaşımdır. Bu çalışmada elektrik ark ocağı cürufunun (EAOC) anaerobik sistemde katkı maddesi olarak kullanılmasının biyogaz ve metan üretimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. EAOC hurda demirden, demir çelik üretimi gerçekleştirilen bir firmadan temin edilmiş ve anaerobik sisteme belirli oranlarda (%1-5) eklenmiştir. Deneyler mezofilik şartlarda (36±1 °C), 30 günlük hidrolik bekleme sürelerinde (HBS) gerçekleştirilmiştir. 30 günlük bekleme süresi sonunda en yüksek kümülatif biyogaz üretimi 6021,90 mL ile %5 EAOC eklenen R9'da elde edilmiş ve en yüksek biyogaz verimi 219,8 mL.gVS<sup>-1</sup> ile %4 EAOC eklenen R7'de elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Anaerobik Parçalanma, Biyogaz, Elektrik Ark Ocağı, Cüruf, Katkı Maddesi

## Use of Electric Arc Furnace Slag as an Additive in Biogas Production and Its Effects

### Abstract

Anaerobic digestion (AD) is a biological process in which organic wastes are converted into gases such as CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, and H<sub>2</sub>S by microorganisms. In AD, using additives is a widespread approach to improve the anaerobic environment of microbial communities, increase microorganisms' activity, and provide more biogas production. This study investigates the effects of adding the electric arc furnace slag (EAFS) as an additive to the AD system on biogas and methane production. EAFS was obtained from a company that produces iron and steel from scrap iron and added to the AD system at specific concentrations (1-5%). Experiments were carried out in mesophilic conditions (36±1 °C) during a 30-day hydraulic retention time (HRT). As a result of batch experiments, at the end of the 30-day HRT, the highest cumulative biogas production was obtained in R9 with 6021.90 mL and 5% EAFS added, and the highest biogas efficiency was obtained in R7 with 219.8 mL.gVS<sup>-1</sup> and 4% EAFS added. Furthermore, it was determined that the addition of EAFS to the AD system increased methane yield.

**Keywords:** Anaerobic Digestion, Biogas, Electric Arc Furnace, Slag, Additive

\* Sorumlu Yazar: [rahmancalhan@karabuk.edu.tr](mailto:rahmancalhan@karabuk.edu.tr)

## Kısaltmalar

AD	Anaerobic digestion
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alüminyum oksit
BG	Büyük baş hayvan gübresi
C	Karbon
CaO	Kalsiyum oksit
CH <sub>4</sub>	Metan
CO <sub>2</sub>	Karbondioksit
EAFS	Electric arc furnace slag
EAO	Elektrik ark ocağı
EAO C	Elektrik ark ocağı cürufu
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Demir (III) oksit
H <sub>2</sub> S	Hidrojen sülfür
HBS	Hidrolik bekleme süresi

## 1. Giriş

Enerji, günümüzde ülkelerin dış politikalarına yön vermekte kullandıkları en önemli araçlardan bir tanesidir (Ceylan 2021). Fosil enerji kaynaklarının giderek daha fazla kullanılması ve petrol fiyatlarının sürekli olarak dalgalanması ülkeler için enerji güvenliği ve enerjide dışa bağımlılık problemlerini ortaya çıkarırken hava kirliliği iklim değişikliği gibi çevresel sorunları da beraberinde getirmektedir (Bilhan & Emikönel, 2021; Jung, Kim, & Lee, 2016). Son yıllarda küresel ısınma ve sera gazı emisyonlarının azaltılması en önemli çevresel problemler olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle hem ulusal hem de uluslararası ölçekte acil önlemler alınması gerekmektedir. Fosil enerji kaynaklarının tükenebilir olması ve önemli çevresel problemlerin asıl sorumlusu olması nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi giderek artmaktadır (Abdeshahian, Lim, Ho, Hashim, & Lee, 2016; Noorollahi, Kheirrouz, Farabi-Asl, Yousefi, & Hajinezhad, 2015). Çevreye duyarlı, ekonomik, yerel ve çeşitli kaynaklardan enerji üretimine imkân sağlayan yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı oldukça önemlidir. Yenilenebilir enerji kaynakları üzerine yapılan çalışmalar ve sürekli olarak gelişen teknoloji, içerisinde atıkların da bulunduğu birçok maddenin, enerji üretiminde kullanılabilmesine olanak tanımaktadır (Nandi, Saha, Huda, & Alam, 2017).

CH<sub>4</sub>, küresel ısınmaya neden olan sera gazları arasında en zararlı olan gazlardan bir tanesidir. CH<sub>4</sub>, doğal ortamlarda (sulak alanlar, bataklıklar, vahşi hayvanlar vb.) kendiliğinden ortaya çıkabildiği gibi antropojenik faaliyetler (hayvan çiftlikleri, çöp depolama sahaları, kömür işletmeleri vb.) sonucunda da ortaya çıkabilmektedir (Arif, Liaquat, & Adil, 2018). Yapılan çalışmalarda dünya üzerindeki CH<sub>4</sub>'ün yaklaşık olarak %50'si antropojenik faaliyetler sonucunda ortaya çıkmaktadır (Nevzorova & Kutcherov, 2019). Antropojenik faaliyetler sonucunda ortaya çıkan CH<sub>4</sub>, kontrollü koşullar altında üretilerek biyogaza dönüştürülebilmekte ve yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak kullanılabilir. Bu nedenle farklı tür biyokütellerin özellikle atıkların biyogaz üretiminde kullanılması giderek popüler hale gelmektedir (Nandi et al., 2017).

Anaerobik parçalanma, organik maddelerin oksijensiz ortamda anaerobik mikroorganizmalar tarafından biyolojik olarak parçalanarak CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub> gibi son ürünlere dönüştürüldüğü prostestir (Abudi et al., 2016; Divya, Gopinath, & Merlin Christy, 2015; Mata-Alvarez et al., 2014). Anaerobik parçalanma prosesi sonucunda ortaya çıkan gaz karışımı biyogaz olarak adlandırılmakta ve çöpler, gübreler ve tarımsal atıklar gibi organik içeriği yüksek maddelerden üretilen için

yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak kullanılabilir (Zenk, 2019). Anaerobik parçalanma atık miktarının azaltılması, toprak ve yeraltı suyu kirliliğinin önlenmesi, koku kirliliğinin önlenmesi ve sera gazı emisyonunun azaltılması gibi birçok çevresel fayda sağlar. Ayrıca oksijenlenmiş enerji üretimi ile kaynak kullanımının azaltılması da katkıda bulunmaktadır (Aboudi, Alvaro-Gallego, Laguerre-Garcia 2016; Esposito et al. 2012). Bunun yanı sıra, bu süreçte ortaya çıkan yüksek kalitede gübre, fosfor, potasyum ve kimyasal gübre kullanımını azaltmaktadır (Divya et al., 2015; Lisboa & Sidiq, 2013). Biyogaz üretiminin ekonomik ve sürdürülebilir toplumsal yapıya dönüştürülebilmesi için işletme modellerinin geliştirilmesi ve kullanılan hammadde başına üretilen biyogaz miktarının artırılması gerekmektedir (Kaparaju, Ellegård, & Angelidaki 2009). Bu amaçla biyogaz üretiminde çok farklı yöntemler kullanılmaktadır. Son zamanlarda yapılan çalışmalarda anaerobik parçalanma prosesine çeşitli katkı maddeleri eklenerek biyogaz üretim veriminin artırılması giderek popüler hale gelmektedir. Anaerobik parçalanma prosesine eklenen katkı maddeleri arasında nanopartiküller (Kaskun, Çalhan, & Akinay, 2021; Suanon et al., 2017), aktif karbonlar (Lee, Lee, & Park, 2016), demir bazlı katkı maddeleri (Kato, Hashimoto, & Watanabe, 2012), enzimler (Tashiro et al., 2013), pH düzenleyiciler (Zhang, Zhang, Zhang, Shi, & Cai, 2005), iz mineraller ve besin maddeleri (Nges & Björnsson, 2012) gibi farklı türden maddeler bulunmaktadır. Kullanılan katkı maddelerinden bazıları mikroorganizmaların anaerobik yaşam şartlarının iyileşmesini sağlarken bazı katkı maddeleri ise mikroorganizmalar arası etkileşimlerin iyileşmesini ve biyogaz veriminin artmasını sağlamaktadır.

Demir-çelik üretiminde, cevherden demir üretiminin gerçekleştirildiği bazik oksijen fırını (BOF) ve hurda malzemelerden demir üretiminin gerçekleştirildiği elektrik ark ocağı (EAO) prosesleri kullanılmaktadır. Türkiye'de demir çelik üretiminde %69 oranında EAO prosesi kullanılmaktadır (World Steel Association, 2019). Demir-çelik üretim prosesinde oldukça fazla miktarda enerji ve hammadde kullanılırken üretim sonrasında cürufun da içinde bulunduğu fazla miktarda atık ortaya çıkmaktadır. Çelik cürufu, ergitme ve oksitleme proseslerinde, demir oksitlerin ve diğer safsızlıkların giderilmesi sonrasında ortaya çıkar ve proses sonunda çelikten ayrılarak uzaklaştırılır (Santamaria et al., 2018). EAO prosesi sonucunda da oldukça fazla miktarda cüruf, atık olarak ortaya çıkmakta ve bertaraf edilmesi gerekmektedir. Bertaraf edilmeyen cüruflar, cüruf depolama sahalarında biriktirilerek cüruf dağlarının oluşmasına neden olmaktadır. Ortaya çıkan cürufun yeniden kullanım imkanlarının araştırılması ve farklı şekillerde değerlendirilerek çevreye verilen zararın en aza indirilmesi ve sürdürülebilir üretime katkı sağlanması oldukça önemlidir (Monosi, Ruello, & Sani 2016).

Cüruf içerisinde barındırdığı farklı bileşikler ile biyogaz üretimine katkı sağlayabilecek bir potansiyele sahiptir. Ayrıca oldukça yüksek gözenekliliğe ve geniş bir yüzey alanına sahip olan cüruf, mikroorganizmalar için gerekli olan tutunma yüzeyini de sağlayabilmektedir. Ancak literatürde, cürufun biyogaz üretiminde kullanılması üzeri yapılan çalışma sayısı oldukça sınırlıdır. Bu nedenle gerçekleştirilen çalışmada EAO prosesi sonucunda ortaya çıkan cüruflar, anaerobik parçalanma prosesinde katkı maddesi olarak kullanılmış ve 30 günlük bekleme süresinde, biyogaz üretimi ve metan verimi üzerine etkileri araştırılmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Materyal

Gerçekleştirilen çalışmada bütün deneyler, 1000 mL toplam hacime sahip cam reaktörlerde, 600 mL'lik çalışma hacimlerinde, üç tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. Bütün reaktörlerde sızdırmazlığı sağlayabilmek için pnömatik bağlantı ekipmanları kullanılmıştır. Anaerobik parçalanma prosesinin gerçekleşebilmesi için gerekli olan reaktör sıcaklıklarını sağlayabilmek için termostat ayarlı su banyosu kullanılmış ve bütün deneyler mezofilik şartlarda (36±1 °C) gerçekleştirilmiştir. Günlük üretilen biyogaz miktarları su yer değiştirme prensibine göre ölçülmüştür. Üretilen biyogazın bileşimi ise portatif biyogaz analizörü kullanılarak belirlenmiştir. Bütün deneysel çalışmalarda büyükbaş hayvan gübresi (BG) ana substrat olarak, EAOC ise katkı maddesi olarak kullanılmıştır. BG yerel olarak faaliyet gösteren bir kesimhane tesisinden taze olarak temin edilmiş ve kullanılmıştır. Kullanılan BG'nin karakterizasyonu Tablo 1'de verilmiştir. EAOC ise EAOC prosesi ile demir-çelik üretimi gerçekleştiren yerel bir işletmeden temin edilmiş ve kullanılmadan önce 2-5 mm partikül boyutuna küçültülerek 103-105 °C'de 24 saat boyunca kurutulmuştur. Deneylerde, Karabük Üniversitesi, Çevre Mühendisliği laboratuvarında bulunan 40 litre hacimli, anaerobik reaktörden alınan aşı kullanılmıştır.

Tablo 1. Kullanılan büyükbaş hayvan gübresinin karakterizasyonu (Table 1. Characterization of used cattle manure)

	BG
C (%)	41,62
N (%)	5,92
Toplam katı madde, TKM (%)	27,65
Uçucu katı madde, UKM (%)	90,13
Uçucu yağ asidi, UYA (mg.L <sup>-1</sup> )	49 200
Toplam azot, TN (mg.L <sup>-1</sup> )	11 600
Kimyasal oksijen ihtiyacı, KOİ (mg.L <sup>-1</sup> )	51 270

Tablo 2'de deneylerde kullanılan karışım oranları verilmiştir. Bütün reaktörlere 140 BG ve 100 mL aşı eklenmiş ve daha sonra %1-5 oranlarında EAOC eklenmiştir. Reaktörlere eklenecek olan EAOC miktarları ön denemeler sonucunda belirlenmiştir. Son olarak çeşme suyu kullanılarak bütün reaktörlerdeki katı madde oranı %7 olacak şekilde ayarlanmıştır. Sonuçları karşılaştırabilmek amacıyla bir deney seti sadece 140 g BG ve 100 mL aşı ile beslenmiş ve çeşme suyu ile katı madde oranı %7 olarak ayarlanmıştır. Bütün reaktörler mezofilik şartlarda, 30 günlük HBS ile işletilmiştir.

Tablo 2. Deneylerde kullanılan reaktörlerin bileşimleri (Table 2. The compositions of the reactors used in the experiments)

Reaktör	BG (g)	EAOC (%)
R1	140	1
R2	140	1,5
R3	140	2
R4	140	2,5
R5	140	3
R6	140	3,5
R7	140	4
R8	140	4,5
R9	140	5
Kontrol	140	0

## 3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

### 3.1. EAOC Karakterizasyonu

EAOC'nin kimyasal bileşimi, üretimde kullanılan hurdaların kalitesine, bileşimine ve hurdaların ergitildiği EAOC'nin işletme şartlarına göre değişmektedir (Nikolić et al., 2016). EAOC bileşiminde genellikle ağırlıklı olarak Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bulunurken bunların yanında az miktarda MnO, MgO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ve K<sub>2</sub>O bulunabilmektedir. Bu çalışmada kullanılan EAOC'nin kimyasal bileşimi Tablo 3'te verilmiştir. EAOC içerisinde %34,79 ile en fazla bulunan bileşik CaO olurken bunu sırasıyla %22,11, %17,47 ve %9,71 ile Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takip etmiştir.

Cürufun bazisite indeksi denklem (1)'de gösterilen formülasyon ile hesaplanmıştır. Cürufun bazisite indeksi, cüruf içerisindeki bazik oksitlerin, sıvı içerisindeki sızma mekanizmalarını ne sızıntı suyunun pH'ını doğrudan etkileyen en önemli parametredir. Yüksek bazisite indeksi, pH'ın yükselmesine ve sızıntı suyunda yüksek alkaliniteye neden olmaktadır (Bankole, Rezan, & Sharif, 2014). Deneylerde kullanılan EAOC'nin, denklem (1)'e göre hesaplanan bazisite indeksi, 1,63 olarak hesaplanmış olup (>1,2) bazik olarak değerlendirilmektedir.

$$Mb = \frac{(CaO+MgO)}{(SiO_2+Al_2O_3)} \quad (1)$$

Tablo 3. EAOC'nin kimyasal bileşimi (Table 3. Chemical composition of EAOC)

Bileşen	Kompozisyon (%)
SiO <sub>2</sub>	14,74
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,71
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,11
MnO	4,97
CaO	34,79
MgO	5,07
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,80
S	0,29
K <sub>2</sub> O	0,04
Diğer	7,44

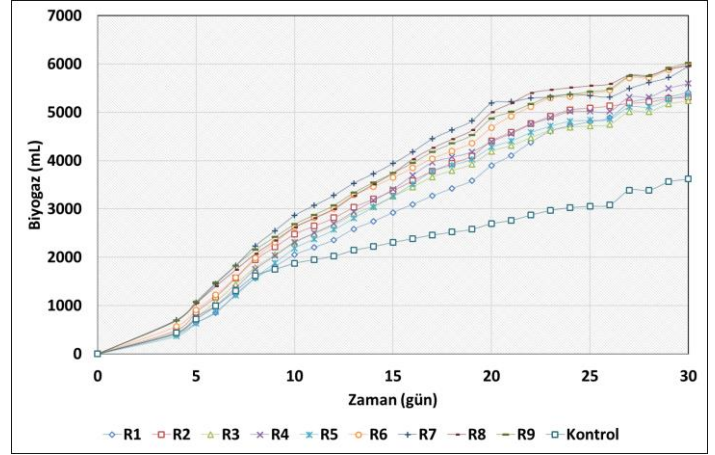
### 3.2. Hidroliz Aşaması ve Günlük Biyogaz Üretimi

Şekil 1'de reaktörlerde elde edilen günlük biyogaz üretim sonuçları gösterilmektedir. Şekil 1'de görüldüğü gibi 30 günlük HBS boyunca biyogaz üretiminde bazı pik değerler elde edilmiş olup bu piklerden ilki 4. günde gerçekleşmiş ve 1 numaralı çizgi ile gösterilmiştir. Biyogaz üretiminin ilk basamağı yüksek yapılı bileşiklerin daha küçük yapılı monomerlerine parçalandığı hidroliz aşamasıdır ve biyolojik olarak kolay parçalanabilen organik maddeler bu aşamada hızlı bir şekilde parçalanmaktadır. Kontrol reaktörü ile karşılaştırıldığında, EAOC eklenen bütün reaktörlerde hidroliz aşamasında daha fazla biyogaz üretimi gerçekleştirildiği görülmektedir. Düşük oranlarda EAOC eklenen reaktörlerde (%1-3) hidroliz basamağında daha düşük



biyogaz üretimi elde edilirken daha yüksek oranlarda (%3,5-5) EAOC eklenen reaktörlerde daha yüksek biyogaz üretimi elde edilmiştir. En yüksek biyogaz üretimi 632,2 mL ile R8'de gerçekleşirken bunu sırasıyla R7, R9 ve R6 585,1 mL, 561,5 mL ve 471,2 mL ile takip etmiştir. Hidroliz aşamasında kontrol reaktöründe biyogaz üretimi ise 412,3 mL olarak gerçekleşmiştir. Hidroliz basamağında henüz metan üretimi tam olarak gerçekleşmediği için üretilen biyogaz içerisindeki metan oranları oldukça düşük tespit edilmiştir. 16. günde ise 30 günlük HBS boyunca elde edilen en yüksek pik değeri elde edilmiştir. Bu durum reaktör içerisindeki tüm mikroorganizma grupları için uygun ortam şartlarının 9-16. günler arasında sağlandığını göstermektedir. 16. günde en yüksek günlük biyogaz üretimi %4,5 oranında EAOC eklenen R8'de 742,2 mL ile elde edilirken bunu 706,8 mL ile R7 ve 644 mL ile R6 izlemiştir. En yüksek EAOC oranına sahip olan R9'da ise 632,2 mL biyogaz üretimi gözlenmiştir. Daha düşük oranlarda EAOC eklenen R1, R2, R3, R4 ve R5'te ise günlük biyogaz üretimi daha az gerçekleşirken, EAOC eklenen tüm reaktörlerde kontrol reaktörüne göre daha fazla biyogaz üretimi gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu durum EAOC eklenmesinin biyogaz üretimine katkı sağladığını göstermektedir. %4,5'e kadar yüksek konsantrasyonda EAOC eklenen reaktörlerdeki günlük biyogaz üretiminin daha fazla olması, cüruf içerisindeki bileşenlerin daha hızlı bir şekilde sıvı ortamına geçerek mikroorganizmalar tarafından kullanılabilirliğini göstermektedir. 21. günde 30 günlük HBS'deki son pik değeri elde edilmiş olup en yüksek günlük biyogaz üretimi R1'de 592,9 mL ile gerçekleşmiştir. Bunu 384,8 mL ile R2 ve 298,4 mL ile R4 takip etmiştir. Bu durum daha düşük konsantrasyonlarda eklenen EAOC'nin sıvı ortamına geçişi için daha fazla süre gerektiğini göstermektedir.

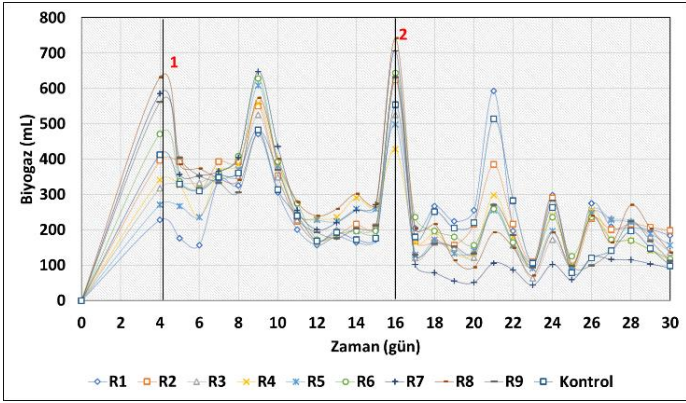
göre artan EAOC oranlarında kümülatif biyogaz üretim miktarının arttığı ve EAOC eklenen reaktörlerde, kontrol reaktörüne göre %30,8-%39,8 oranlarında artış elde edildiği tespit edilmiştir.



Şekil 2. Kümülatif biyogaz üretim miktarları (Figure 2. Cumulative biogas productions)

Şekil 3 reaktörlerin kümülatif biyogaz üretimleri ile biyogaz verimlerini karşılaştırmaktadır. Şekil 3 incelendiğinde artan EAOC oranlarında biyogaz veriminin arttığı ancak %3,5'ten daha fazla EAOC eklenmesinin hem kümülatif biyogaz üretimini hem de biyogaz verimini çok fazla değiştirmedeği görülmektedir. En yüksek biyogaz verimine 219,8 mL.gVS<sup>-1</sup> ile R9'da ulaşılmıştır. Bunu 218,36 mL.gVS<sup>-1</sup> ile R6, 217,79 mL.gVS<sup>-1</sup> ile R8 ve 217,24 mL.gVS<sup>-1</sup> ile R7 izlerken kontrol reaktörünün biyogaz verimi 132,22 mL.gVS<sup>-1</sup> olarak elde edilmiştir.

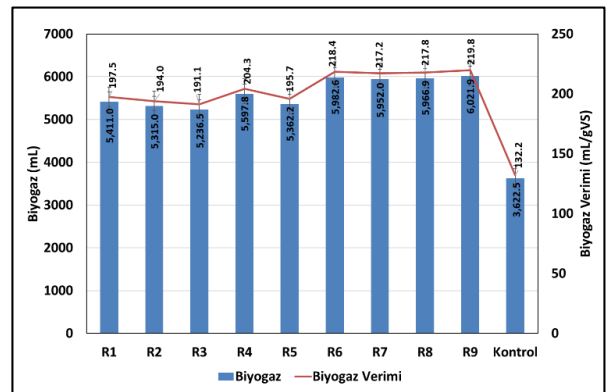
Demir oksitlerin anaerobik sistemde mikroorganizmalar ve uzak elektron alıcıları arasında elektriksiz olarak iletken bir ağ yapısı oluşturduğu ve elektron transferini hızlandırdığı tespit edilmiştir (Chen, Steele, & Stuckey, 2018). Anaerobik sisteme dışarıdan eklenen demir oksitlerin mikroorganizmalar arasındaki elektron transferini iyileştirmekte ve biyogaz üretimine katkıda bulunmaktadır (Xu et al., 2019). Gadhe ve ark. anaerobik sisteme Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (hematit) eklenmesinin anaerobik ortam şartlarının iyileştirilmesine yardımcı olarak elektron transfer hızının artmasına katkıda bulunduğunu bildirmişlerdir (Gadhe, Sonawane, & Varma, 2015). Tablo 3'ten de görülebileceği gibi EAOC bileşiminde %22,11 oranında Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bulunmaktadır. EAOC içerisindeki Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'ün biyogaz üretimine katkı sağladığı düşünülmektedir.



Şekil 1. Günlük biyogaz üretim miktarları (Figure 1. Daily biogas productions)

### 3.3. Kümülatif Biyogaz Üretimi ve Biyogaz Verimi Üzerine Etkileri

Reaktörlerin 30 günlük HBS sonucundaki kümülatif biyogaz üretim miktarları Şekil 2'de gösterilmektedir. Şekil 2'den de görülebileceği gibi EAOC eklenen tüm reaktörlerde kümülatif biyogaz üretimi, kontrol reaktörüne göre daha yüksek gerçekleşmiştir. 30 günlük HBS sonucunda %3,5-5 oranlarında EAOC eklenen reaktörlerde kümülatif biyogaz üretimleri birbirlerine oldukça yakın gerçekleşmiştir. En yüksek kümülatif biyogaz üretimi %5 oranında EAOC eklenen R9'da 6021,9 mL ile elde edilmiş olup bunu 5982,6 mL ile R6, 5966,9 mL ile R8 ve 5952 mL ile R7 takip etmiştir (Tablo 3). %1-3 oranlarında EAOC eklenen reaktörlerin kümülatif biyogaz üretimleri de yine birbirlerine oldukça yakın gerçekleşmiştir. Elde edilen sonuçlara



Şekil 3. Biyogaz verimi ile kümülatif biyogaz üretiminin karşılaştırılması (Figure 3. Comparison of biogas yield with cumulative biogas production)

### 3.4. Metan Verimi Üzerine Etkisi

Üretilen biyogazın içeriği günlük olarak ölçülmüş ve Tablo 4'te reaktörlerin ortalama metan içerikleri ve metan verimleri verilmiştir. Kontrol reaktörü de dahil olmak üzere bütün reaktörlerin metan içerikleri incelendiğinde üretilen biyogazın metan içeriğinin %60-62,8 arasında değiştiği görülmektedir. En yüksek metan içeriği %62,8 ile R7'de elde edilirken en düşük metan içeriği %60 ile R8'de elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar EAOC eklenmesinin metan üretimi üzerinde çok fazla etkili olmadığını göstermektedir. CaO su içerisinde çözünerek anaerobik sistemin tamponlama kapasitesini arttırabilmektedir (Canan, Calhan, & Ozkaymak, 2021). Han ve ark. yüksek CaO ve MgO içeriğine sahip olan cürufun anaerobik sistemde kullanılmasının ortam alkalinitesini arttırabildiğini belirtmişlerdir (Han, Yun, Zhang, Xu, & Wang, 2019). Tablo 3'ten de görülebileceği gibi EAOC'nin CaO ve MgO içerikleri sırasıyla %34,79 ve %5,07 olarak tespit edilmiştir. Bu nedenle anaerobik sisteme EAOC eklenmesinin ortam alkalinitesini arttırarak metanojenik aktiviteyi sınırladığı ve bu nedenle metan üretiminin iyileştirilmesine katkı sağlanmadığı düşünülmektedir.

Reaktörlerin metan verimleri incelendiğinde kontrol reaktörünün metan verimi 80,64 mL CH<sub>4</sub>.gVS<sup>-1</sup> olarak elde edilirken en yüksek metan verimi 136,56 mL CH<sub>4</sub>.gVS<sup>-1</sup> ile R7'de elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre anaerobik sisteme %4 oranında EAOC eklenmesi kontrol reaktörüne göre metan verimini %66 oranında arttırmaktadır.

Tablo 4. Biyogaz ve metan verimleri (Table 4. Biogas and methane yields)

Reaktör	Biyogaz (mL)	Biyogaz Verimi (mL.gVS <sup>-1</sup> )	CH <sub>4</sub> (%)	CH <sub>4</sub> Verimi (mL CH <sub>4</sub> .gVS <sup>-1</sup> )
R1	5411,0±18,1	197,50±24,7	61,31±5,3	121,09±11,4
R2	5315,0±22,4	193,99±31,9	62,71±4,8	121,65±13,9
R3	5236,5±17,6	191,13±15,6	62,48±3,9	119,42±16,2
R4	5597,8±13,5	204,31±36,8	61,24±1,8	125,12±12,8
R5	5362,2±19,7	195,71±44,2	61,38±2,2	120,13±18,7
R6	5982,6±12,9	218,36±51,5	61,7±4,6	134,73±19,1
R7	5952,0±11,1	217,24±37,6	62,86±1,6	136,56±17,5
R8	5966,9±18,4	217,79±43,1	60±5,2	130,67±17,3
R9	6021,9±20,3	219,79±19,6	60,91±5,3	133,88±10,8
Kontrol	3622,5±14,3	132,22±38,2	60,99±2,7	80,64±16,4

## 4. Sonuç

Gerçekleştirilen çalışmada anaerobik sisteme EAOC eklenmesinin biyogaz üretimi üzerine etkileri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar %1-5 oranlarında EAOC eklenmesinin kontrol reaktörüne göre kümülatif biyogaz üretimini arttırdığını göstermiştir. En yüksek kümülatif biyogaz üretimi 6021,9 mL ile R9'da elde edilirken %3,5-5 EAOC eklenen reaktörlerde oldukça yakın sonuçlar ortaya çıkmıştır. En yüksek metan verimi ise %4 EAOC eklenen R7'de 136,56 mL CH<sub>4</sub>.gVS<sup>-1</sup> ile elde edilmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre EAOC prosesi sonucunda ortaya çıkan cürufur biyogaz üretiminde katkı maddesi olarak verimli bir şekilde kullanılabilir. Eklenen EAOC'nin anaerobik mikroorganizmalar ve mikroorganizma türleri üzerine

etkilerini daha detaylı inceleyebilmek için bu konu üzerinde daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir.

## Kaynakça

- Abdeshahian, P., Lim, J. S., Ho, W. S., Hashim, H., & Lee, C. T. (2016). Potential of biogas production from farm animal waste in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 714–723. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.117>
- Abouti, K., Álvarez-Gallego, C. J., & Romero-García, L. I. (2016). Evaluation of methane generation and process stability from anaerobic co-digestion of sugar beet by-product and cow manure. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 121(5), 566–572. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2015.10.005>
- Abudi, Z. N., Hu, Z., Sun, N., Xiao, B., Rajaa, N., Liu, C., & Guo, D. (2016). Batch anaerobic co-digestion of OFMSW (organic fraction of municipal solid waste), TWAS (thickened waste activated sludge) and RS (rice straw): Influence of TWAS and RS pretreatment and mixing ratio. *Energy*, 107, 131–140. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.141>
- Arif, S., Liaquat, R., & Adil, M. (2018). Applications of materials as additives in anaerobic digestion technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 97(January 2017), 354–366. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.039>
- Bankole, L. K., Rezan, S. A., & Sharif, N. M. (2014). Assessment of hexavalent chromium release in Malaysian electric arc furnace steel slag for fertilizer usage. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 19(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/19/1/012004>
- Bilhan, A., & Emikönel, S. (2021). Nevşehir İli Güneş Enerji Potansiyelinin Analizi ve Kurulu Güneş Enerji Santralleri. *European Journal of Science and Technology*, (24), 289–294. <https://doi.org/10.31590/ejosat.900024>
- Canan, A., Calhan, R., & Ozkaymak, M. (2021). Investigation of the effects of different slags as accelerant on anaerobic digestion and methane yield. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01340-0>
- Ceylan, H. (2021). Çevresel Etki Değerlendirmesi Uygulamalarında Enerji Sektörü Analizi. *European Journal of Science and Technology*, (27), 237–242. <https://doi.org/10.31590/ejosat.952538>
- Chen, J. L., Steele, T. W. J., & Stuckey, D. C. (2018). The effect of Fe 2 NiO 4 and Fe 4 NiO 4 Zn magnetic nanoparticles on anaerobic digestion activity. *Science of the Total Environment*, 642, 276–284. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.373>
- Divya, D., Gopinath, L. R., & Merlin Christy, P. (2015). A review on current aspects and diverse prospects for enhancing biogas production in sustainable means. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 690–699. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.055>
- Esposito, G., Frunzo, L., Giordano, A., Liotta, F., Panico, A., & Pirozzi, F. (2012). Anaerobic co-digestion of organic wastes. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 11(4), 325–341. <https://doi.org/10.1007/s11157-012-9277-8>
- Gadhe, A., Sonawane, S. S., & Varma, M. N. (2015). ScienceDirect Influence of nickel and hematite nanoparticle powder on the production of biohydrogen from complex distillery wastewater in batch fermentation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(34), 10734–10743.

- <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.05.198>
- Han, F., Yun, S., Zhang, C., Xu, H., & Wang, Z. (2019). Bioresource Technology Steel slag as accelerant in anaerobic digestion for nonhazardous treatment and digestate fertilizer utilization. *Bioresource Technology*, 282(January), 331–338. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.03.029>
- Jung, H., Kim, J., & Lee, C. (2016). Continuous anaerobic co-digestion of Ulva biomass and cheese whey at varying substrate mixing ratios: Different responses in two reactors with different operating regimes. *Bioresource Technology*, 221, 366–374. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.059>
- Kaparaju, P., Ellegaard, L., & Angelidaki, I. (2009). Optimisation of biogas production from manure through serial digestion: Lab-scale and pilot-scale studies. *Bioresource Technology*, 100(2), 701–709. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.07.023>
- Kaskun, S., Çalhan, R., & Akinay, Y. (2021). Enhancement of biogas production using SnO<sub>2</sub> nanoparticle-doped mica catalyst. *Biomass Conversion and Biorefinery*, (0123456789). <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01983-z>
- Kato, S., Hashimoto, K., & Watanabe, K. (2012). Methanogenesis facilitated by electric syntrophy via (semi)conductive iron-oxide minerals. *Environmental Microbiology*, 14(7), 1646–1654. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2011.02611.x>
- Lee, J. Y., Lee, S. H., & Park, H. D. (2016). Enrichment of specific electro-active microorganisms and enhancement of methane production by adding granular activated carbon in anaerobic reactors. *Bioresource Technology*, 205, 205–212. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.01.054>
- Lisboa, M. S., & Lansing, S. (2013). Characterizing food waste substrates for co-digestion through biochemical methane potential (BMP) experiments. *Waste Management*, 33(12), 2664–2669. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.09.004>
- Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Romero-G?iza, M. S., 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. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.039>
- Monosi, S., Ruello, M. L., & Sani, D. (2016). Electric arc furnace slag as natural aggregate replacement in concrete production. *Cement and Concrete Composites*, 66, 66–72. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.10.004>
- Nandi, R., Saha, C. K., Huda, M. S., & Alam, M. M. (2017). Effect of mixing on biogas production from cow dung. *Eco-Friendly Agril*, 10(2), 7–13. Retrieved from [www.efaj-international.com](http://www.efaj-international.com)
- Nevzorova, T., & Kutcherov, V. (2019). Barriers to the wider implementation of biogas as a source of energy: A state-of-the-art review. *Energy Strategy Reviews*, 26, 100414. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100414>
- Nges, I. A., & Björnsson, L. (2012). High methane yields and stable operation during anaerobic digestion of nutrient-supplemented energy crop mixtures. *Biomass and Bioenergy*, 47, 62–70. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.10.002>
- Nikolić, I., Drinčić, A., Djurović, D., Karanović, L., Radmilović, V. V., & Radmilović, V. R. (2016). Kinetics of electric arc furnace slag leaching in alkaline solutions. *Construction and Building Materials*, 108, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.038>
- Noorollahi, Y., Kheirrouz, M., Farabi-Asl, H., Yousefi, H., & Hajinezhad, A. (2015). Biogas production potential from livestock manure in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 748–754. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.190>
- Santamaria, A., Faleschini, F., Giacomello, G., Brunelli, K., San José, J. T., Pellegrino, C., & Pasetto, M. (2018). Dimensional stability of electric arc furnace slag in civil engineering applications. *Journal of Cleaner Production*, 205, 599–609. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.122>
- Suanon, F., Sun, Q., Li, M., Cai, X., Zhang, Y., Yan, Y., & Yu, C. P. (2017). Application of nanoscale zero valent iron and iron powder during sludge anaerobic digestion: Impact on methane yield and pharmaceutical and personal care products degradation. *Journal of Hazardous Materials*, 321, 47–53. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.08.076>
- Tashiro, Y., Matsumoto, H., Miyamoto, H., Okugawa, Y., Pramod, P., Miyamoto, H., & Sakai, K. (2013). A novel production process for optically pure l-lactic acid from kitchen refuse using a bacterial consortium at high temperatures. *Bioresource Technology*, 146, 672–681. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.07.102>
- World Steel Association. (2019). Steel Statistical Yearbook 2019 Concise version. *World Steel Association*, 1–6. Retrieved from <https://www.worldsteel.org/zh/dam/jcr:7aa2a95d-448d-4c56-b62b-b2457f067cd9/SSY19%2520concise%2520version.pdf>
- Xu, H., Chang, J., Wang, H., Liu, Y., Zhang, X., Liang, P., & Huang, X. (2019). Enhancing direct interspecies electron transfer in syntrophic-methanogenic associations with (semi)conductive iron oxides: Effects and mechanisms. *Science of the Total Environment*, 695, 133876. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133876>
- Zenk, H. (2019). The Electric Energy Potential of Samsun City from Animal Manure. *European Journal of Science and Technology*, (17), 1307–1312. <https://doi.org/10.31590/ejosat.661910>
- Zhang, B., Zhang, L.-L., Zhang, S.-C., Shi, H.-Z., & Cai, W.-M. (2005). The influence of pH on hydrolysis and acidogenesis kitchen wastes. *Environmental Technology*, 26(3), 329–340.