

MEYVE VE SEBZE ATIKLARI İLE İNEK GÜBRESİNİN ANAEROBİK KOFERMANTASYONU İLE ELDE EDİLEN BİYOGAZIN ENERJİ POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ

Rutkay KAPTAN*^{ID}
F. Olcay TOPAÇ**^{ID}

Alınma:13.05.2024; düzeltme:02.07.2024; kabul: 03.07.2024

Öz: İnsanlık tarih boyunca günlük hayatını devam ettirebilmek için hem enerjiye hem de gıda maddelerine ihtiyaç duymuştur. Tarım ve hayvancılık sektörleri ürünleri insanların temel besin ihtiyaçlarını karşılamaktadır. Bu tüketim sonucunda oluşan atıklar ise anaerobik kofermantasyon yoluyla biyogaza çevrilerek enerji eldesinde kullanılabilir. Bu çalışma meyve ve sebze atıkları ile inek gübresinin anaerobik kofermantasyonu yoluyla elde edilen biyogazın enerji üretimine uygun olup olmadığını araştırmaktadır. Kullanılan atıklar meyve ve sebze atıkları ile inek gübresi olarak belirlenmiştir. Çalışma, 30 günlük hidrolik bekletme süresi boyunca, 37 °C sıcaklıkta, 3 L hacme sahip 2 reaktör kullanılarak gerçekleştirilmiştir. R₁ ve R₂ olarak adlandırılan bu reaktörlerin organik yükleme oranları sırasıyla; 0,5 ve 0,6 g VS/L.gün olarak belirlenmiştir. Karışım oranları sırasıyla; R₁:%40 meyve + %30 sebze + %30 inek gübresi; R₂: %35 meyve + %40 sebze + %25 inek gübresi şeklindedir. Reaktörlerden toplanan veriler, bu atık kompozisyonundan üretilecek biyogazdan elde edilecek elektrik enerjisi miktarının 2,38 kWh olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar, meyve ve sebze atıklarıyla inek gübresinin anaerobik kofermantasyonunun, üretebilecekleri enerji potansiyeli, atık miktarlarının fazla olması ve sürdürülebilir enerji üretim yöntemi olması sebebiyle, alternatif enerji kaynağı olarak değerlendirilmesinin mümkün olduğunu göstermektedir.¹

Anahtar Kelimeler: Alternatif enerji kaynağı, anaerobik kofermantasyon, biyogaz, meyve ve sebze atığı, inek gübresi

Determination of the Energy Potential of Biogas Obtained by Anaerobic Cofermentation of Fruit and Vegetable Waste and Cow Manure

Abstract: Throughout the history, humanity has needed both energy and foodstuffs to sustain its daily life. The products of agriculture and livestock sectors meet the basic nutritional needs of people. The wastes generated as a result of this consumption can be converted into biogas through anaerobic cofermentation and used in energy production. This study investigates whether the biogas obtained by anaerobic cofermentation of fruit and vegetable wastes and cow manure is suitable for energy production. The wastes used were fruit and vegetable wastes and cow manure. The study was carried out using 2 reactors with a volume of 3 L at a temperature of 37 °C for a hydraulic retention period of 30 days. The organic loading rates of these reactors, designated as R₁ and R₂, were 0.5 and 0.6 g VS/L.day, respectively. Mixture ratios in R₁ and R₂ reactors were prepared as 40% fruit + 30% vegetables + 30% cow manure and 35% fruit + 40% vegetables + 25% cow manure, respectively. The data collected from the reactors showed that the amount of electrical energy to be obtained from the biogas produced from this waste composition was 2.38 kWh. These results show that anaerobic cofermentation of fruit and vegetable wastes and cow manure can be considered as an alternative energy source due to the energy potential they can produce, the high amount of waste and the sustainable energy production method.

Keywords: Alternative energy sources, anaerobic cofermantation, biogas, fruit and vegetable wastes, cow manure

* Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Görükle, Nilüfer, Bursa

** Bursa Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü, Görükle, Nilüfer, Bursa

İletişim Yazarı: Rutkay KAPTAN (kaptanrutkay@gmail.com)

1. GİRİŞ

Enerji ve gıda maddeleri, insan hayatının devamı için mutlak gerekli temel ihtiyaçlar olarak dikkate alınmaktadır (Tengiz ve Ayyıldız., 2022). Enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla son 200 yıl içerisinde tercih edilen temel kaynaklar fosil yakıtlar olmuştur. Fosil yakıtların kullanımı, buhar motorunun keşfinden sonra gerçekleşen Sanayi Devrimi ile başlamış ve bu kullanım, 1970'lerin ortalarına kadar yoğun bir artış göstermiştir (Çukurçayır ve Sağır, 2008; Büyükmihçı, 2003; Gümüş ve Buluş, 2020; Çelen, 2021). Fosil yakıt kaynaklarından enerji elde edildikten sonra oluşan emisyonlar, yıllar içerisinde atmosferde birikerek dünya üzerinde bir sera etkisi yaratmıştır. Oluşan sera etkisi küresel ısınmaya bağlı iklim krizi sorununu gündeme getirmiş ve insanlığın bugüne kadar karşı karşıya kaldığı en büyük çevre probleminin oluşmasına sebep olmuştur (Güneş ve Karakaş, 2022). Bu krizin yanı sıra, enerji ihtiyacını sınırlı bir kaynaktan karşılamak sürdürülebilir bir yaklaşım olmadığından, alternatif enerji kaynaklarının belirlenmesi için yoğun çalışmalar yapılmıştır (Demir ve diğ., 2018). Yapılan araştırmalar sonucunda belirlenen yenilenebilir enerji kaynakları, günümüzde çevre dostu enerji üretim teknikleri olarak teşvik edilmekte olup; bu kaynaklar arasında rüzgar, güneş, jeotermal, hidro-elektrik ve biyokütle bulunmaktadır.

İnsanlığın sürdürülebilir yaşamını devam ettirebilmesi için temel ihtiyaçlar arasında özellikle besin maddelerine duyulan ihtiyaç da önemli bir yer tutmaktadır. Bu temel ihtiyacın karşılanması, tarım ve hayvancılık ürünlerinin elde edilmesi yoluyla gerçekleştirilmektedir. Son 30 yıl içinde, tarım ve hayvancılık ürünlerinin üretimi, nüfus artışıyla bağlantılı olarak önemli bir şekilde artış göstermiştir (FAOSTAT, 2023). Özellikle ekonomik gücü fazla olan ülkelerde gıda maddelerine ulaşımın kolaylığı ve nüfus yoğunluğu, yüksek tüketim miktarlarına işaret etmektedir. Bu aşırı tüketimin bir sonucu olarak ortaya çıkan atık miktarları da, ihmal edilemez düzeydedir (Smil, 1999). Gıda atıklarının doğru bir şekilde bertaraf edilmemesi, ciddi bir sorun teşkil etmektedir. Bu organik atıkların doğaya bırakılması, öncelikle çürüme kaynaklı koku ve haşere problemleri gibi estetik sorunlara yol açmaktadır. Ayrıca, kurallara uygun bir şekilde yönetilmeyen bu organik atıklar, salgın hastalıklar gibi ciddi halk sağlığı sorunlarına ve yer altı su kaynaklarının kirlenmesi gibi çevresel sorunlara da sebep olabilmektedir (Tınmaz, 2016). Bu sorunların önlenmesi amacıyla, tarım ve hayvancılık sektöründe oluşacak olan organik atıkların, biyokütle enerjisi sistemleri için ham madde olarak kullanılma potansiyeli muhakkak dikkate alınmalıdır (Deressa ve diğ., 2015). Böylece ortaya çıkan organik atıklardan maksimum fayda elde edilmesi mümkün olabilmektedir. Yapılan bir araştırmada, tüketilen meyve ve sebzelerin %38'inin atık olarak kaldığı tespit edilmiştir (Smil, 1999). Dünya genelinde üretilen meyve ve sebzelerin miktarları 2019 yılı için sırasıyla; 865.876.405 ton/yıl ve 1.075.203.877 ton/yıl olarak belirlenmiştir (UİB, 2019). Bu üretim miktarları baz alındığında, oluşan yaş meyve ve sebze atıkları ise sırasıyla; 329.033.034 ton/yıl ve 408.577.474 ton/yıl olarak hesaplanmaktadır. Dünya genelinde hayvancılık sektöründeki 2019 yılı verileri incelendiğinde ise, 1.751.363.000 adet büyükbaş hayvan, 3.183.107.000 adet küçükbaş hayvan ve 27.883.057.000 adet kanatlı hayvan üretiminin gerçekleştiği görülmektedir (Anonim, 2020). Bir büyükbaş hayvandan 3,6 ton/yıl gübre, bir küçükbaş hayvandan 0,7 ton/yıl gübre ve kanatlılardan da 0,022 ton/yıl gübre elde edileceği kabulüyle toplam oluşacak atık miktarı yaklaşık olarak büyükbaş, küçükbaş ve kanatlılar için sırasıyla; 6,5 milyar ton/yıl, 2,3 milyar ton/yıl ve 0,62 milyar ton/yıl olarak hesaplanmaktadır (Baran ve diğ., 2017).

Biyokütleden elektrik enerjisi elde etmek için kullanılan en yaygın yöntem biyogazdan elektrik üretimidir. Biyogaz üretimi, organik içerikli atıkların (tarım ve hayvancılık atıkları, gıda sanayisi atıkları vb.) oksijensiz ortamda mikroorganizmalar yardımıyla % 60-80 oranında metan (CH₄) gazına, % 20-40 oranında karbon dioksit (CO₂) gazına, %2 oranında hidrojen sülfür (H₂S) gazına ve eser miktarda da diğer gazlara çevrimi olarak tanımlanmıştır (Alkan, 2013, Türkmenler ve diğ., 2014). Bu çevrim sonucunda elde edilen biyogaz, kombine ısı ve güç sistemleri tarafından yakılarak enerji elde edilmektedir. Bu çevrim sırasında yakılan biyogazın % 35 – 40 oranındaki

kısmı elektrik enerjisine, % 40 – 45 oranındaki kısmı da termal enerjiye çevrilmektedir (Anacak, 2012). Kullanılan atıkların anaerobik fermantasyonu tamamlandığında elde kalan sıvı materyal birinci kalite toprak düzlemleyici ya da gübre olarak kullanılabilir. Bu işlem sonucunda elde edilen kazanımlar arasında atık yönetiminin sağlanması, atıklardan katma değerli ürün üretilmesi (biyogaz ve gübre) ve enerji üretimi sayılabilir. İnsanoğlunun gıdaya ve enerjiye ihtiyacı hep var olacağından biyogaz üretimi sürdürülebilir bir enerji üretim yöntemi olarak nitelendirilmektedir. Bunun yanı sıra bu yaklaşım, sera gazı salınımının azalmasına yardımcı olarak küresel iklim krizinin engellenmesinde bir model oluşturmaktadır (Özer, 2017).

Yürütülen bu çalışmanın temel amacı tarımsal atıkların anaerobik kofermantasyon işlemi yardımı ile çürütülmesiyle elde edilebilecek enerji miktarının belirlenmesidir. Çalışmada, tarım atıkları olan meyve ve sebze atıkları ile hayvancılık atığı olan inek gübresi farklı oranlarda karıştırılmış ve anaerobik ortamda çürütülerek biyogaza çevrilmiştir. Laboratuvar denemeleri ile atıklardan elde edilebilecek biyogaz miktarı belirlenmiş, sistemin elektrik üretimi için kullanılmasıyla anlamlı miktarda enerji elde edilip edilemeyeceği irdelenmiş ve çalışmada kullanılan karışım materyalin (meyve ve sebze atıkları ile inek gübresi karışımı) yenilenebilir enerji kaynağı olarak kullanımı değerlendirilmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Materyal

Çalışmada kullanılacak atık meyve ve sebzeler Bursa Görükle’de bulunan bir zincir marketin çöplerinden ayıklanarak toplanmıştır. Meyve atıkları ile sebze atıkları elle birbirinden ayrıldıktan sonra toplam ağırlıkları ölçülmüştür. İnek gübresi ise Bursa Uludağ Üniversitesi Veteriner Fakültesi Çiftliği’nden bir kere olmak üzere elle toplanmıştır. Gübre numunesi 10 kg olacak şekilde, gübre sıyırma ünitesi biriktirme tankından karıştırılarak elde edilmiştir. Böylece olabilecek en homojen numune örneği alınmıştır. Çürütücülerde kullanılacak aşı çamuru ise Bursa Karacabey’de bulunan ENFAŞ Enerji Elektrik Üretim AŞ Karacabey Biyogaz Tesisi’ndeki mezofilik şartlarda çalışan çürütücüden alınmıştır. Toplanan ve tedarik edilen tüm materyal çalışma başlayana kadar Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi’ne ait +4 °C’ de çalıştırılan soğuk hava deposunda bekletilmiştir.

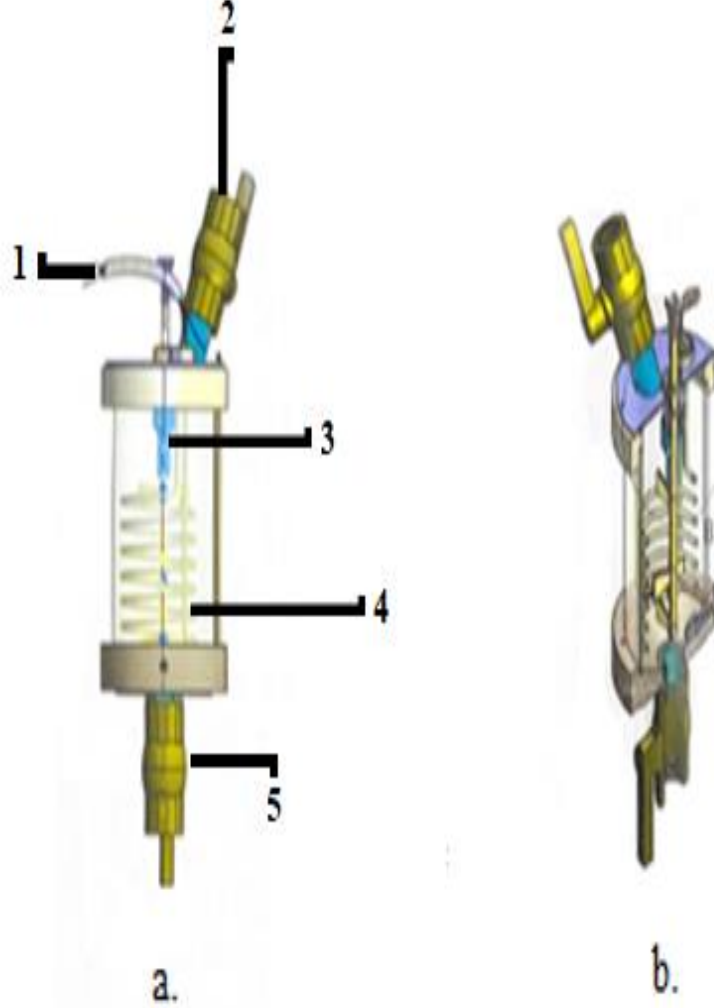
Toplanan meyve atıklarında çürümenin başladığı materyaller elle ayrılmıştır. Daha sonra bıçak yardımıyla 1-2 cm boyutlu ufak küp parçalara doğranmıştır. Doğranan parçalar ev tipi mutfak robotu yardımıyla 3-5 mm boyutuna parçalanmış ve numune kabına alınmıştır. Alınan inek gübresi ise anaerobik şartların oluşmasını önlemek için alındığı kaptaki düzenli olarak karıştırılarak havalandırılmış ve çürümesi engellenmiştir.

2.2. Yöntem

2.2.1. Kullanılan Laboratuvar Düzenliği

Çalışmada farklı organik yükleme oranları (OLR) değerlerinde, farklı karıştırma oranlarında ve farklı C/N oranlarında 3 L sabit hacimli iki reaktör işletilmiştir (R₁ ve R₂). Reaktörlerin OLR değerleri R₁ için 0,5 g VS/L*gün ve R₂ için ise 0,6 g VS/L*gün olarak belirlenmiştir. Her iki reaktör için de hidrolik bekleme süresi (HBS) 30 gün olarak seçilmiştir. Çalışma mezofilik koşullarda gerçekleştirilmiştir. Reaktör sıcaklıkları 37 °C (± 0,5 °C) olarak ayarlanmıştır. Reaktörlere ilave edilen aşı miktarı 1,2 L olarak belirlenmiştir. Reaktörler, atık karışımları yüklendikten sonra 30 gün boyunca, dakikada 1 devir olmak kaydı ile üzerinde bulunan otomatik karıştırıcı yardımıyla karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Çalışmanın yapıldığı reaktör kesitleri Şekil 1’de verilmiştir. Burada, üst taraftaki küresel vana reaktörün yüklenmesi için kullanılan giriş yapısı, alttaki küresel vana ise çalışmanın sonunda reaktörün boşaltılması için kullanılan çıkış yapısı olarak teşkil edilmiştir. Reaktör boyunca yukarıdan aşağıya doğru inmiş olan helezonik kısım reaktörün rezistans kısmıdır. Rezistansın ortasında bulunan dikey mil üzerinde

çıkıntı yapan kanatçıklar karıştırma işlemi için teşkil edilen karıştırma pedalinı göstermektedir. Elektrik bağlantıları ise reaktörün giriş yapısının yanında konumlandırılmıştır.



Şekil 1 :

Reaktör kesitleri, a. Reaktörün karşıdan görünüşü, (1. Elektrik kablosu, 2. Atık besleme vanası, 3. Reaktörün karıştırıcısı, 4. Isıtıcı rezistans, 5. Tahliye vanası), b. Reaktörün iç kesiti

Belirlenen OLR değerine göre çürütücüye yüklenecek organik madde miktarı uçucu katı madde (VS) cinsinden hesaplanmıştır. Bu OLR değeri referans alınarak reaktöre toplam yüklenecek uçucu katı miktarı gr VS cinsinden hesaplanmıştır. Daha sonra reaktörler için

belirlenen % karışım oranları kullanılarak, reaktöre hangi atıktan ne kadar miktarda yükleneceği tespit edilmiş ve reaktör yüklemeleri bu değerlere göre yapılmıştır (Ayhan, 2013).

$$OLR = X \text{ gr VS} / HBS * Vaşı \quad (1)$$

Burada;

X: Çürütücüye yüklenecek uçucu organik madde miktarı, gr

HBS: Çürütücünün hidrolik bekletme süresi, gün

Vaşı: Çalışmada kullanılacak aşı çamurunun hacmi, L

olarak belirlenmiştir.

X gr VS değeri bulunduktan sonra R₁ ve R₂ için karışım oranları yüzdelere göre meyve atığı, sebze atığı ve inek gübresi miktarı gr VS cinsinden belirlenmiştir. Daha sonra elde edilen bu gr VS birimindeki değer toplam katı madde miktarını hesaplamak için kullanılmıştır.

Bu hesaplamalar yapıldıktan sonra reaktörlerin C/N oranları aşağıdaki formülden hesaplanmıştır (https://compost.css.cornell.edu/calc/cn_ratio.html, 1996).

$$R = \frac{Q1*[C1*(100-M1)]+Q2*[C2*(100-M2)]+Q3*[C3*(100-M3)]}{Q1*[N1*(100-M1)]+Q2*[N2*(100-M2)]+Q3*[N3*(100-M3)]} \quad (2)$$

Burada,

R: Karışımın C/N oranını

Qn: Kullanılan atıkların ıslak ağırlıklarını

Cn: Kullanılan atıkların %C oranlarını

Nn: Kullanılan atıkların %N oranlarını

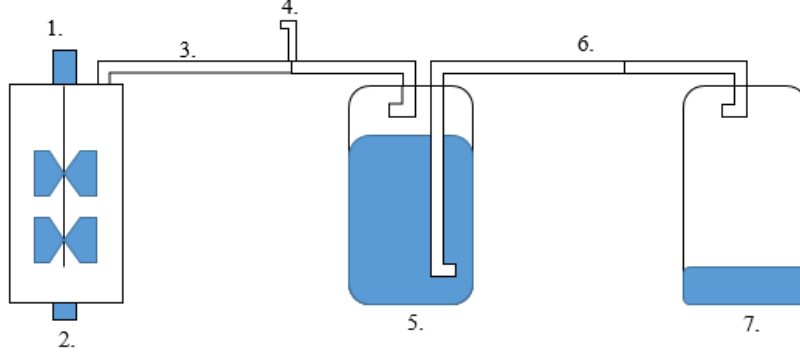
Mn: Kullanılan atıkların %nem içeriklerini belirtmektedir.

2.2.2. Laboratuvar Analizleri

Örneklerdeki karbon tayini testi standart metotlarda belirtilen kuru madde ve kül tayini yöntemine göre yapılmıştır (APHA, 2023). Toplam Khejdahl Azotu standart metotlara göre destilasyon cihazı kullanılarak belirlenmiştir (APHA, 2023). Anaerobik çürütme süresince çamur sıcaklıkları reaktörlerin üzerinde sabit halde bulunan termometre yardımıyla otomatik olarak ölçülmüştür. Sıcaklık ölçümleri her gün için 1 kere kaydedilmiştir. Çamurların pH'sı masaüstü pH-metre yardımıyla belirlenmiştir (Ayhan, 2013). Uçucu yağ asidi ve alkalinite kontrolleri ise FOS/TAC yöntemine göre titrimetrik olarak yapılmıştır (Voß ve diğ., 2009).

Reaktörlerde üretilen biyogaz miktarı, sıvı yer değiştirmeli U - boru sistemiyle günde bir kere olmak üzere ölçülmüştür (Ayhan, 2013). Bu sistem 2 adet 5 L cam kavanoz kullanılarak oluşturulmuştur. İlk kavanoz çürütücünün gaz çıkışına bağlanıp içi su dolu olarak, ikinci kavanoz ise pnömatik hortum ve üzerinde numune alma işlemi ve sızdırmazlık için gerekli olan korozyona dayanıklı vanalar kullanılarak boş halde birinci kavanoza bağlanmıştır. Birinci kavanoz, reaktör içerisinde üretilen biyogazın uyguladığı basınç sebebiyle içerisindeki suyu ikinci kavanoza taşımak için ve ikinci kavanoz ise reaktörde üretilen biyogaz miktarının litre cinsinden miktarının

ölçümünü yapmak için kullanılmıştır. Birinci kavanozdan ikinci kavanoza taşan su miktarı üretilen biyogazın hacimce değeri olarak kaydedilmiştir (Şekil2). Üretilen biyogazın hacimce içerikleri ise GEOTECH 5000 Gaz Ölçümü Cihazı yardımı ile tespit edilmiştir.

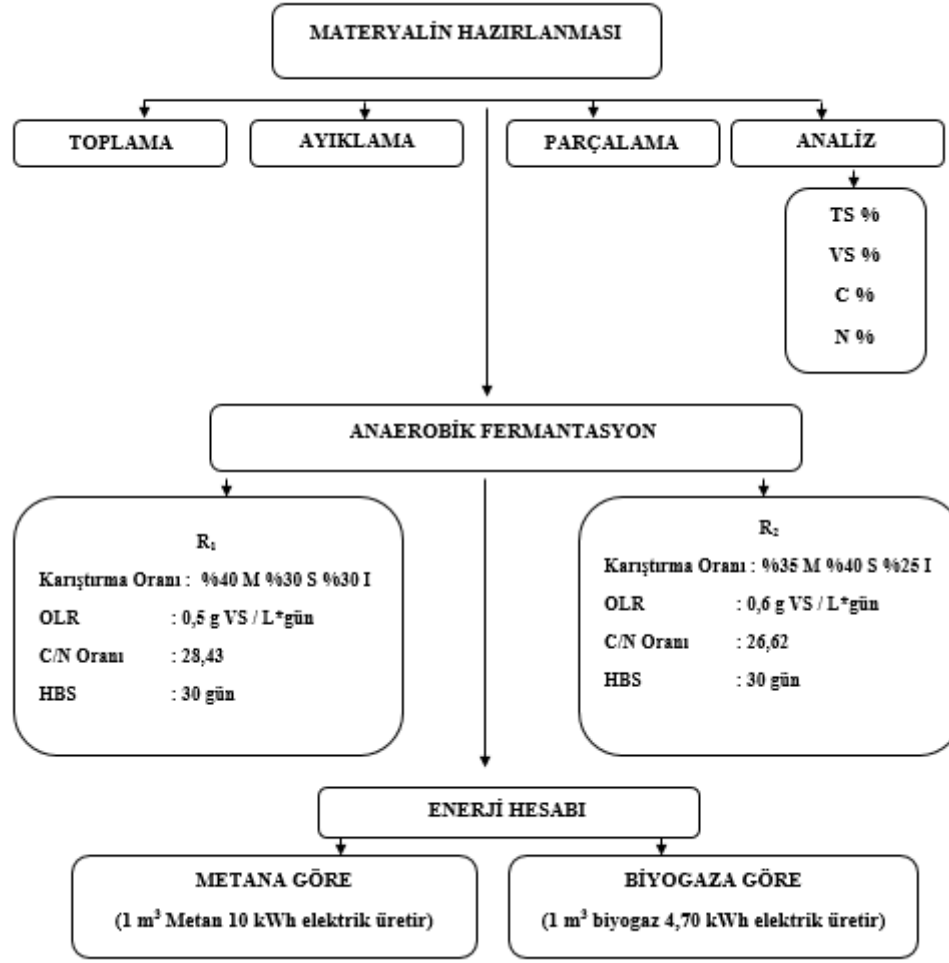


Şekil 2:

Deney düzeneği. 1. Reaktör girişi, 2. Reaktör çıkışı, 3. Üretilen gazın toplama borusu, 4. Gaz numunesi alınan vana, 5. İçi su dolu 5 L kap, 6. Suyun gaz basıncıyla taşıdığı boru, 7. Taşan suyun toplandığı 5 L kap

Üretilen biyogazın enerji potansiyeli hesabı Gümüşçü ve diğ., (2010) tarafından belirtilen katsayılarla göre hesaplanmıştır (1 m³ biyogazdan 4,7 kWh elektrik enerjisi ve 1 m³ metan gazından 10 kWh elektrik enerjisi üretilebileceği kabulü).

Yürütülen laboratuvar çalışmasına ilişkin detaylar ve takip parametreleri Şekil 3’de verilen akış diyagramında sunulmuştur.



Şekil 3:
Akış diyagramı

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Meyve ve sebze atıkları ile inek gübresinin kofermantasyonu yolu ile elde edilecek biyogazın enerji üretimi potansiyelinin değerlendirildiği çalışmada öncelikle kullanılan atıkların karakterizasyon analizleri yapılmıştır. Kullanılan atık materyallerin toplam katı, uçucu katı, kül, karbon ve azot oranları Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. Kullanılan atıkların karakterizasyonu

Atık türü	Toplam katı (%)	Uçucu katı (%)	Kül içeriği (%)	% C	% N
İnek gübresi	13,12	84,46	15,53	48,49	2,562
Meyve atığı	14,42	70,65	16,50	40,53	0,908
Sebze atığı	8,520	83,12	29,83	47,72	3,173

Tablo 1’de verilen karbon ve azot değerlerine ilişkin sonuçlar dikkate alındığında atıkların karışım oranları belirlenirken meyve ve sebze atıklarının inek gübresinden daha fazla kullanılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu yaklaşım reaktörlerin C/N oranlarının istenilen aralıkta

kalmasını sağlayacak ve anaerobik mikroorganizma popülasyonu için uygun büyüme ve metabolik şartların sağlanmasına yardımcı olacaktır (Anacak, 2012).

Çalışmada kullanılan inek gübresi, meyve atığı ve sebze atığının toplam kuru madde yüzdeleri sırasıyla %13,12, %14,42 ve %8,52 olarak belirlenmiştir. Alvarez ve diğ., (2008) tarafından yürütülen çalışmada inek gübresinin toplam kuru madde yüzdesi ise 19,8 olarak tespit edilmiştir. Belirtilen çalışmada meyve ve sebze atıkları karıştırılarak karakterize edilmiş ve bu atık grubu içinde kuru madde yüzdesi 12,7 olarak hesaplanmıştır. Yapılan diğer bir çalışmada (Pradeshwaran ve diğ., 2024) mutfak atıkları ve meyve ve sebze atıklarının biyokatalizör ile anaerobik çürütülebilirliği araştırılmış ve çalışmada kullanılan meyve ve sebze atıklarının içerdiği % nem, C, N ve kuru madde oranları sırasıyla; 83,1; 43,42; 1,92; ve 11,2 olarak belirlenmiştir. Belirtilen çalışmada meyve ve sebze atıkları birlikte değerlendirilmiş olmakla beraber, karakterizasyon değerlerinin, yürütülen çalışmada tespit edilen değerlere (Tablo 1) çok aykırı olmadığı görülmektedir. Pavi ve diğ., (2017) tarafından yürütülen bir çalışmada, belediye katı atıkları ile meyve ve sebze atıklarının organik kısımlarının biyogaz üretim potansiyelleri değerlendirilmiştir. Çalışmalarında kullanılan meyve ve sebze atıklarının karakterizasyon sonuçları incelendiğinde, materyalin nem oranının % 80,46 olduğu ve % TS oranının ise 19,54 olduğu görülmektedir. Bu değerler de Tablo 1’de sunulan sonuçlarla uyumlu bulunmuştur. Çalışmada ayrıca atık materyallerin ihtiva ettiği C ve N oranları mg/g TS olarak hesaplanmıştır. Buna göre C değeri TOC cinsinden 180,32 mg/g TS olarak, N değeri ise 7,36 mg/g TS olarak belirlenmiştir. Vats ve diğ., (2019) tarafından yürütülen bir diğer çalışmada, meyve ve sebze atıkları ile şeker kamışı küspesinin anaerobik kofermantasyonunda substrat oranının biyogaz verimine etkisi incelenmiştir. Çalışmada kullanılan meyve ve sebze atıklarının, bu çalışmada kullanılan atıklarla benzer karakterde olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada kullanılan atıkların % nem oranı 89,25, % TS değeri ise 10,75 olarak bulunmuştur. Atık karışımının C ve N değerleri ise sırasıyla % 28,67 ve % 0,7 olarak bulunmuştur. Zareei ve Khodaei (2017) yürüttükleri çalışmada inek gübresi ve mısır samanı atıklarından uyarlanabilir Neuro-Fuzzy Inference sistemini kullanarak biyogaz üretimini modellemişlerdir. Bu çalışmada kullanılan inek gübresinin karakterizasyon değerleri incelendiğinde % TS değerinin 44,9 olduğu, % C ve %N değerinin ise sırasıyla 38,4 ve 1,82 olduğu belirlenmiştir. Bu değerlere göre kullanılan inek gübresinin C/N oranı 21,09’ dur. Tablo 1’de verilen değerlere göre bu çalışmada kullanılan inek gübresi de benzer C/N değerine sahip olup bu değer 19,24 olarak hesaplanmıştır.

Çalışma kapsamında kullanılan atık materyallerin karakterizasyon çalışmasında belirlenmiş olan % TS ve % VS değerleri, belirlenen organik yükleme oranı ve karışım oranlarının yardımı ile reaktörlere yüklenecek organik madde miktarının hesabında kullanılmıştır. Reaktörlerin C/N oranları hesaplanırken ise Tablo 1’de her bir atık için verilen % C ve % N değerleri ile karışım oranları dikkate alınarak hesaplama yapılmıştır Gerçekleştirilen hesaplama sonucunda R₁ reaktörü için C/N oranı 28,43 olarak, R₂ reaktörü için C/N oranı ise 26,62 olarak hesaplanmıştır. (https://compost.css.cornell.edu/calc/cn_ratio.html, 1996).

Karışımların C/N oranlarının hesaplanmasından sonra reaktörler yüklenerek çalıştırılmıştır. Çalışmada reaktörlere ilave edilecek aşırı çamurunun otolizinin sonucunda ne kadar biyogaz üreteceğinin tespitinin yapılabilmesi için, bir reaktöre organik atık olmadan sadece aşırı çamuru yüklenmiştir. Reaktöre yüklenen 1,2 L aşırı çamurunun 30 günlük çalışma süresi sona erdiğinde, 15,67 L biyogaz ürettiği tespit edilmiştir.

Çalışma kapsamında çalıştırılan R₁ reaktörü % 40 meyve atıkları, % 30 sebze atıkları ve % 30 inek gübresi içermektedir. Hazırlanan karışım reaktöre yüklenirken OLR değeri 0,5 g VS/L*gün olarak belirlenmiştir. Bu OLR değerinde reaktöre beslenmesi gereken atığın uçucu katı miktarı 18 gr VS olarak hesaplanmıştır. Reaktörün HBS değeri 30 gün olarak belirlenmiş ve sıcaklığı ise 37 °C olarak seçilmiştir. Bu şartlara göre işletilen R₁ reaktöründe üretilen gaz miktarı 30 gün boyunca takip edilmiş ve kaydedilmiştir. R₁ reaktöründe üretilen günlük biyogaz miktarları Şekil 3.’te verilmiştir. R₁ reaktörünün, 30 günlük hidrolik bekleme süresi sonunda 24,80 L gaz ürettiği belirlenmiştir. Reaktörde kullanılan aşırı çamurunun otolizi sebebiyle ürettiği

biyogaz miktarı da göz önünde bulundurulduğunda, reaktörün içerisine beslenen atık karışımının ürettiği biyogaz miktarı 9,13 L olarak hesaplanmıştır. Bu reaktörde üretilen gazın metan içeriği ise % 71,3 olarak belirlenmiştir (Tablo 2).

Tablo 2. Üretilen biyogazın içeriği (%)

% İçerikler	9.07.2022		17.07.2022		25.07.2022	
	R ₁	R ₂	R ₁	R ₂	R ₁	R ₂
CH ₄	10,8	12,1	67,9	59,5	71,3	67,2
CO ₂	23,2	34,6	23,4	23,5	21,6	18
O ₂	11,5	9,1	5	2,7	7	6
H ₂ S (ppm)	37	130	5	9	5	4
Diğer	54,5	44,1	8,2	14,6	5,3	13,2

R₁ reaktörü için FOS/TAC değeri ilk ölçümde 0,24 olarak ölçülürken, aynı reaktör için çalışmanın sonunda belirlenen FOS/TAC değeri 0,19 olarak bulunmuştur. Bu reaktörde çalışmanın sonuna doğru FOS/TAC değerinde hafif bir düşüş gözlenmiştir. Bunun sebebi çalışmanın başında reaktörün içerisine beslenen atık karışımında bulunan organik madde miktarının fazla olması sebebiyle üretilen uçucu yağ asidi oluşum miktarının fazlalığıdır. Ancak çalışmanın bitiminde reaktör içerisinde bulunan organik madde miktarı biyogaz üretimi sebebiyle düşmekte ve dolayısıyla çalışmanın sonuna yaklaşıldıkça üretilen uçucu yağ asidi oluşumu da azalmaktadır. Bu sebeple FOS/TAC sonuçlarında gözlenen azalma, biyogaz üretiminin stabil şekilde gerçekleştiğini ve reaktör içerisine beslenen atığın, mikroorganizmalar tarafından metabolize edilerek azaltıldığını göstermektedir (Şirin, 2022). Tablo 3.'te FOS/TAC değerlendirme kriterleri sunulmuştur.

Tablo 3. FOS/TAC değerlendirme tablosu (Voß ve diğ., 2009)

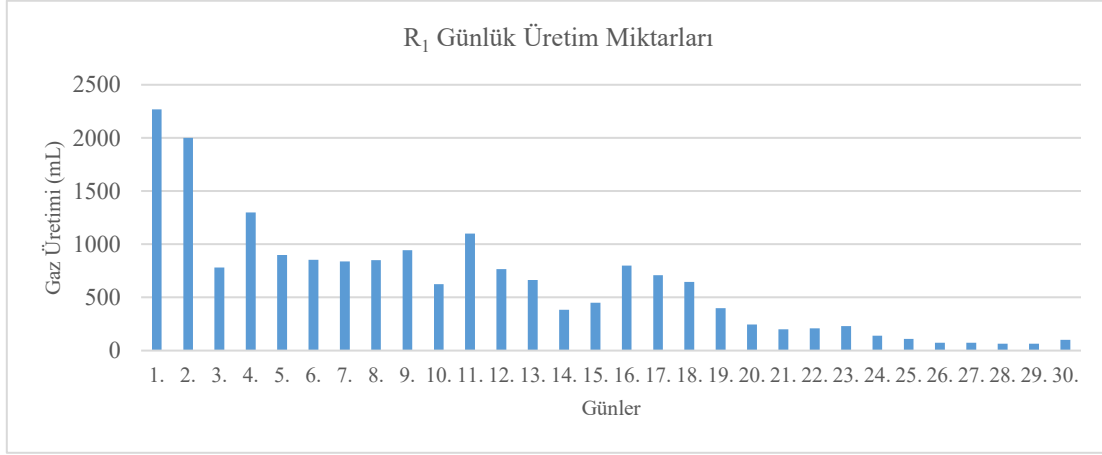
FOS/TAC	Değer	Anlamı	Alınacak Aksiyon
Hazımsızlık Bölgesi	>0,6	Biyokütle miktarı aşırı fazla	Beslemeyi durdurun. FOS/TAC oranı 0,5 değerine yaklaşınca kademeli olarak beslemeye başlayın ve optimum seviyeye kadar azalan bir ivmeyle düşmesine izin verin.
	0,5-0,6	Biyokütle miktarı fazla	Biyokütle besleme frekansını değiştirmeden miktarını azaltın.
	0,4-0,5	Biyokütle miktarı en üst değerde	Biyokütle besleme frekansını da miktarını da değiştirmeden daha sık analiz yapın.
Uygun	0,3-0,4	Biyokütle miktarı en uygun değerde	Biyokütle besleme frekansını ve miktarını değiştirmeyin.
Açlık Bölgesi	0,2-0,3	Biyokütle miktarı çok düşük	Biyokütle besleme frekansını değiştirmeden besleme miktarını artırın.
	<0,2	Biyokütle miktarı ciddi oranda çok düşük	Biyokütle besleme frekansını ve miktarını artırın.

Tablo 3'ten de görüldüğü üzere R₁ reaktöründe ölçülen değer biyokütle miktarının az olduğu aralığa denk gelmektedir. Bu aralıkta bulunan reaktörler için yapılması gereken ilk işlem beslenen atık miktarını arttırmaktır. Beslenen atık miktarı arttığında ortamda bulunan anaerobik mikroorganizma popülasyonu büyüme için gereken besini rahatça bulacaktır. Bu sayede reaktör içerisinde biyokütle konsantrasyonu artacak ve bu artış da metabolize edilen organik atık miktarını arttıracaktır. Bu koşullar sağlandığında reaktör işletilirken olması gereken optimum şartlar sağlanacak ve biyogaz üretimi verimi daha yüksek olacaktır (Şirin, 2022).

R₁ reaktörünün günlük olarak takip edilen sıcaklık değerleri ise Şekil 4.'te verilmiştir. Bu grafikten de görüldüğü gibi sıcaklık değerleri 5. günün sonunda 37 °C ± 0,5 °C değerine ulaşmıştır. Bu günden itibaren reaktörde görülen sıcaklık dalgalanmaları 0,5 °C değerini geçmemiştir.

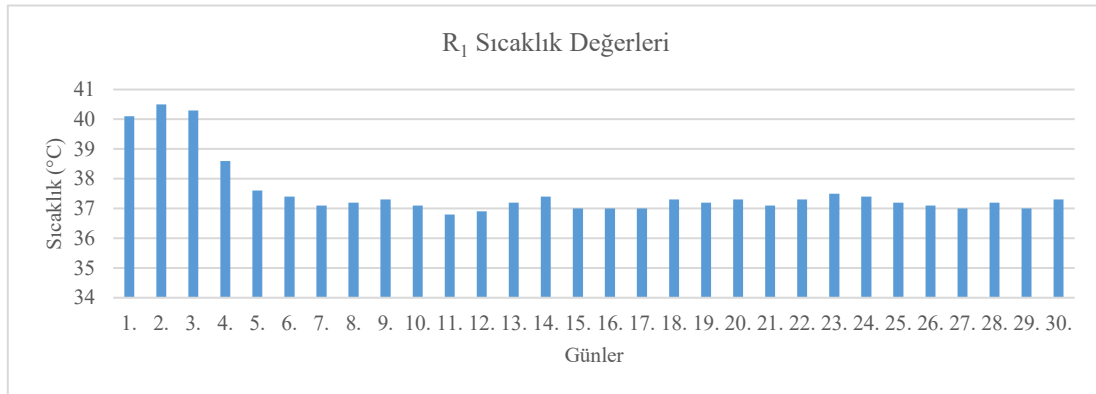
R₁ reaktörünün, 30 günlük HBS sonunda ürettiği toplam biyogaz miktarı; 1 kg VS cinsinden hesaplandığında yapılan oranlama sonucunda bu reaktörde üretilen toplam biyogaz miktarı 507,22 L / kg VS olarak hesaplanmıştır. Üretilen bu gazın metan içeriği % 71,3 olarak ölçülmüştür. Çalışma boyunca üretilen biyogazın elektrik enerjisi cinsinden değeri teorik olarak 2,38 kWh olarak hesaplanmıştır. Aynı reaktör için üretilen biyogazın ihtiva ettiği metan gazı miktarından yola çıkarak hesap yapılırsa üretililecek teorik elektrik enerjisi miktarı 5,07 kWh olarak hesaplanmıştır.

Ancak; elektrik enerjisi eldesinde biyogaz kullanıldığında, kojenerasyon işlemi sırasında yakılan biyogazın % 35 – 45 oranındaki kısmı elektrik enerjisine, % 40 – 45 oranındaki kısmı ise termal enerjiye çevrilmektedir. Bu çevrimde biyogazın enerji eldesinde verimini % 80 – 90 oranları arasına çıkarmaktadır (Anacak, 2012). Dolayısı ile R₁ reaktörü için üretilen biyogazın elektrik enerjisine çevrilecek kısmı 1 kg uçucu katı içeren atık kompozisyonu için 1,07 kWh olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3:

*R₁ reaktörünün günlük ürettiği biyogaz miktarları (mL) (OLR: 0,5 g VS/L*gün Karışım oranı: %40 M + %30 S + %30 İ, C/N: 28,43)*



Şekil 4:

R₁ reaktörünün sıcaklıkları (°C)

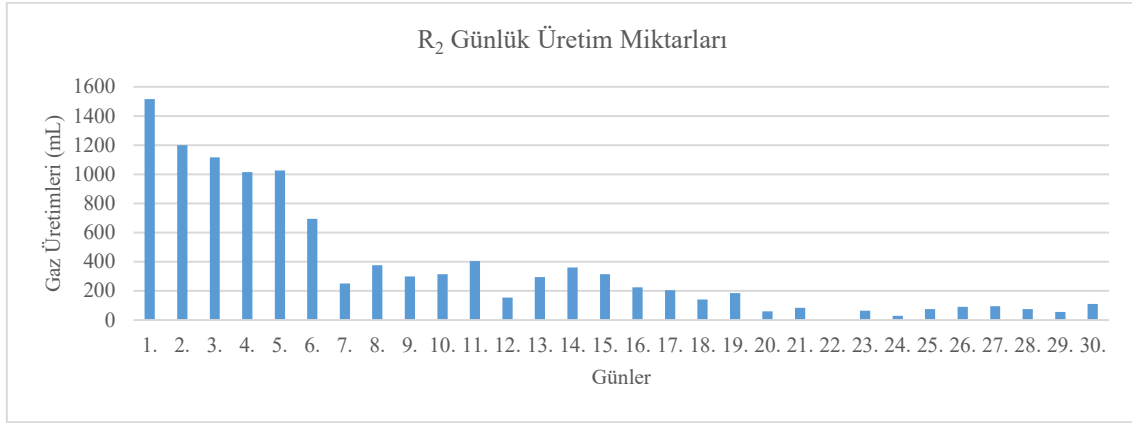
Çalışma kapsamında çalıştırılan R₂ reaktörü ise % 35 meyve atıkları, % 40 sebze atıkları ve % 25 inek gübresi içerecek bir karışım içermektedir. Bu reaktörde hazırlanan karışım reaktöre yüklenirken OLR değeri 0,6 kg VS/ L*gün olarak belirlenmiştir. Bu OLR değerinde reaktöre beslenmesi gereken katının uçucu katı miktarı 21,6 gr VS olarak hesaplanmıştır.

R₂ reaktörü için ise 30 günlük hidrolik bekletme süresi boyunca elde edilen biyogaz miktarı 16,83 L olarak belirlenmişti (Şekil 5). Aşının otolizi sebebiyle ürettiği gaz miktarı üretilen gaz miktarından düşüldüğünde reaktöre beslenen atık karışımının ürettiği gaz miktarı 1,16 L olarak hesaplanmıştır. Bu reaktörde üretilen gazın metan içeriği ise % 67,2 olarak belirlenmiştir (Tablo 3).

R₂ reaktörünün ilk FOS/TAC ölçümünde gözlenen değer 0,22 olarak kaydedilmiştir. Aynı reaktörde yapılan FOS/TAC ölçümünde değerın çalışmanın sonunda 0,013 değerine kadar düştüğü belirlenmiştir. Bu sonuç Tablo 1.'e göre değerlendirilirse reaktöre beslenen organik madde miktarı girişinin artırılması gerektiği sonucuna ulaşılabilir. Ancak işletilen R₁ reaktöründe de yakın miktarda organik atık olması ve R₁ reaktörünün 30 günlük hidrolik besleme süresi boyunca sorunsuz bir şekilde anaerobik fermantasyon işlemini sürdürmesi ve biyogaz üretimini literatüre uygun miktarda gerçekleştirmesi dikkate alındığında R₂ reaktörüne atık eklenmesi ile bu sorunun çözülemeyeceği sonucuna ulaşılmıştır. R₂ reaktörünün biyogaz üretimi performansının düşük olması sebebinin yüklenen atık miktarıyla ilgili olmadığı, daha ziyade R₂ reaktörün içerisindeki anaerobik fermantasyon prosesinin adımlarında meydana gelen problemlerle ilişkilendirilebileceği kanaati oluşmuştur. Anaerobik çürütücü içerisinde hidrolizi takiben asidojenik bakteriler tarafından kullanılan substratlar uçucu yağ asitlerine çevrilmektedir. R₂ reaktöründe FOS/TAC oranındaki bu ani gerilemenin sebebi olarak reaktörün içerisindeki asidojeniz fazında, asitleşmeyi gerçekleştirecek bakteri popülasyonunun inhibisyonuna uğramış olma ihtimali düşünülebilir. Dolayısıyla reaktöre beslenen atığın asitleşmesini gerçekleştirecek bakterilerin metabolizmalarının bozulması, anaerobik digestat içerisinde bu bakteriler tarafından salınacak hidrojen iyonlarının oluşmasını engellemiş ve metanojenik bakteri popülasyonunun metan üretmek için ihtiyaç duyduğu substrat olan hidrojen iyonu ve karbon dioksit ortamda olmadığı için metanojenik bakteriler metan üretimini gerçekleştirememişlerdir. Bu olası durumun tespitini Şekil 5'te verilen grafikte de görmek mümkündür. Çalışmanın on birinci günü ile yirmi ikinci günü arasında biyogaz üretimi günlük 500 mL değerini aşmamış ve de yirmi ikinci gününde R₂ reaktöründe biyogaz üretimi 0 mL olarak belirlenmiştir. Bu durum kesikli işletilen reaktörlerde pek görülmeyen bir durumdur. Çünkü kesikli işletilen reaktörlerde biyogaz üretimi başlangıçta yüksek olup çalışmanın sonralarına doğru azalan bir yönelim izlemektedir (Anacak, 2012). Bu andan sonra yani reaktörün işletildiği 22. günden sonra reaktörde biyogaz üretimi günlük 100 mL değerini aşmamış ve anaerobik fermantasyon işleminin mekanizmasında bir sorun yaşandığı ve bu sebeple biyogaz üretiminin gerçekleşmediği kanısına varılmıştır.

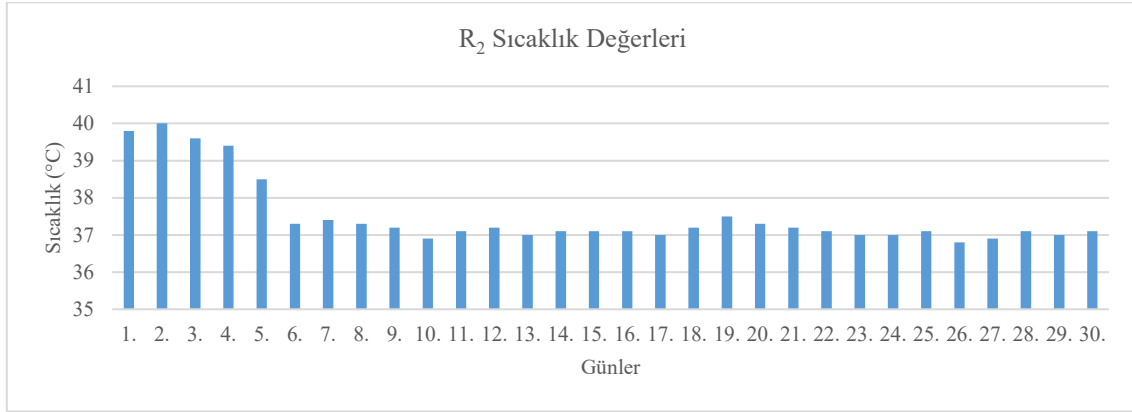
R₂ reaktörünün günlük olarak takip edilen sıcaklık değerleri Şekil 6'da sunulmuştur. Bu grafikten de görüldüğü gibi sıcaklık değerleri 5. günün sonunda 37 °C ± 0,5 °C değerine ulaşmış olup, çalışma süresince büyük salınımlar meydana gelmemiştir.

30 günlük hidrolik bekletme süresi sonunda R₂ reaktörünün ürettiği biyogazdan elde edilebilecek teorik elektrik enerjisi değeri 0,31 kWh olarak hesaplanmıştır. Bu reaktörde yaşanan sıkıntı gaz miktarının düşük olmasına sebep olduğundan kullanılan atıklardan elde edilebilecek elektrik enerjisi değeri gerçeği yansıtmamaktadır.



Şekil 5:

*R₂ reaktörünün günlük ürettiği biyogaz miktarları (mL) (OLR: 0,6 g VSL*gün, Karışın oranı: %35 M + %40 S + %25 İ, C/N: 26,62)*



Şekil 6:

R₂ reaktörü sıcaklıkları (°C)

Masebinu ve diğ., (2018) tarafından yapılan bir çalışmada, Güney Afrika'da meyve ve sebze satışı yapılan bir marketin enerjisini market atıklarından karşılaması amaçlanarak bir biyogaz elektrik üretim santralının fizibilitesi yapılmıştır. Çalışma boyunca FOS/TAC oranının 0,3 – 0,4 aralığında seyrettiği tespit edilmiştir. Çalışmada kullanılan meyve ve sebze atıklarının ürettiği biyogaz miktarı 0,87 m³/kg VS olarak ölçülmüş ve üretilen biyogazın % 57,58 oranında CH₄ gazı içerdiği belirlenmiştir. Üretilen gazın içindeki metan miktarı ise 0,4985 m³/kg VS olarak hesaplanmıştır. Çalışmada üretilen biyogazın içerdiği metan gazının spesifik enerji potansiyeli 5,5 kwh/m³ olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada elde edilen teorik enerji miktarı ile R₁ reaktörü sonuçlarının yaklaşık degerde olduğu görülmektedir. Yürütülen diğer bir benzer çalışmada (Muhammad ve Chandra, 2012) meyve ve sebze atıkları, hint sediri yaprakları ve inek gübresi biyogaz üretiminde kullanılmıştır. Çalışma 37 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Hidrolik bekleme süresi 30 gün olarak belirlenmiştir. Çalışma sonunda kullanılan materyalden elde edilen biyogaz miktarı ve maksimum metan içeriği ve miktarı sırasıyla; 0,388 m³/kg VS, % 64,2 ve 0,220 m³ CH₄/kg VS olarak ölçülmüştür. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre reaktörlerin ürettikleri elektrik enerjileri 1,82 -1,03 kWh olarak belirlenmiş olup, R₁ reaktörünün sonuçları ile benzer olduğu tespit edilmiştir.

4. SONUÇLAR

Çalışmada elde edilen sonuçlar, meyve ve sebze atıkları ile inek gübresinden anaerobik kofermantasyon yoluyla üretilen biyogazın, elektrik enerjisi üretiminde kullanılabileceğini göstermiştir. Organik yükleme oranının 0,5 g VS/L.gün ve C/N oranının 28,43 olduğu şartlarda, 37 °C’de 30 gün süresince gerçekleştirilen anaerobik kofermantasyon ile %40 meyve atıkları %30 sebze atıkları ve % 30 inek gübresi karışımından üretilen biyogazın elektrik enerjisi eşdeğeri 2,38 kWh olarak hesaplanmıştır. Yürütülen çalışma tarım ve hayvancılık atıklarının alternatif enerji kaynağı olarak kullanımının mümkün olduğunu ve bu atıkların sürdürülebilir bir kaynak olarak değerlendirilebileceğini göstermiştir. Çalışmada kullanılan her atık grubunda da yıllık bazda açığa çıkan miktar oldukça fazla olduğundan Türkiye’nin biyogazdan elektrik enerjisi üretmek için oldukça iyi bir potansiyelinin olduğu görülmektedir.

Atıktan enerjiye yaklaşımı, enerjide ithalat modelini değiştirmek için çok verimli bir alternatif yöntem sunmakta olup ülke ekonomisine şüphesiz ki büyük katkıda bulunacaktır. Ayrıca bu enerji tesislerinin kurulması buldukları bölgelerde istihdam imkanları oluşturacaktır. Aynı zamanda kullanılan enerji ham maddesinin zararlı organik atıklar olduğu göz önüne alındığında, büyük oranlardaki bu atıkların gerekli şekilde bertaraf edilmediği durumlarda meydana çıkacak olan çevre ve halk sağlığı riskleri de bu kullanımla ortadan kalkacaktır. Elektrik enerjisi üretiminden sonra reaktörler içerisinde kalan materyal birinci sınıf toprak şartlandırıcı/gübre olarak kullanılabileceğinden tarım üretimlerinde maliyetleri düşürmeye yardımcı olabileceği de dikkate alınmalıdır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKISI

Bu çalışmada Rutkay KAPTAN, literatür taraması, deneysel çalışma sürecinin sürdürülmesi, sonuçların incelenmesi çalışmanın yürütülmesi ve çalışma yönetimi başlıklarında; F. Olcaç TOPAÇ, literatür taraması, deneysel çalışma sürecinin sürdürülmesi, sonuçların incelenmesi, çalışmanın yürütülmesi ve çalışma yönetimi başlıklarında katkı sunmuşlardır.

KAYNAKLAR

1. Alkan U. (2013) Anaerobik Arıtım Ders Notları, Bursa Uludağ Üniversitesi, Bursa.
2. Alvarez R., Liden G. (2008) Semi-continuous co-digestion of solid slaughterhouse waste, manure, and fruit and vegetable waste. *Renewable Energy* 33 (2008) 726–734. doi:10.1016/j.renene.2007.05.001.
3. Anonim, 2019.
4. Anonim, 2020.
5. Anacak, S. (2012). Hayvan çiftliklerinden kaynaklanan atıkların anaerobik arıtımı, Yüksek Lisans Tezi, B.U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
6. APHA, AWWA and WPCF (2023) Standard methods for the examination of water and waste water, Washington D.C.
7. Ayhan, A. (2013). Farklı karışım oranlarındaki sığır gübresi ve mısır silajından mezofilik fermentasyonla üretilebilecek biyogaz miktarlarının belirlenmesi üzerine bir araştırma, Doktora Tezi, B.U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
8. Baran, M. F., Lüle, F. ve Gökdoğan, O. (2017) Adıyaman İlinin Hayvansal Atıklardan Elde Edilebilecek Enerji Potansiyeli Energy Potential Can Be Produced by Animal Waste of Adıyaman Province. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 4(3), 245–249.
9. Büyükmihci, M. Kemal. (2003) Yenilenebilir Enerji Kaynakları Avrupa Birliği Ülkelerindeki Uygulamalar ve Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Tarafından Hazırlanmakta Olan Kanun

- Tasarısı Taslağı Çerçevesinde Planlanan Önlemler, Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, TMMOB, 3-4 Ekim Kayseri, ss.15-22.
10. Cornell Compositng Science & Engineering (1996). C/N Ratio. Erişim Adresi: https://compost.css.cornell.edu/calc/cn_ratio.html (Erişim Tarihi: 15.04.2022).
 11. Çelen, B. (2021) Turkish national environmental strategy and action plan: agricultural sector practices and current status. *Ejons International Journal*, 5(19): 474–501.
 12. Çukurçayır M. A., Sağır H. (2008) Enerji Sorunu, Çevre Ve Alternatif Enerji Kaynakları, Selçuk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Konya.
 13. Demir Yetiş, A., Gazigil, L., Yetiş, R., Çelikezen, B. (2018) Hayvansal atık kaynaklı biyogaz potansiyeli: bitlis örneği, *Academic Platform Journal of Engineering and Science* 7-1, 74-78, 10.21541-apjes.405308-599036.
 14. Deressa, L., Libsu, S., Chavan, R.B., Manaye, D., Dabassa, A. (2015) Production of Biogas from Fruit and Vegetable Wastes Mixed with Different Wastes, *Environment and Ecology Research* 3(3): 65-71, 2015 DOI: 10.13189/eer.2015.030303.
 15. Faostat, World Food And Agriculture (2023) Statistical Yearbook, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome 2023.
 16. Gümüş, B., ve Buluş, A. (2020) Uluslararası çevre sorunları ve William Nordhaus'un çevre ekonomisine katkıları. *Alanya Akademik Bakış*, 4(3): 1015-1031.
 17. Gümüşçü M., Uyanık S., (2010) Güneydoğu Anadolu Bölgesi Hayvansal Atıklarından Biyogaz ve Biyogübre Eldesi. *Tesisat Mühendisliği (MMO)*, 16 (118), 59-65.
 18. Güneş, E. ve Karakaş, T. (2022) Tarım ve gıda sistemlerinde sürdürülebilirlik yaklaşımları. *Journal of Academic Value Studies*, 8(3): 304-316.
 19. Masebinu, S. O., Akinlabi, E. T., Muzenda, E., Aboyade, A. O., Mbohwa, C. (2018) Experimental and feasibility assessment of biogas production by anaerobic digestion of fruit and vegetable waste from Joburg Market. *Waste Management*, 75, 236–250, doi:10.1016/j.wasman.2018.02.011.
 20. Muhammad, M. B., Chandra, R. (2022) Turning neem leaves anti-microbial substrate to methane-producing co-substrate for the generation of clean and affordable electricity through biogas: A case study. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 52 (2022) 101982, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.101982>
 21. Özer, B. (2017) Biogas energy opportunity of Ardahan city of Turkey. *Energy* 139 (2017) 1144 - 1152. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.052>.
 22. Pavi S., Kramer, L. E., Gomes, L. P., Miranda, L. A. S., (2017) Biogas production from co-digestion of organic fraction of municipal solid waste and fruit and vegetable waste. *Bioresour Technol* 2017;228:362–7. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.01.003>.
 23. Pradeshwaran, v., Chen. W. H., Saravanakumar, A., Suriyaprakash, R., Selvarajoo, A. (2024) Biocatalyst enhanced biogas production from food and fruit waste through anaerobic digestion, *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, Volume 55, January 2024, 102975, <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102975>.
 24. Smil, V. (1999) Crop Residues: Agriculture's Largest Harvest: Crop residues incorporate more than half of the world's agricultural phytomass, *Bioscience* 1999.4.1 49/4 Pages 299-308, <https://doi.org/10.2307/1313613>.
 25. Şirin, E. (2022). Şeker pancarından biyoetanol üretimi aşamasında ortaya çıkan şilempenin biyogaz üretimine etkisinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
 26. Tengiz, M. Z., Ayyıldız, B., (2022) Türkiye'de Tarım Ve Enerji Tüketiminin Agro-Ekolojik Ekonomik Kriterler İle Değerlendirilmesi, International Conference on Global Practice of Multidisciplinary Scientific Studies-III Turkish Republic of Northern Cyprus, November 15-17, 2022. <https://www.researchgate.net/publication/367157388>. (Erişim Tarihi: 20.01.2024).

27. Tinmaz, K. E. (2017) Trakya bölgesinde hayvan gübrelerinin biyogaz enerji potansiyelinin belirlenmesi ve sayısal haritaların oluşturulması. Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 23(6), 762–772. doi:10.5505/pajes.2016.33600.
28. Türkmenler, H., Varınca, K., Can, R. 2014. Biyogaz Çalıştayı Sonuç Raporu, Adıyaman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü, Erişim linki: http://cevre.adiyaman.edu.tr/Files/cevre/etkinlikler/20140603_Biyogaz_Calistayi/ADYU_Biyogaz_Calistay_Sonuc_Raporu.pdf, (Erişim Tarihi: 18.08.2023).
29. Vats, N., Khan, A. A., Ahmad, K. (2019) Effect of substrate ratio on biogas yield for anaerobic co-digestion of fruit vegetable waste & sugarcane bagasse, Environmental Technology & Innovation Volume 13, February 2019, Pages 331-339. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.01.003>.
30. Voß, E., Weichgrebe, D., Rosenwinkel K. H., (2009) FOS/TAC: Herleitung, Methodik, Anwendung und Aussagekraft. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Internationale Wissenschaftstagung Biogas Science Band 3 (2009). ISSN 1611-4159.
31. Zareei, S., Khodaei, J. (2017) Modeling and optimization of biogas production from cow manure and maize straw using an adaptive neuro-fuzzy inference system, Renewable Energy Volume 114, Part B, December 2017, Pages 423-427, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.07.050>.

