Anatolia Science and Technology Journal (ASTEJ)

ASTEJ, 2025, 2(1)
DOI: 10.5281/zenodo.17427161
Araştırma Makalesi/ Research Article

Piston Akımlı Anaerobik Biyoreaktörde Sığır Gübresi ve Gıda Atıklarının Birlikte Sindiriminin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

Fatih Şevki ERKUŞ[1*], Şima VAROL[1]
[1]Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Van-Türkiye

Özet

Anaerobik sindirim, biyokütleyi doğal olarak biyogaza dönüştüren ve aksi takdirde depolama alanlarına gömülmesi veya yakılması gereken atıkları azaltan biyolojik bir süreçtir. En yaygın kullanılan biyoreaktör tipleri, sürekli karıştırmalı tank reaktörler ve piston akımlı reaktörlerdir. Piston akımlı reaktörler, tarımsal biyogaz tesislerinin tasarımında basitlikleri, ekonomik olmaları ve maliyet etkinlikleri nedeniyle tercih edilmektedir. Geleneksel olarak, gübrenin anaerobik sindirilmesi çiftliklerde uygulanmakta olsa da, tarımsal biyogaz tesislerinde sınırlı enerji üretimi, yaygınlaşmasını engellemektedir. Benzer şekilde, sığır gübresi gibi, gıda atıkları da yeterince değerlendirilememekte ve genellikle çöp sahalarına gömülmektedir. Bu çalışma, sığır gübresi ve kampüs kaynaklı gıda atıklarının anaerobik birlikte sindirimi yoluyla biyogaz üretiminin çevresel etkilerini değerlendirmek amacıyla karşılaştırmalı yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) uygulamaktadır. Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi'nde bulunan pilot ölçekli piston akımlı biyoreaktör (PAR) verileri kullanılarak, iki biyogaz senaryosu analiz edilmiştir: (i) sığır gübresinin tekli sindirimi ve (ii) gıda atıkları ile birlikte sindirim. YDD sonuçları, birlikte sindirim senaryosunun küresel ısınma etkisini yaklaşık %60 oranında azalttığını göstermiştir. Çevresel etkideki bu iyileşme, büyük ölçüde gıda atıklarının düzenli depolamaya gönderilmemesi sayesinde sağlanan çevresel metan emisyonu kredilerinden kaynaklanmaktadır. Analizlerde, biyogazla üretilen 1 MJ enerjiye düşen çevresel etkilerin özellikle sindirim çamurunun açıkta depolanması kaynaklı olduğu görülmüştür. Birlikte sindirim, asidifikasyon ve kötü kokulu hava etkileri dışında değerlendirilen tüm kategorilerde daha üstün çevresel performans sergilemiştir. Bu bağlamda, sindirim çamurunun kapalı sistemlerde depolanması ve araziye uygulama süreçlerinin iyileştirilmesi önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Anaerobik sindirim, emisyon kredileri, piston akımlı reaktör, sindirim çamuru, yaşam döngüsü değerlendirmesi.

A Life Cycle Assessment of Co-Digestion of Cattle Manure and Food Waste in a Plug-Flow Anaerobic Digester

Fatih Şevki ERKUŞ[1*], Şima VAROL[1]
[1]Van Yuzuncu Yil University, Faculty of Agriculture, Department of Biosystems Engineering, Van-Türkiye

Abstract

Anaerobic digestion (AD) is a biological process that naturally converts biomass into biogas while reducing waste requiring landfill disposal or incineration. Commonly used digester types include continuously stirred tank reactors and plug flow reactors; the latter are favored in agricultural biogas facilities due to their simplicity, cost-effectiveness, and efficiency. While traditionally practiced on farms for manure management, wider adoption of agricultural AD has been limited by relatively low energy production. Similarly, food waste—such as cattle manure—is often underutilized and sent to landfills. This study employs a comparative Life Cycle Assessment (LCA) to evaluate the environmental impacts of biogas production through co-digestion of cattle manure and food waste sourced from a university campus. Data were collected from a pilot-scale plug flow reactor located at Van Yuzuncü Yil University, analyzing two scenarios: (i) mono-digestion of cattle manure and (ii) co-digestion with food waste. LCA results demonstrate that the co-digestion scenario reduced global warming potential by approximately 60%, largely due to avoided methane emissions from landfilling food waste. Environmental impacts per MJ of energy produced were primarily associated with open storage of digestate. Co-digestion demonstrated superior environmental performance across all assessed categories except for acidification and malodorous air potential; therefore, improved management practices such as enclosed digestate storage and optimized land application are recommended.

Keywords: Anaerobic digestion, digestate, emission credits, life cycle assessment, plug flow reactor.

* Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: Fatih Şevki ERKUŞ, e-posta: fatiherkus@yyu.edu.tr, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8541-7048
** Yazar/ Author: Şima VAROL, e-posta: simavarol1@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0009-0003-4949-5307
*** Bu çalışma, 9. Uluslararası Küresel Disiplinlerarası Bilimsel Çalışmalar Uygulamaları Konferansı'nda (Havana, Küba 2025) sunulmuştur.
****Geliş/Received: 25/04/2025, Düzeltme/Revised: 12/05/2025, Kabul/Accepted: 14/05/2025, Yayınlanma/Published: 24/10/2025.

1. Giriş

İklim değişikliğiyle mücadele kapsamında, uluslararası sözleşmeler doğrultusunda hükümetler, yenilenebilir enerji üretimini artırma ve sera gazı emisyonlarını azaltma yönünde artan baskı altındadır. Türkiye'de yıllık yaklaşık 32 milyon ton atığın %34'ü gıda atıklarından oluşmakta ve bu atıkların büyük bölümü düzenli depolama sahalarında bertaraf edilmektedir (Bilgili & Çetinkaya, 2023). Bu durum, hem sera gazı emisyonlarının artmasına hem de organik atıkların geri kazanım potansiyelinin göz ardı edilmesine neden olmaktadır. Atık yönetimi uygulamalarında en son tercih edilecek yöntem olarak kabul edilen düzenli depolama, organik atıkların geri dönüşüm potansiyelini değerlendirememesi, toprak ve su kirliliğine neden olması ve sera gazı emisyonlarını artırması gibi olumsuzluklara rağmen, özellikle gelişmekte olan ülkelerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Masalegooyan ve ark., 2022). Mevcut biyolojik arıtma yöntemleri arasında, anaerobik sindirim, biyokütle, katı atık ve arıtma çamuru gibi organik maddeleri dönüştüren gelişmiş ve yaygın olarak kullanılan bir teknoloji sunmaktadır. Anaerobik sindirim, organik maddelerin anaerobik koşullar altında metabolik bozunma ve stabilizasyonunu içeren bir dizi süreçten oluşur. Bu süreçler hidroliz, asidojenez, asetojenez ve metanojenez aşamalarını kapsayarak yenilenebilir bir enerji kaynağı olan biyogazın (büyük oranda metan ve karbondioksit içeren karışım) oluşumuna yol açar (Longis ve ark., 2023). Bu süreçler sonucunda; yaklaşık %60 metan içeren ve sera gazı emisyon dengesi sıfır olan temiz enerji kaynağı elde edilir. Anaerobik sindirimde biyogaza ek olarak gübre üretiminden kaynaklanan sera gazı emisyonlarını azaltarak toprak iyileştirici olarak değerlendirilebilen ve bitki besin elementleri açısından zengin anaerobik sindirim son ürünü olan sindirim çamuru elde edilmektedir (Shoshaa ve ark., 2024).

Tarım işletmelerinde faaliyet gösteren biyogaz tesislerinin yüksek yatırım maliyetleri ve düşük ekonomik verimliliği, biyogaz sektörü gelişiminin önündeki başlıca engellerden biridir (Kusz ve ark., 2024). Anaerobik sindirim sistemleri, atığın türüne ve işletme koşullarına bağlı olarak farklı reaktör tasarımlarına sahiptir. Tam karışımlı tank reaktörler, sıvı atıklar için uygunken; piston akımlı reaktörler yüksek katı madde içeriği olan atıklar için tercih edilir. Piston Akımlı Reaktörler, sürekli karıştırmalı tank reaktörlere kıyasla daha düşük ilk yatırım maliyeti ve enerji gereksinimiyle ekonomik açıdan avantajlı bir alternatif sunmaktadır (Shoshaa ve ark., 2024). Diğer anaerobik reaktör türleriyle karşılaştırıldığında, PAR'lar, içyapılarında daha az hareketli parça bulunması nedeniyle genellikle daha basit bir işletim sürecine sahiptir. Ayrıca, PAR'ların başlatma süreci genellikle diğer reaktör konfigürasyonlarına göre daha kısa sürede tamamlanmakta ve düşük maliyetli, inşası kolay yapıları sayesinde, özellikle çiftçilerin yaşam standartlarını iyileştirmeye yönelik uygun bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır (Dong ve ark., 2019).

Sığır gübresi, anaerobik sindirim sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bir substrat olmasına rağmen, düşük karbon/azot (C/N) oranı ve sınırlı biyolojik parçalanabilirliği nedeniyle düşük biyogaz verimi ile sonuçlanmaktadır (Tan ve ark., 2021). Bu duruma çözüm olarak, gıda atıkları ve hayvansal gübrenin birlikte anaerobik sindirimi, çevresel sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği açısından umut vadeden bir strateji olarak öne çıkmaktadır (Peng ve ark., 2020). Gıda atıkları, yüksek organik madde ve besin içeriği sayesinde hızla ayrışarak metan üretimini artırırken, çiftlik gübreleri yüksek tamponlama kapasiteleriyle sindirim sürecini stabilize etmektedir (Leung & Wang, 2016). Bu tamamlayıcı özellikler, birlikte sindirim sistemlerinde sinerjik etkiler yaratarak biyogaz verimini ve proses stabilitesini önemli ölçüde artırmaktadır. Ayrıca, gıda atıklarının anaerobik sindirim yoluyla değerlendirilmesi, düzenli depolama ve arazi uygulaması gibi geleneksel yöntemlere getirilen düzenleyici kısıtlamalara da alternatif oluşturmaktadır (Ebner ve ark., 2015). Tarımsal biyogaz tesisleri, teknik potansiyel açısından önemli fırsatlar sunmakla birlikte, tarımsal atıkların düşük C/N oranı ve kompleks lignoselülozik yapısı nedeniyle mikrobiyal kullanılabilirliği sınırlıdır (Hagos ve ark., 2017). Bu nedenle, özellikle gıda atıkları gibi biyolojik olarak daha kolay parçalanabilen substratların eklenmesi, sistemin genel verimliliğini artırmakta ve ekonomik sürdürülebilirliği desteklemektedir (Ankathi ve ark., 2024).

Literatürde yapılan çok sayıda YDD çalışması, hayvansal gübre ve gıda atıklarının birlikte anaerobik sindiriminin, yalnızca gübreye dayalı tekli sindirim sistemlerine kıyasla daha yüksek biyogaz verimi sağladığını ve sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde azalttığını göstermektedir (Ebner ve ark., 2015). YDD metodolojileri, ürün veya süreçlerin yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerini ve maliyetlerini analiz ederek, sürdürülebilir atık yönetimi stratejilerinin geliştirilmesine bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır (Slorach ve ark., 2019).

Zhang ve ark. (2021), tarafından yürütülen çalışmada, domuz gübresi ile çim silajının birlikte sindirimi, 11 çevresel etki kategorisinin 9'unda en iyi çevresel performansı göstermiş; küresel ısınma potansiyelinde %48 oranında azalma ve enerji geri kazanımında %226 artış sağladığı gösterilmiştir. Benzer şekilde, Tan ve ark. (2022), tarafından Malezya'daki varsayımsal bir biyogaz tesisinde gerçekleştirilen LCA çalışmasında, sığır gübresi ile yem atığı, kanalizasyon çamuru ve iade süt ürünlerinin birlikte sindirimi, küresel ısınma, asidifikasyon ve ötrofikasyon kategorilerinde en iyi çevresel sonucu vermiştir.

Pehme ve ark. (2017), ise sığır gübresi ile enerji bitkisi ve doğal çimlerin birlikte sindirimini karşılaştırmış; birlikte sindirim senaryosunun, tekli sindirim ile kıyaslandığında küresel ısınmada %41, fosfor bazlı ötrofikasyonda ise 2 kat iyileşme sağladığını göstermiştir. Bu sonuçlar, enerji verimliliği ve çevresel etki azaltımı açısından birlikte sindirimin daha sürdürülebilir bir seçenek olduğunu ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi'nde bulunan pilot ölçekli piston akımlı reaktörde gerçekleştirilen tekli ve birlikte sindirim senaryolarının yaşam döngüsü değerlendirmesi yapılarak, gıda atıklarının yardımcı substrat olarak kullanılması durumunda elde edilecek çevresel kazanımlar sunulmuştur. Karşılaştırmalı analiz kapsamında çalışmada iki senaryo değerlendirilmiştir: (i) tekli sığır gübresi sindirimi ve (ii) sığır gübresi ile kampüs gıda atıklarının birlikte sindirimi. Bu analiz, mevcut çiftlik ölçekli biyogaz tesislerinde sürdürülebilir atık yönetimi ve enerji üretimi için öneriler sunmayı hedeflemektedir.

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada, hayvancılık sektöründe pilot çiftlik ölçekli piston akımlı biyoreaktörde birlikte sindirim sistemlerinin çevresel etkileri, geleneksel tekli sindirim gübre ve gıda atığı yönetim uygulamalarıyla karşılaştırılmıştır. Bu çalışma, biyokütle yönetimi karar verme süreçlerini desteklemek için en uygun yöntem olarak kabul edilen karşılaştırmalı YDD yaklaşımıyla gerçekleştirilmiştir (Xiao ve ark., 2022; Hossain ve ark., 2023). Bu çalışmada uygulanan YDD çerçevesi ve ilkeleri, ISO-14040 standardına (ISO14040, 2006) dayanmaktadır. Değerlendirme süreci, Open LCA 2.4.0 YDD yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gıda atıkları ve sığır gübresi yönetimi sırasında ortaya çıkan CO_2 emisyonları biyojenik kökenli olarak değerlendirilmiş, IPCC (2019) rehberine göre küresel ısınma potansiyeli hesaplamalarına dâhil edilmemiştir. Geleneksel tekli sindirim ile birlikte sindirim sistemlerinin karşılaştırmalı kıyaslanması amacıyla tüm girdi ve çıktı akışlarının normalize edildiği fonksiyonel birim, biyogaz tesisinde üretilen 1 MJ biyogaz enerjisi üretimi olarak tanımlanmıştır.

2.1. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Çalışmasının Amaç ve Kapsamı

Çalışmada sindirim senaryolarının oluşturulmasında, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Uygulama Çiftliği bünyesinde kurulu bulunan 78 m^3 hacmindeki pilot ölçekli PAR tasarım parametreleri temel alınmıştır. Biyogaz tesisi, mevcut durumda 50 büyükbaş hayvan kapasiteli ahırlardan toplanan gübrelerin besleme tankına aktarılması, katı madde oranının ayarlanması ve mekanik karıştırıcı ile homojenleştirilmesi yoluyla işletilmektedir. Islak hacmi 67,5 m^3 olan biyoreaktöre organik atık beslemesi ve geri devir işlemi, eksantrik vidalı pompa aracılığıyla sağlanmaktadır. Hem tekli hem de birlikte sindirim senaryolarında, %10 toplam katı madde içeriğine ayarlanmış substratlar kullanılarak, 37–40 °C sıcaklık aralığında ve 30 günlük hidrolik bekleme süresi işletme koşulları uygulanmıştır.

Bu çalışmada ele alınan her iki senaryo için ortak bir sistem tanımı yapılmıştır. Çalışma, hayvansal atıkların ana giriş substratı olarak kullanıldığı ve çiftlikte mevcut olduğu varsayılan, beşikten-kapıya yaklaşımını temel alan bir sistem sınırını esas almaktadır. Sistem, biyogazın enerji amaçlı kullanılabilir hale gelmesiyle son bulmakta; anaerobik sindirim sonucu oluşan sindirim çamuru ise araziye uygulanana kadar açık depolama havuzlarında muhafaza edilmektedir. Genel uygulamada sindirim çamuru, ekimden önce yılda bir kez toprağa uygulanmaktadır (Korba ve ark., 2024). Toprağa uygulama öncesi sindirim çamuru çiftlikte açık beton havuzlarda depolandığından karşılaştırmalı YDD çalışmalarında atık olarak değerlendirilmektedir (Hossain ve ark., 2023). Pilot biyogaz tesisi ile gıda atığı kaynaklarının aynı kampüs alanında bulunması ve taşıma emisyonlarının toplam emisyonlara katkısının %1'in altında kalması nedeniyle, substrat taşımaya ilişkin çevresel etkiler ihmal edilebilir düzeyde kabul edilmiştir (Chen ve ark., 2015). Tekli sindirim ve birlikte sindirim sistem sınırları Şekil 1'de özetlenmiştir.

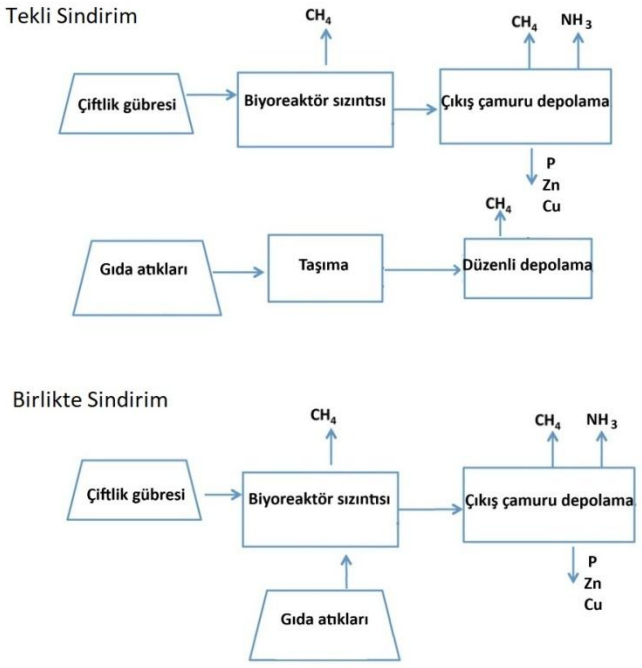
Bu çalışmada sığır gübresi, çevresel kirliliğin önlenmesi ve yenilenebilir enerji üretimi amacıyla ana substrat olarak değerlendirilmiştir. Birlikte sindirim senaryosu kapsamında ise, kolay erişilebilirliği ve mevcut atık yönetimi sistemlerinde etkin şekilde değerlendirilememesi nedeniyle gıda atıkları, ek substrat olarak seçilmiştir. PAR anaerobik sindirim süreçlerinde kullanılan ve substrat karışım oranlarını belirleyen her bir substratın biyokimyasal bileşimi Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. PAR biyoreaktörleri sindirim senaryolarında referans alınan subtrat biyokimyasal bileşimi
Table 1. *Reference substrate biochemical composition in PAR bioreactor digestion scenarios*

	Birim	Sığır gübresi	Gıda atığı	Sığır gübresi + Gıda atığı karışımı
Kül	% (TKM)	13,8	28,00	20,62
Uçucu Katılar	% TKM	79,71	86,07	82,76
P	g/kgTS	8,38	4,83	6,676
Zn	g/kgTS	0,280	0,060	0,174
Cu	g/kgTS	0,110	0,010	0,062
Karışım oranı	-	-	-	52:48

Tüm değerler El-Mashad ve Zhang (2010) çalışmasından alınmıştır. All properties taken from El-Mashad and Zhang (2010).

Mezofilik sindirim süreci sonucunda elde edilen biyogazın bileşimi, tekli sindirim için %66 CH_4 ve %33 CO_2 içeriğiyle 366 L/kg UKMeklenen biyogaz verimi ve birlikte sindirim için %59 CH_4 ve %40 CO_2 içeriğiyle 531 L/kg UKMeklenen biyogaz verimi olarak alınmıştır (El-Mashad & Zang, 2010). Elde edilen biyogazın yoğunluğu 1,15 kg/Nm³ ve alt ısıl değeri tekli sindirim için 20,85 MJ/kg ve birlikte sindirim için 17,30 MJ/kg olarak hesaplanmıştır (Linstrom, 2021). Biyogaz tesisinin anaerobik sindirim sürecinden kaynaklanan metan kayıpları, üretilen toplam metan veriminin %10'u; sindirim çamurunun açık depolanması sırasındaki kayıplar ise toplam biyogaz veriminin %9,2'si olarak kabul edilmiştir (Hossain ve ark., 2023).



Şekil 1. Anaerobik sindirim senaryoları sistem sınırları.
Figure 1. *System boundaries of anaerobic digestion scenarios.*

Birlikte sindirim senaryosunda, düzenli depolama sahasına gönderilmesi önlenen gıda atıkları çevresel kredi olarak değerlendirilmiş; buna karşılık, hava, su ve toprak ortamlarına salınan emisyonlar ise çevresel yük olarak ele alınmıştır. Ayrıca, biyojenik kökenli CO_2 emisyonları değerlendirme kapsamına alınmamıştır; zira gübrede bulunan karbonun, sığırların beslenmesinde kullanılan bitkiler tarafından atmosferden alındığı varsayılmaktadır. Çıkış ürünü olan sindirim çamuru ile ham gübrenin ise açık depolama havuzlarında bekletildiği ve ardından sonbahar döneminde yüzeysel arazi uygulaması yoluyla bertaraf edildiği varsayılmıştır (Aguirre-Villegas ve ark., 2019).

Birlikte sindirim sürecinde kullanılan gıda atıklarının düzenli depolamaya yönlendirilmediği varsayılmakta ve bu sayede söz konusu atıkların bertarafı sırasında oluşacak CH_4 kaynaklı sera gazı emisyonlarının önlendiği kabul edilmektedir. Bu durum, birlikte sindirim senaryolarının iklim değişikliği üzerindeki etkilerini dengeleyen çevresel krediler sağlamaktadır. Gıda atıklarının düzenli depolanmasından kaynaklanan önlenmiş metan emisyonu, IPCC yöntemleri temel alınarak hesaplanmıştır (Eggleston ve ark., 2006).

2.2. Yaşam Döngüsü Envanteri

Bu çalışmada, yaşam döngüsü etki değerlendirmesi yöntemi olarak CML2001 IA baseline yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yaklaşım, özellikle anaerobik sindirim tesislerinin çevresel performansını değerlendirmek amacıyla literatürde yaygın olarak tercih edilen ve geçerliliği yüksek bir yöntemdir (Jiang ve ark., 2021; Tan ve ark., 2022; Zhang ve ark., 2021). Küresel ısınma, asidifikasyon, ötrofikasyon, karasal ekotoksisite ve kötü kokulu hava oluşum potansiyelleri olmak üzere beş yaygın kullanılan etki kategorisi bu süreçte karakterizasyon, normalizasyon ve ağırlıklandırma adımları gerçekleştirilmiştir (Guinée ve ark., 2002). Her bir etki kategorisini karakterize etmek için eşdeğerlik faktörleri kullanılmıştır. Bu faktörler, küresel ısınma için CO_2 eşdeğerleri, asidifikasyon için SO_2 eşdeğerleri, ötrofikasyon için fosfat eşdeğerleri, karasal ekotoksisite için 1,4-diklorobenzen (DCB) eşdeğerleri şeklindedir (Hossain ve ark., 2023). Veri eksikliği durumlarında, ilgili bölgeye özgü bilgiler ile literatürde yer alan raporlar ve akademik yayınlardan elde edilen varsayımlar temel alınmıştır. Yaşam döngüsü envanteri kapsamında analiz edilen süreçlere ilişkin girdi ve çıktı verileri ile her bir alt sistemin toplam emisyon değerleri detaylı şekilde Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Tekli sindirim ve birlikte sindirim senaryoları için Yaşam Döngüsü Envanteri
Table 2. *Life Cycle Inventory for single digestion and co-digestion scenarios*

PAR besleme: 225 kg TKM/gün		**Tekli sindirim**	**Birlikte sindirim**	**Kaynaklar**
Parametre	Birim	SG	SG+GA	
UKM	kg/gün	179,35	186,21	
Biyogaz verimi (30 gün)	L/kg $UKM_{eklenen}$	366	531	El-Mashad ve ark., 2010
BMP (30 gün)	L/kg $UKM_{eklenen}$	241	311	
pH		6,9	7,2	
UKM giderimi	%	45	68	
Toplam Katı Madde	kg/MJ	0,1429	0,1144	
Biyogaz yoğunluğu	kg/m^3	1,15	1,15	
Metan, biyojenik	v/v	0,66	0,59	
Karbondioksit, biyojenik	v/v	0,33	0,40	
Amonyak	v/v	0,00943	0,00919	Hossain ve ark., 2023
Hidrojen sülfür	v/v	0,00057	0,00081	
Biyogaz alt ısıl değeri	MJ/kg	20,85	17,30	Linstrom, 2021

Toplam biyogaz	kg/MJ	0,04796	0,05780	
Biyoreaktör sızıntısı	Üretilen biyogazın %10'u			Hossain ve ark., 2023
CH_4	kg/MJ	0,003165	0,003410	
CO_2	kg/MJ	0,001583	0,002310	
NH_3	kg/MJ	0,000045	0,000053	
H_2S	kg/MJ	0,000003	0,000005	
Sindirim çamuru	kg/MJ	0,0950	0,0566	
Sindirim çamuru açık depolama	Üretilen biyogazın %9,2'si			Hossain ve ark., 2023
CH_4	kg/MJ	0,00291	0,00314	
NH_3	kg/MJ	0,00004	0,0000488	
Fosfor, P	kg/MJ	0,001197	0,000378	
Çinko, Zn	kg/MJ	0,0000400	0,00000984	
Bakır, Cu	kg/MJ	0,0000157	0,00000351	
Toplam düzenli depolama emisyonları	t CO_2-e/t		4,532	IPCC Tier 1
Düzenli depolama sahasına yönlendirilmesi önlenen gıda atıkları	kg/MJ		0,0549	
Düzenli depolama sahasına yönlendirilmesi engellenen gıda atıklarının iklim değişikliği üzerindeki etkisi	CO_2-e/MJ		0,249	

3. Bulgular ve Tartışma

Sığır gübresinin gıda atıkları ile birlikte sindirimi sonucu elde edilen biyogaz verimi, yalnızca sığır gübresine dayalı tekli sindirim yöntemine kıyasla yaklaşık %29 oranında daha fazladır (Tablo 1). Bu artış, sistemin enerji geri kazanım kapasitesini doğrudan artırmakta ve süreç verimliliğini iyileştirmektedir. Enerji verimliliği ve proses ekonomisi açısından değerlendirildiğinde, bu sonuçlar birlikte sindirim uygulamalarının tekli sindirim yöntemine göre daha sürdürülebilir ve ekonomik açıdan daha uygulanabilir bir alternatif sunmaktadır (Angelidaki & Ellegaard, 2003).

Her iki senaryoya ait toplam çevresel etkiler Tablo 3'te sunulmuştur. Pozitif değerler çevresel etkileri, negatif değerler ise çevresel faydaları temsil etmektedir. Birlikte sindirim senaryosu, asidifikasyon potansiyeli ve kötü kokulu hava dışındaki 5 çevresel etki kategorisinin 3'ünde referans senaryo tekli sindirime göre daha iyi performans sergilemiştir. Birlikte sindirim senaryosu, referans duruma kıyasla Küresel Isınma, Ötrofikasyon ve Karasal Ekotoksisite çevresel kategorilerinde sırasıyla %64,51, %67,75 ve %76,02 azalma sağlamıştır. İlgili çevresel etki kategorileri ve karşılaştırmalı performans değerleri Şekil 2'de grafiksel olarak sunulmuştur. Ayrıca, birlikte sindirim sistemi enerji üretimi açısından da daha avantajlı bir seçenek oluşturmakta ve tekli sindirim senaryosuna göre %20,52 daha yüksek bir net enerji oranı sağlamaktadır. Bu bulgular, birlikte

sindirimin yalnızca çevresel değil, aynı zamanda enerji verimliliği açısından da daha sürdürülebilir bir alternatif olduğunu göstermektedir.

Tablo 3. Üretilen her 1 MJ enerji için çevresel etkiler
Table 3. *Environmental impacts for every 1 MJ of energy produced*

Çevresel Kategoriler	Birim	Tekli sindirim, SG	Birlikte sindirim, SG+GA-ç.kredi	Değişim
Küresel ısınma	kg CO_2 e	0,358	0,386-0,249=0,137	-64,51
Asidifikasyon	kg SO_2 e	1,42 x 10^{-4}	1,72 x 10^{-4}	+21,13
Ötrofikasyon	kg PO_4 e	3,69 x 10^{-3}	1,19 x 10^{-3}	-67,75
Karasal ekotoksisite	kg 1,4-DB e	1,91 x 10^{-5}	4,58 x 10^{-6}	-76,02
Kötü kokulu hava	m^3 hava	7,07 x 10^3	1,17 x 10^4	+65,48

3.1. Küresel Isınma Potansiyeli

Küresel ısınma potansiyeli, bir sürecin yaşam döngüsü boyunca atmosfere saldığı sera gazlarının, belirli bir zaman aralığında iklim değişikliği üzerindeki toplam etkisini ifade eder. Genellikle karbondioksit eşdeğeri (CO_2-e) cinsinden hesaplanır. İnsan faaliyetlerinden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının, küresel iklim değişikliğinin başlıca itici gücü olduğu dikkate alındığında, bu etki kategorisi, çevresel performans değerlendirmelerinde kritik öneme sahiptir.

Enerji dengesi verileriyle gerçekleştirilen analizde, tekli sindirim senaryosunun toplam küresel ısınma potansiyeli 0,358 ton CO_2 eşdeğeri olarak hesaplanmıştır. Bu değer, birlikte sindirim senaryosunun hesaplanan 0,386 ton CO_2 eşdeğerine kıyasla %8 oranında daha yüksek bir emisyon potansiyeline işaret etmektedir. Birlikte sindirim sürecinde gözlemlenen bu artış, gıda atıklarının sisteme dâhil edilmesiyle ortaya çıkan ilave karbon ve azot yükünden kaynaklanan doğrudan sera gazı emisyonlarındaki yükselişle ilişkilendirilmektedir. Bununla birlikte, Şekil 2a'da detaylandırıldığı üzere, gıda atıklarının düzenli depolama alanlarına gönderilmesinin engellenmesiyle elde edilen çevresel kazanımların birlikte sindirim senaryosuna dâhil edilmesiyle, küresel ısınma potansiyeli değerinde %64,51'lik bir azalma kaydedilmiştir. Bu sonucun temel sebebi, düzenli depolama sahalarına depolanan gıda atıklarının depolanması sırasında ortaya çıkan CH_4 emisyonlarının önlenmesi ve bu metanın birlikte sindirim biyogaz senaryosunda yakalanarak yenilenebilir enerjiye dönüştürülmesidir.

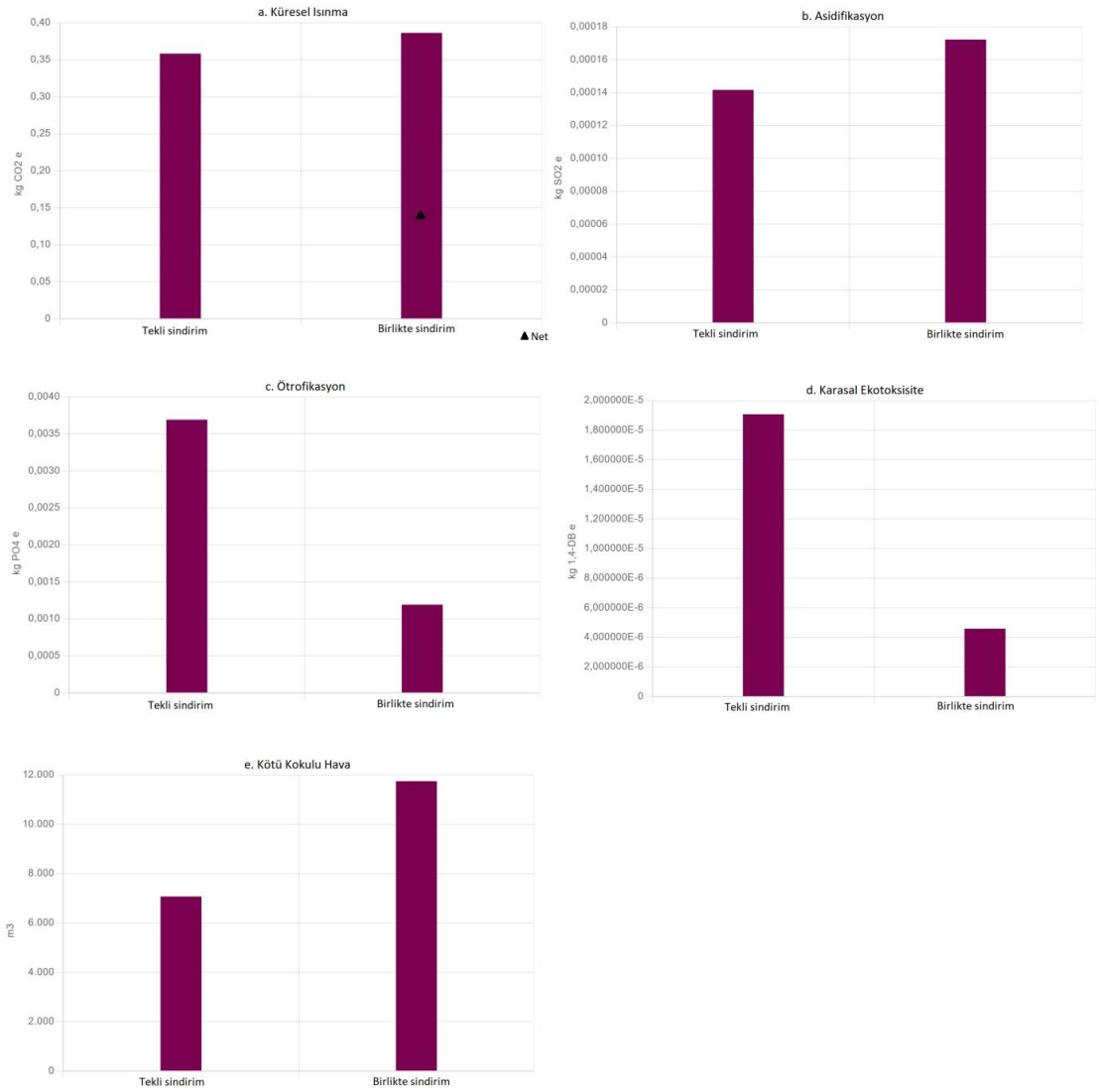
Jiang ve ark. (2021), tarafından domuz gübresi ve gıda atıkları kullanılarak yürütülen çalışmada, birlikte sindirim senaryosunda küresel ısınma potansiyeline en fazla katkıda bulunan süreçler, bu çalışmanın bulgularıyla uyumlu şekilde, anaerobik sindirim süreci (%46) ve sindirim çamurunun açıkta depolanması (%40) olarak belirlenmiştir. Tekli sindirim ve birlikte sindirim senaryolarının karşılaştırılmasında emisyon kredileri hariç tutulduğunda birlikte sindirimin çevresel performansında %69 oranında bir iyileşme tespit edilmiştir. Ancak, gıda atıklarının düzenli depolamaya gönderilmemesi ile sağlanan yüksek düzeydeki biyogaz üretimi ve metan emisyonu önleme kredileri dâhil edildiğinde, toplam küresel ısınma potansiyelinde net %213 oranında bir azalma sağlandığı rapor edilmiştir (Jiang ve ark., 2021). Bu sonuç, birlikte sindirimin yalnızca süreç bazlı emisyonlar açısından değil, aynı zamanda sistem dışı çevresel krediler bakımından da iklim değişikliği üzerindeki etkileri önemli ölçüde azaltabildiğini göstermektedir.

Ebner ve ark. (2015), gıda atıkları ile süt çiftliği gübresinin geleneksel yönetimi ile anaerobik birlikte sindirim yoluyla elektrik üretiminin çevresel etkilerini karşılaştırmak amacıyla kapsamlı bir YDD gerçekleştirmiştir. Elde edilen sonuçlar, anaerobik birlikte sindirim uygulamasının, gıda atıkları ve gübrenin ayrı ayrı yönetildiği geleneksel senaryolara kıyasla sera gazı emisyonlarını %71 oranında azaltabildiğini göstermiştir.

Chen ve ark. (2015), ekmek fırını atıklarının düzenli depolama sahasında bertaraf edilmesi, geleneksel gübre yönetimi ile anaerobik sindirim uygulanması ve fırın atıkları ile süt çiftliği gübresinin anaerobik birlikte sindirimi senaryolarını karşılaştıran bir yaşam döngüsü değerlendirmesi çalışması gerçekleştirmiştir. Çalışma

sonuçlarında birlikte sindirim uygulamasının geleneksel gübre yönetimi senaryolarına kıyasla %67 oranında küresel ısınma potansiyeli düşüşü elde edilmiştir.

Usack ve ark. (2019), 10 farklı yardımcı substratın sığır gübresi ile çeşitli yükleme oranlarında birlikte sindirilmesini değerlendirmek amacıyla, belirsizlik analizi içeren çevresel yaşam döngüsü ve ekonomik değerlendirmeyi bir araya getiren bir çalışma gerçekleştirmiştir. Anaerobik Sindirim Modeli 1 kullanılarak yapılan simülasyonlar, yüksek yükleme oranlarının ekonomik açıdan avantaj sağladığını ancak atık stabilizasyonunu önemli ölçüde azalttığını ve bu durumun çiftlik seviyesinde metan emisyonlarında (> %450) belirgin artışlara yol açtığını göstermiştir. Bununla birlikte, artan elektrik üretimi sayesinde çoğu birlikte sindirim senaryosu, yalnızca gübre sindirimine kıyasla toplam yaşam döngüsü emisyonlarında net bir azalmaya neden olmuştur.



Şekil 2. YDD senaryolarının çevresel etki kategorileri ve karşılaştırmalı performans değerleri.
Figure 2. *Environmental impact categories and comparative performance values of LCA scenarios.*

3.2. Asidifikasyon

Asidifikasyon potansiyeli, havaya, toprağa ve suya salınan asitleştirici gazların (özellikle NH_3, NO_x, SO_x vb.) çevresel etkilerini ifade etmektedir. Bu çalışmada, sığır gübresinin gıda atıkları ile birlikte sindirime tabi tutulması, tekli sindirime kıyasla daha yüksek bir asidifikasyon etkisi (%21,13) oluşturmuştur. Bu artışın temel nedeni, yardımcı substrat olarak kullanılan gıda atıklarının sisteme daha yüksek miktarda azot yüklemesiyle açıklanabilir. Bu farkın oluşmasında, özellikle birlikte sindirim sürecinde artan NH_3 emisyonlarının baskın

katkı sağlayan etken olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmanın bulgularıyla paralel olarak, Tan ve ark. (2022) tarafından yürütülen çalışmada da sığır gübresinin tekli sindirimi, birlikte sindirim senaryolarına kıyasla daha düşük NH_3 emisyonu üretmiş ve dolayısıyla asidifikasyon potansiyeli açısından en düşük çevresel etkiye neden olmuştur.

Asidifikasyon etkisi, sindirim çamurunun ya da çamur fraksiyonunun pH'ının düşürülmesi yoluyla önemli ölçüde azaltılabilir. Bu yöntem, azotu uçucu olmayan amonyum (NH_4^+) formunda tutarak amonyak (NH_3) emisyonlarını minimize etmeyi amaçlamaktadır. Ancak bu strateji, yalnızca toprakların aşırı asidik olmadığı bölgelerde uygulanabilir (Pehme ve ark., 2017).

3.3. Ötrofikasyon

Ötrofikasyon potansiyeli, sucul ve karasal ekosistemlerde azot ve fosfor gibi aşırı besin elementlerinin birikimi sonucunda ortaya çıkan olumsuz çevresel etkileri ifade eder ve bu süreç, ekosistemlerin doğal ya da insan kaynaklı maddelere karşı verdiği bir tepkidir. Bu çalışmada, birlikte sindirim senaryosunun ötrofikasyon açısından %67 oranında daha düşük çevresel etkiye sahip olması, sindirim süreci sonunda oluşan çamur miktarının %40 oranında azalmış olmasıyla açıklanabilir (Tablo 1). Bu azalma, potansiyel besin elementlerinin çevreye taşınmasını sınırlandırarak ötrofikasyon riskini önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu çalışmanın bulgularını destekler nitelikte, Tan ve ark. (2022) tarafından yürütülen çalışmada da birlikte sindirim senaryolarında daha düşük miktarda çıkış çamuru elde edildiği bildirilmiştir. Ayrıca, sığır gübresinin tekli sindirime kıyasla; yem atığı, kanalizasyon çamuru ve iade süt ürünleri ile birlikte sindirimi, ötrofikasyon potansiyeli açısından en düşük çevresel etkiyi göstermiştir.

3.4. Karasal Ekotoksisite

Bu çalışmada birlikte sindirim senaryosunun karasal ekotoksisite açısından %76 oranında daha düşük çevresel etkiye sahip olduğu görülmüştür. Gıda atıklarının, sığır gübresine kıyasla daha düşük çinko (Zn) ve bakır (Cu) konsantrasyonları içermesi, substrat karışımında seyreltme etkisi yaratarak karasal ekotoksisite potansiyelini azaltıcı yönde etki göstermiştir. Bu sonuç, ağır metal içeriklerinin yönetiminde birlikte sindirimin avantajlı bir strateji olabileceğini göstermektedir.

3.5 Kötü Kokulu Hava

Kötü kokulu hava, genellikle biyolojik atık işleme, gübre depolama ve hayvansal atıkların anaerobik ayrışması gibi süreçlerde oluşan, rahatsız edici, keskin ve istenmeyen kokulara sahip gaz karışımlarını ifade etmektedir. Bu gazlar, yalnızca insan konforunu ve yaşam kalitesini düşürmekle kalmayıp, aynı zamanda bazı bileşenleri (örneğin NH_3 ve H_2S) sağlık açısından da risk oluşturabilmektedir. Bu çalışmada, açık sindirim çamuru depolama alanları ve biyoreaktörlerden kaynaklanan NH_3 ve H_2S emisyonları nedeniyle, kötü kokulu hava kategorisinde birlikte sindirim senaryosunda %65,48 oranında artış tespit edilmiştir. Bu artış, özellikle gıda atıklarının içerdiği yüksek kükürt ve azot bileşiklerinin ayrışması sonucunda kokuya neden olan gazların oluşumunun artmasıyla ilişkilidir. Bu bulgular doğrultusunda, birlikte sindirim sistemlerinde substrat bileşiminin dikkatli şekilde yönetilmesi ve özellikle koku kontrol stratejilerinin (örneğin kapalı sindirim çamuru depolama, biyo-filtreleme, kimyasal yıkama sistemleri) entegre edilmesi önerilmektedir. Böylece hem çevresel etkiler azaltılabilir hem de tesislerin çevresel kabul edilebilirliği artırılabilir.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma kapsamında, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi'nde pilot ölçekli piston akımlı biyoreaktör kullanılarak gerçekleştirilen deneysel veriler temel alınarak sığır gübresinin tekli sindirimi ve sığır gübresinin gıda atıklarıyla birlikte sindiriminin çevresel performansı karşılaştırmalı YDD yöntemiyle analiz edilmiştir. YDD bulguları, birlikte sindirim senaryosunun küresel ısınma (%64,51), ötrofikasyon (%67,75) ve karasal ekotoksisite (%76,02) kategorilerinde tekli sindirim senaryosuna kıyasla belirgin çevresel iyileşmeler sağladığını göstermiştir. Bu kazanımların büyük ölçüde, kampüs kaynaklı gıda atıklarının düzenli depolamaya yönlendirilmesi yerine biyogaz üretimi yoluyla değerlendirilmesi sayesinde elde edilen metan emisyonu kredilerine dayandığı görülmüştür. Buna karşılık, asidifikasyon (%21,13) ve kötü kokulu hava (%65,48) etkileri birlikte sindirimde artış göstermiştir. Bu artışların temel nedenleri, gıda atıklarının sisteme sağladığı yüksek azot ve sülfür yükü ile sindirim çamurunun açıkta depolanması süreçleridir. Bu kapsamda, özellikle

sindirim çamurunun kapalı sistemlerde depolanması, pH düzenlemesi, substrat bileşimi optimizasyonu ve koku kontrol teknolojilerinin entegrasyonu gibi iyileştirme stratejileri önerilmektedir. Enerji verimliliği açısından da birlikte sindirim sistemi, tekli sindirime göre %20,52 oranında daha yüksek net enerji oranı sağlayarak hem çevresel hem ekonomik açıdan avantajlı bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmanın bulgularına göre, kentsel ve tarım kaynaklı organik atıkların entegre edilerek birlikte değerlendirilmesi, bölgesel ölçekte biyogaz üretim potansiyelini artıracak ve atık yönetiminde sürdürülebilirliği destekleyecektir.

Çıkar Çatışması Beyanı/ Conflict of Interest

Yazarlar, çıkar çatışması veya kişisel ilişki bulunmadığını beyan etmektedirler./ The authors have no conflicts of interest to declare.

Finansal Destek/ Funding

Yazarlar, bu çalışma için finansal destek almadığını beyan etmiştir./ The authors declared that this study has received no financial support.

Hakem Değerlendirmesi/Peer-review

Dış bağımsız/Externally peer-reviewed.

Yazar Katkıları/Author Contributions: Concept/Tasarım-FŞE, ŞV; Dizayn/Design- FŞE, ŞV; Denetleme/Supervision- FŞE, ŞV; Kaynaklar/Resources- FŞE, ŞV; Veri Toplanması ve/veya İşlemesi/Data Collection and/or Processing- FŞE, ŞV; Analiz ve/ veya Yorum/Analysis and/or Interpretation- FŞE, ŞV; Literatür Taraması/Literature Search- FŞE, ŞV; Yazıyı Yazan/ Writing Manuscript- FŞE, ŞV; Eleştirel İnceleme/Critical Review- FŞE.

Kaynakça

Aguirre-Villegas, H. A., Larson, R. A., & Sharara, M. A. (2019). Anaerobic digestion, solid-liquid separation, and drying of dairy manure: Measuring constituents and modeling emission. Science of The Total Environment, 696, 134059. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134059

Angelidaki, I., & Ellegaard, L. (2003). Codigestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants: Status and future trends. Applied Biochemistry and Biotechnology, 109(1–3), 95–105. https://doi.org/10.1385/ABAB:109:1-3:95

Ankathi, S. K., Chaudhari, U. S., Handler, R. M., & Shonnard, D. R. (2024). Sustainability of biogas production from anaerobic digestion of food waste and animal manure. Applied Microbiology, 4(1), 418–438. https://doi.org/10.3390/applmicrobiol4010029

Bilgili, L., & Çetinkaya, A. Y. (2023). Application of life cycle assessment of system solution scenarios for municipal solid waste management in Turkey. Journal of Material Cycles and Waste Management, 25(1), 324–336. https://doi.org/10.1007/s10163-022-01542-2

Chen, R., Rojas-Downing, M. M., Zhong, Y., Saffron, C. M., & Liao, W. (2015). Life cycle and economic assessment of anaerobic co-digestion of dairy manure and food waste. Industrial Biotechnology, 11(2), 127–136. https://doi.org/10.1089/ind.2014.0029

Dong, L., Cao, G., Guo, X., Liu, T., Wu, J., & Ren, N. (2019). Efficient biogas production from cattle manure in a plug flow reactor: A large scale long term study. Bioresource Technology, 278, 450–455. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.100

Ebner, J. H., Labatut, R. A., Rankin, M. J., Pronto, J. L., Gooch, C. A., Williamson, A. A., & Trabold, T. A. (2015). Lifecycle greenhouse gas analysis of an anaerobic codigestion facility processing dairy manure and industrial food waste. Environmental Science & Technology, 49(18), 11199–11208. https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01331

Eggleston, H. S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., & Tanabe, K. (Eds.). (2006). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). IGES, Japan.

El-Mashad, H. M., & Zhang, R. (2010). Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste. Bioresource Technology, 101(11), 4021–4028. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.027

Guinée, J. B., Gorrée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., Koning, A., ve ark. (2002). Handbook on life cycle assessment: Operational guide to the ISO standards. I: LCA in perspective. IIA: Guide. IIB: Operational annex. III: Scientific background (Vol. 692). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Hagos, K., Zong, J., Li, D., Liu, C., & Lu, X. (2017). Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 76, 1485–1496. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.184

Hossain, S., Akter, S., Saha, C. K., Reza, T., Kabir, K. B., & Kirtania, K. (2023). A comparative life cycle assessment of anaerobic mono- and co-digestion of livestock manure in Bangladesh. Waste Management, 157, 100–109. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.12.011

International Organization for Standardization (ISO). (2006). ISO 14040:2006 — Environmental management: Life cycle assessment — Principles and framework. Geneva, Switzerland: ISO.

IPCC. (2019). Emissions from livestock and manure management. In 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 4 – Agriculture, Forestry and Other Land Use, Chapter 10. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4_Volume4/19R_V4_Ch10_Livestock.pdf

Jiang, Y., Zhang, Y., Wang, S., Wang, Z., Liu, Y., Hu, Z., & Zhan, X. (2021). Improved environmental sustainability and bioenergy recovery through pig manure and food waste on-farm co-digestion in Ireland. Journal of Cleaner Production, 280, 125034. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125034

Korba, J., Šařec, P., Novák, V., Brož, P., Dolan, A., & Dědina, M. (2024). Digestate application methods and rates with regard to greenhouse gas emissions and crop conditions. Agronomy, 14(2), 336. https://doi.org/10.3390/agronomy14020336

Kusz, D., Kusz, B., Wicki, L., Nowakowski, T., Kata, R., Brejta, W., Kasprzyk, A., & Barć, M. (2024). The economic efficiencies of investment in biogas plants—A case study of a biogas plant using waste from a dairy farm in Poland. Energies, 17(3760). https://doi.org/10.3390/en17153760

Leung, D. Y. C., & Wang, J. (2016). An overview on biogas generation from anaerobic digestion of food waste. International Journal of Green Energy, 13(2), 119–131. https://doi.org/10.1080/15435075.2014.909355

Linstrom, P. J. (2021). NIST Chemistry WebBook (NIST Standard Reference Database No. 69). NIST Office of Data and Informatics. https://doi.org/10.18434/T4D303

Longis, M., Pereira, J. C., Högl, T. H., Neubauer, P., & Junne, S. (2023). Plug-flow anaerobic digestion with multi-position sensors: The value of gradient measurement for process monitoring. Biomass and Bioenergy, 173, 106803. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106803

Masalegooyan, Z., Piadeh, F., & Behzadian, K. (2022). A comprehensive framework for risk probability assessment of landfill fire incidents using fuzzy fault tree analysis. Process Safety and Environmental Protection, 163, 679–693. https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.06.011

Pehme, S., Veromann, E., & Hamelin, L. (2017). Environmental performance of manure co-digestion with natural and cultivated grass – A consequential life cycle assessment. Journal of Cleaner Production, 162, 1135–1143. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.067

Peng, W., Lü, F., Hao, L., Zhang, H., Shao, L., & He, P. (2020). Digestate management for high-solid anaerobic digestion of organic wastes: A review. Bioresource Technology, 297, 122485. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122485

Shoshaa, R., Ghanimeh, S., & Almomani, F. (2024). Recent advances in plug flow reactors for anaerobic digestion and in-depth evaluation of mixing approaches: A review. Fuel, 377, 132711. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.132711

Slorach, P. C., Jeswani, H. K., Cuéllar-Franca, R., & Azapagic, A. (2019). Environmental and economic implications of recovering resources from food waste in a circular economy. Science of The Total Environment, 693, 133516. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.322

Tan, W. E., Liew, P. Y., Bong, C. P. C., Fan, Y. V., Tan, L. S., & Jamian, N. R. (2021). Life cycle assessment and techno-economic assessment of anaerobic co-digestion: A short review. Chemical Engineering Transactions, 88, 397–402. https://doi.org/10.3303/CET2188151

Tan, W. E., Liew, P. Y., Tan, L. S., Woon, K. S., Mohammad Rozali, N. E., Ho, W. S., & NorRuwaida, J. (2022). Life cycle assessment and techno-economic analysis for anaerobic digestion as cow manure management system. Energies, 15(24), 9586. https://doi.org/10.3390/en15249586

Usack, J. G., Gerber Van Doren, L., Posmanik, R., Tester, J. W., & Angenent, L. T. (2019). Harnessing anaerobic digestion for combined cooling, heat, and power on dairy farms: An environmental life cycle and techno-economic assessment of added cooling pathways. Journal of Dairy Science, 102(4), 3630–3645. https://doi.org/10.3168/jds.2018-15518

Xiao, H., Zhang, D., Tang, Z., Li, K., Guo, H., Niu, X., & Yi, L. (2022). Comparative environmental and economic life cycle assessment of dry and wet anaerobic digestion for treating food waste and biogas digestate. Journal of Cleaner Production, 338, 130674. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130674

Zhang, Y., Jiang, Y., Wang, S., Wang, Z., Liu, Y., Hu, Z., & Zhan, X. (2021). Environmental sustainability assessment of pig manure mono- and co-digestion and dynamic land application of the digestate. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 137, 110476. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110476