

## Farklı Biyokütle Kaynaklarının Biyokimyasal Metan Potansiyellerinin Saptanması Üzerine Bir Araştırma

### A Research on The Determination of Biochemical Methane Potential of Different Biomass Resources

Birol Kayışoğlu<sup>1,\*</sup> , Melis İnci Giray<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, Tekirdağ, Türkiye.

\* Corresponding author (Sorumlu Yazar): B. Kayışoğlu, e-mail (e-posta): bkayisoglu@nku.edu.tr

#### Makale Bilgisi

Alınış tarihi : 30.04.2024  
Düzeltilme tarihi : 15.05.2024  
Kabul tarihi : 16.05.2024

#### Anahtar Kelimeler:

Biyogaz  
Metan potansiyeli  
Anaerobik sindirim

#### Atfif için:

Kayışoğlu, B., Giray, M.İ. (2024). Farklı Biyokütle Kaynaklarının Biyokimyasal Metan Potansiyellerinin Saptanması Üzerine Bir Araştırma, Tarım Makinaları Bilimi Dergisi, 20(2): 72-83.

#### ÖZET

Bu araştırmada, Trakya bölgesinde yoğun olarak üretimi yapılan ve biyogaz tesislerinde hammadde olarak kullanılan bitkisel ve hayvansal kökenli biyokütle artıklarının teorik ve deneysel biyokimyasal metan potansiyelleri ile biyobozunma dereceleri saptanmıştır. Ayrıca, bu biyokütlelerden elde edilen biyogazın özgül enerji değeri ve enerji dönüşüm verimlilikleri de saptanmıştır. Bitkisel biyokütle artıkları olarak ayçiçeği sapı, çeltik sapı ve kavuzu, kanola sapı, hayvansal biyokütle artıkları olarak sığır gübresi ve etlik piliç ile yumurta tavuğu gübresi kullanılmıştır. Denemeye alınan biyokütlelerin teorik ve deneysel biyometan potansiyelleri ile biyobozunma dereceleri sırasıyla 0,335-0,472 Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kgVS, 0,051-0,308 Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kgVS ve %15,2-%69,0 arasında değişmiştir. Biyogazdaki teorik metan içerikleri deneysel metan içeriklerinden daha düşük olduğu ve deneysel metan içeriklerinin %56,0 ile %58,07 arasında değiştiği belirlenmiştir. Hayvansal kökenli biyokütle kaynaklarında biyokimyasal metan potansiyellerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Biyokütlelerden elde edilen biyogazın teorik ve deneysel özgül enerji değerleri, enerji dönüşüm verimlilikleri sırasıyla 12,3-17,3 MJ/kgVS, 1,9-11,3 MJ/kgVS, %83,7-87,0 ve %12,7-58,6 arasında değişmiştir. Bölgede yaygın üretimi yapılan biyokütle kaynaklarından, çeltik kavuzu hariç, diğer organik artıkların rahatlıkla biyogaz işletmelerinde değerlendirilebileceği sonucuna varılmıştır.

#### Article Info

Received date : 30.04.2024  
Revised date : 15.05.2024  
Accepted date : 16.05.2024

#### Keywords:

Biogas  
Methane potential  
Anaerobic digestion

Kayışoğlu, B., Giray, M.İ. (2024). Farklı Biyokütle Kaynaklarının Biyokimyasal Metan Potansiyellerinin Saptanması Üzerine Bir Araştırma, Tarım Makinaları Bilimi Dergisi, 20(2): 72-83.

#### ABSTRACT

In this study, the theoretical and experimental biochemical methane potentials and biodegradation degrees of plant and animal-derived biomass residues, which are intensively produced in the Thrace region and used as feedstock in biogas facilities, were determined. Additionally, the specific energy value and energy conversion efficiencies of biogas obtained from these biomasses were also determined. Sunflower stalks, rice straw and husks, canola stalks were used as plant biomass residues, while cattle manure and boiler and egg chicken manure were used as animal biomass residues. The theoretical and experimental biomethane potentials and biodegradation degrees of the tested biomasses ranged from 0,335 to 0,472 Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kgVS, 0,051 to 0,308 Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kgVS, and 15.2% to 69,0%, respectively. The theoretical methane content in biogas was lower than the experimental methane content, with experimental methane contents ranging from 56,7% to 58,7%. Animal-derived biomass sources exhibited higher biochemical methane potentials. The theoretical and experimental specific energy values of biogas from these biomasses ranged from 12.3 to 17.3 MJ/kgVS, 1.9 to 11.3 MJ/kgVS, with energy conversion efficiencies ranging from 83,7% to 87,0% and 12,7% to 58,6%, respectively. It was concluded that, except for rice husks, the organic residues of the commonly produced biomass sources in the region could be readily utilized in biogas operations.

## 1. GİRİŞ

Günümüzde enerji kaynaklarının sürdürülebilirliği ve dönüşümündeki çevresel etkiler giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu bağlamda, biyogaz, atık yönetimi ve enerji üretimi konularında önemli bir çözüm sunan yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak öne çıkmaktadır. Biyogaz oluşumu, organik biyokütle kaynaklarının bakteriler tarafından anaerobik ortamda sindirilmesini içeren biyokimyasal dönüşüm süreci ile gerçekleşmektedir. Ayrıca, bu dönüşüm sürecinde diğer enerji dönüşümlerine nazaran daha az olumsuz etkileri olduğundan biyogazın çevreye duyarlı bir enerji kaynağı olduğunu da söylemek mümkündür (Kayıoğlu & Aktaş, 2023).

Biyogaz üretimi anaerobik ortamda hidroliz, asidojenesis, asetojenesis ve metanojenesis olmak üzere dört aşamada gerçekleşmektedir. Üretim her aşamasında farklı bakteri grupları çalışmaktadır (Khanal, 2008; Weiland, 2010). Hidroliz aşamasında, biyokütleyi oluşturan ve suda çözünen karmaşık moleküller (büyük protein makromolekülleri, yağlar, selüloz ve nişasta) basit şekerlere (monosakkarit), uzun zincirli yağ asitlerine ve aminoasitlere dönüştürülmektedir. Bu dönüşüm ile kompleks moleküller mikroorganizmalar tarafından hücre zarından geçmeye uygun hale getirilmektedir. Hem fakültatif hem de zorunlu anaerobik bakterilerden salgılanan proteaz, amilaz ve lipaz gibi enzimlerle gerçekleşen bu süreç oldukça yavaş ilerlemektedir. Asıl fermentasyonun gerçekleştiği asidojenesis aşamasında hidrolize olmuş basit yapı taşları fermentatif mikroorganizmalar tarafından uçucu yağ asitleri, hidrojen, CO<sub>2</sub>, alkoller ve ketonlara dönüştürülmektedir. Bu nedenle bu aşamaya fermentasyon aşaması da denmektedir. Üretilen bu uçucu yağ asitleri ve alkollerin başlıca olanları asetik asit, bütirik asit, formik asit, propiyonik asit, laktik asit, etanol ve metanoldür. Açığa çıkan bu ürünlerin miktarları substrat çeşidine, görev alan mikroorganizmaların profiline, ortam pH'sı ya da kısmi hidrojen basıncı gibi proses işletme koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Asidojenesis aşamasında üretilen organik asit ya da etanol gibi ürünler metan üretimi için asetik asit, CO<sub>2</sub> ve hidrojene dönüştürülmekte ve bu dönüşümde asetojenik bakteriler görev almaktadır.

Hammaddenin katı madde içeriği, C:N oranı, ortam sıcaklığı ve pH'sı, ortamdaki amonyak miktarı, serbest yağ asitleri, mikroorganizma konsantrasyonu, materyalin özgül yüzey alanı, kısmi hidrojen basıncı, toksitite ve karıştırma işlemi biyogaz üretimini etkileyen en önemli unsurlardır (Kayıoğlu & Aktaş, 2023).

Son yıllarda biyogaz ve biyokütle enerji sektörü önemli bir istihdam kaynağı olmaya başlamıştır. Dünyada bu sektörde hammadde temini, lojistik, ekipman imalatı, biyogaz üretim santralleri gibi alanlarda 3,2 milyon civarında kişinin çalıştığı ve bu istihdamın küresel yenilenebilir enerji sektörünün 1/3'ü olduğu belirtilmiştir (İleez, 2020).

Biyokimyasal Metan Potansiyeli (BMP) testleri, en iyi substrat ve birlikte sindirim konfigürasyonlarını belirlemek için yararlı bir araçtır, ancak bir substratın organik bileşiminden elde edilen teorik nihai metan potansiyelini kullanarak bu süreçten maliyet ve zaman tasarrufu sağlamaya yönelik bazı metodolojiler bulunmaktadır. Ayrıca, yalnızca metan eğrisi davranışını yeniden oluşturabilen değil aynı zamanda deneyin ilk günlerinden itibaren nihai metan üretimlerini tahmin edebilen bazı modeller de bulunmaktadır. Ancak, teorik metan üretimin potansiyelinin belirlenmesi için kullanılan element bileşimine dayalı metodolojiler deneysel sonuçlarla daha iyi uyum sağlamaktadır (Nielfa et al., 2015).

Çin'de gerçekleştirilen bir araştırmada, 20 çeşit tipik yapraklı sebze kalıntısının metan üretim potansiyeli üç farklı kinetik model kullanılarak araştırılmıştır. Bu sebzelerin biyokimyasal bileşenleri ile

metan verimleri arasındaki bağlantı kurulmuş olup, bu bağlantının pratikte biyogaz performansını tahmin etmek için kullanılması amaçlanmıştır. Araştırma sonuçlarına göre yüksek uçucu katı/toplam katı (VS/TS) oranı ve hemiselüloz içeriği biyogaz verimi üzerinde olumlu etki gösterirken, lignin ise olumsuz etki göstermiştir. Araştırmacılar, bu araştırmanın yalnızca farklı substratlardan biyogaz üretimine ilişkin daha ileri çalışmalar için bir referans görevi görmeye kalmayacağını, aynı zamanda gelecekte bitkisel atıkların tarımsal-endüstriyel uygulamalarına yönelik faydalı bilgiler de sağlayacağını belirtmişlerdir (Yan et al., 2017).

Çeşitli materyallerin biyokimyasal metan potansiyelleri ile ilgili yapılan bir çalışmada, sığır gübresinden 242-399 mL CH<sub>4</sub>/gVS, tavuk gübresinden 107-438 mL CH<sub>4</sub>/gVS, domuz gübresinden 313-322 mL CH<sub>4</sub>/gVS, mısır silajından 270-298 mL CH<sub>4</sub>/gVS, çeltik sapından 279-280 mL CH<sub>4</sub>/gVS ve mutfak atıklarından 541-683 mL CH<sub>4</sub>/gVS biyometan üretimi gerçekleştirilebileceği belirtilmiştir (Kougiyas & Angalidaki, 2018).

Organik bozunabilirlik, gıda atıklarının anaerobik sindirim performansı için hayati öneme sahiptir ancak organik bozunabilirliğin biyometan üretim süreci üzerindeki etkisi tam olarak anlaşılamamıştır. 12 tür gıda atığı üzerinde yapılan değerlendirmeye dayanarak organik bozunma performansını kapsamlı bir şekilde araştırmayı ve organik bileşenlerin azalması ile metan verimi arasındaki etkileşimi belirlemeyi amaçlayan araştırma sonucunda kümülatif metan üretiminin bütün substratlarda lipit, protein ve uçucu katıların uzaklaşma miktarına bağlı olarak üstel olarak arttığı belirlenmiştir. Benzer şekilde protein bozunması da lipitlerin indirgeme etkinliğiyle birlikte üstel olarak artmıştır (Li et al., 2018)

Teorik biyokimyasal metan potansiyelini (BMP<sub>th</sub>) belirlemek için 3 önemli model kullanılmaktadır. Birinci model (BMP<sub>th</sub>COD) materyalin kimyasal oksijen gereksiniminin (COD) metan üretimi üzerindeki etkisini belirlemek için de kullanılmakta olup belirli sıcaklık ve basınç koşulları altında metan üretiminin hesaplanmasına olanak sağlamaktadır. İkinci model (BMP<sub>th</sub>OFC) materyalin protein, karbonhidrat ve yağ oranlarına bağlı olarak biyokimyasal metan potansiyelini hesaplamaktadır. Üçüncü modelde (BMP<sub>th</sub>AtC) substratların atomik bileşimine dayalı stokiyometrik denklem kullanılmaktadır. Bu model N, C, O ve H atomlarının bakteriler tarafından tüketildiğini varsaymaktadır. Ancak, beklenmedik inhibitörlerin bulunması bu modelin hassasiyetini azaltmaktadır. Bu modelin, N, C, O ve H miktarının metan üretimi üzerindeki etkisini incelemek için kullanılması mümkündür (Mohamed et al., 2018).

Çeşitli tarımsal ve gıda işleme artıklarının metan potansiyellerinin belirlendiği bir çalışmada, enerji bitkilerinin 250-350 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/tonVS, lignoselülozik bitki artıklarının 150-450 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/tonVS, kümes hayvanlarının altlıklarının 50-200 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/tonVS, yağ içeriği fazla olan besin artıklarının 400-700 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/tonVS, karbonhidrat ve proteince zengin olan substratların 350-450 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/tonVS dolaylarında biyokimyasal metan potansiyeline sahip olduğunu belirtilmiştir (Garcia et al., 2019).

Bu çalışmada, Trakya Bölgesinde yaygın olarak üretilen ve sap, saman gibi artık potansiyeli bulunan bitkisel biyokütle kaynaklarının ve hayvan gübrelerinin deneysel ve teorik biyokimyasal metan potansiyelleri ile biyobozunurluk derecelerinin saptanması amaçlanmıştır. Çalışmada elde edilen verilerle tarımsal faaliyetler sonucu ortaya çıkan bu artıkların biyogaz olarak değerlendirilmesi için gerekli bilgileri içeren bir veri tabanı oluşturulması hedeflenmiştir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. Materyal

Araştırmada, biyokütle kaynağı olarak Trakya Bölgesinde yaygın üretimi yapılan lignoselülozik bitkilerin artıkları ve hayvansal kökenli organik biyokütleler seçilmiştir. Bu amaçla, ayçiçeği sapı, kanola sapı, çeltik sapı ve kavuzu ile sığır gübresi, etlik piliç ve yumurta tavuğu gübresi materyal olarak kullanılmıştır. Araştırmada kullanılan biyokütlelerin elementel analizi sonucu elde edilen veriler araştırma sonuçları bölümünde verilmiştir.

Hammaddelerin teorik biyokimyasal metan potansiyellerini saptamak için gerekli olan elementel analizleri Perkin Elmer marka 2400 Series II CHNS/O cihazı ile yapılmıştır.

### 2.2. Yöntem

Biyokütlelerin deneysel biyokimyasal metan potansiyel ( $BMP_{exp}$ ) testleri Almanya'da biyogaz verimi hakkında niceliksel ve niteliksel olarak güvenilir veriler sağlayan akredite bir laboratuvarında, VDI RL 4630 standartlarına uygun olarak yapılmıştır.

Biyokütlelerin teorik Biyokimyasal Metan Potansiyelleri ( $BMP_{th}$ ) elementel analiz sonuçlarından yararlanılarak hesaplanmıştır. Bu amaçla biyokütlenin C, O, H ve N elementlerinin atomik bileşimini temel alan stokiometrik denklem kullanılmıştır (Nielfa et al., 2015; Yan et al., 2017);

$$BMP_{th} = \frac{22.415 \times \left( \frac{4a + b - 2c - 3d}{8} \right)}{(12a + b + 16c + 14d)} \quad (1)$$

$BMP_{th}$  : Teorik biyokimyasal metan potansiyeli ( $Nm^3/kgVS$ )

$a$  : C elementinin mol katsayısı

$b$  : H elementinin mol katsayısı

$c$  : O elementinin mol katsayısı

$d$  : N elementinin mol katsayısı

Teorik biyogaz üretim potansiyeli ise aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmıştır (Sawyer et al., 2019);

$$BP_{th} = \frac{22.415 \times a}{(12a + b + 16c + 14d)} \quad (2)$$

$BP_{th}$  : Teorik biyogaz potansiyeli ( $Nm^3/kgVS$ )

Eşitlik 1 ve 2'de kullanılan  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , ve  $d$  elementel mol katsayıları aşağıdaki bağıntılarla hesaplanmıştır (Sawyer et al., 2019);

$$a = \frac{X_C}{M_C \times L} ; b = \frac{X_H}{M_H \times L} ; c = \frac{X_O}{M_O \times L} ; d = \frac{X_N}{M_N \times L} \quad (3)$$

$X_C, X_H, X_O, X_N$  : Sırasıyla C, H, O ve N elementlerinin kütle oranları (%)

$M_C, M_H, M_O, M_N$  : Sırasıyla C, H, O ve N elementlerinin mol kütleleri (g/mol)

$L$ , en düşük mol sayısına sahip elementin kütle oranının mol kütle oranlanmasıyla hesaplanmaktadır. Biyokütle hammaddelerinde en düşük mol sayısına sahip element N olduğundan aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır;

$$L = \frac{X_N}{M_N} \quad (4)$$

Eşitlik 4'te hesaplanan  $L$  katsayısının kullanılması sonucunda  $d$  katsayısı daima 1'e eşit olmaktadır.

Materyallerin biyobozunma dereceleri deneysel biyokimyasal metan potansiyelinin teorik biyokimyasal metan potansiyeline oranlanması ile aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır (Yan et al., 2017);

$$BBD = \frac{BMP_{exp}}{BMP_{th}} \times 100 \quad (5)$$

$BBD$  : Hammaddenin biyobozunma derecesi (%)

Biyogazın özgül enerji değeri, içerdiği metan gazının miktarına göre değişmektedir ve aşağıdaki bağıntılar ile hesaplanmıştır;

$$E_{th} = BMP_{th} \times 36.72 \quad ve \quad E_{exp} = BMP_{exp} \times 36.72 \quad (6)$$

$E_{th}, E_{exp}$  : Sırasıyla biyogazın teorik ve deneysel özgül enerji değerleri (MJ/kgVS)

Biyogaz elde edilen hammaddelerin kuru baza göre üst ısıl değerleri 7 no'lu eşitlik ile hesaplandıktan sonra biyogaz enerji verimlilikleri 8 no'lu eşitlik kullanılarak belirlenmiştir (Kayıoğlu & Aktaş, 2023);

$$HHV_b = 0.3491 * X_C + 1.1783 * X_H - 0.0151 * X_N - 0.1034 * X_O \quad (7)$$

$HHV_b$  : Biyokütlenin üst ısıl değeri (MJ/kgVS)

$$\eta_{th} = \frac{E_{th}}{HHV_b} \times 100 \quad ve \quad \eta_{exp} = \frac{E_{exp}}{HHV_b} \times 100 \quad (8)$$

$\eta_{th}, \eta_{exp}$  : Sırasıyla teorik ve deneysel biyogaz üretiminin enerji dönüşüm verimliliği (%)

### 3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Biyokütlelerin Perkin Elmer marka 2400 Series II CHNS/O cihazı ile yapılan elementel analizlerinin sonuçları Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir. Bitkisel kökenli biyokütlelerin C/N oranlarının hayvansal kökenli biyokütlelerinkinden daha yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 1. Biyokütellerin toplam katı ve uçucu madde oranları

Hammadde	TS	VS
	(%)	(%)
Ayçiçeği sapı	93,3	91,8
Kanola sapı	92,8	93,8
Çeltik sapı	91,4	85,5
Çeltik kavuzu	94,0	81,1
Sığır gübresi	7,3	80,4
Yumurta tavuğu gübresi	22,3	68,7
Etlik piliç gübresi	65,2	84,1

Tablo 2. Biyokütellerin elementel analiz sonuçları

Hammadde	Elementel Bileşim (% k.b.)				C/N
	C	H	O	N	
Ayçiçeği sapı	49,7	5,9	43,5	0,9	55
Kanola sapı	49,0	5,2	44,8	1,0	49
Çeltik sapı	47,9	5,2	45,8	1,0	48
Çeltik kavuzu	40,6	5,3	53,2	0,9	45
Sığır gübresi	49,2	5,9	42,2	2,7	18
Yumurta tavuğu gübresi	49,5	5,4	41,4	3,8	13
Etlik piliç gübresi	48,8	5,5	41,6	4,1	12

Biyokütellerin teorik biyokimyasal metan potansiyellerini saptamak için kullanılan elementel mol katsayıları 3 no'lu eşitliklerle hesaplanmış ve Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Hammaddelerin elementel mol katsayıları

Biyokütle	a	b	c	d
Ayçiçeği sapı	64,4	91,8	42,3	1,0
Kanola sapı	57,2	72,8	39,2	1,0
Çeltik sapı	55,9	72,8	40,1	1,0
Çeltik kavuzu	52,6	81,8	51,7	1,0
Sığır gübresi	20,9	30,1	13,5	1,0
Yumurta tavuğu gübresi	15,4	20,2	9,6	1,0
Etlik piliç gübresi	13,9	18,8	8,9	1,0

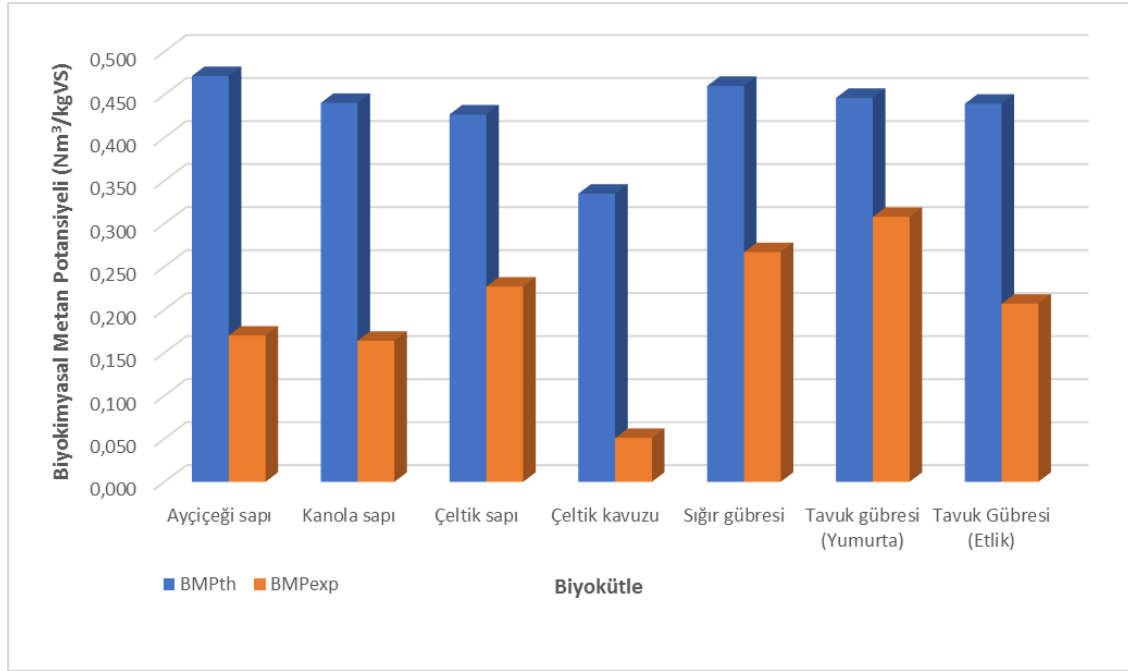
Biyokütellerin elementel mol katsayıları yardımıyla hesaplanan teorik biyokimyasal metan potansiyelleri, deneysel biyokimyasal metan potansiyelleri ile biyobozunma dereceleri Tablo 4'te verilmiştir. Bitkisel ve hayvansal kökenli biyokütellerin teorik biyokimyasal metan potansiyellerinin birbirlerine yakın değerlerde olduğu görülmüştür. En yüksek deneysel biyokimyasal metan potansiyeli 0,460 Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kgVS değeri ile sığır gübresinde, en düşük ise 0,335 Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kgVS ile çeltik kavuzunda saptanmıştır. Hayvansal kökenli biyokütellerin biyobozunma derecelerinin lignoselülozik biyokütellere göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Çeltik kavuzunun biyobozunma derecesinin %15,2 ile oldukça

düşük olduğu belirlenmiştir. Buna karşın, çeltik sapının biyobozunma derecesinin ise %53,2 ile bitkisel kökenli biyoküteller içinde en yüksek olduğu görülmüştür.

Tablo 4. Hammaddelerin teorik ve deneysel biyokimyasal metan potansiyelleri ve biyobozunma dereceleri

Biyokütle	$BMP_{th}$ (Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kgVS)	$BMP_{exp}$ (Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kgVS)	BBD (%)
Ayçiçeği sapı	0,472	0,170	36,0
Kanola sapı	0,440	0,164	37,2
Çeltik sapı	0,427	0,227	53,2
Çeltik kavuzu	0,335	0,051	15,2
Siğır gübresi	0,460	0,267	58,0
Yumurta tavuğu gübresi	0,446	0,308	69,0
Etlik piliç gübresi	0,440	0,207	47,0

Biyokütellerin teorik ve deneysel biyokimyasal metan potansiyelleri görsel karşılaştırma yapabilmek amacıyla Şekil 1’de grafik olarak verilmiştir.



Şekil 1. Teorik ve deneysel biyokimyasal metan potansiyelleri

Biyokütellerin teorik ve deneysel biyogaz potansiyelleri ile metan oranları Tablo 5’te verilmiştir. En yüksek deneysel biyogaz potansiyeli 0,537 Nm<sup>3</sup>/kgVS ile yumurta tavuğu gübresinde, en düşük potansiyel ise 0,089 Nm<sup>3</sup>/kgVS ile çeltik kavuzunda elde edilmiştir. Tavuk gübresi dışında kalan biyokütellerin deneysel metan oranlarının yüksek olduğu görülmüştür.

Tablo 5. Biyokütellerin teorik ve deneysel biyogaz potansiyelleri ve metan oranları

Biyokütle	$BP_{th}$ (Nm <sup>3</sup> /kgVS)	$BP_{exp}$ (Nm <sup>3</sup> /kgVS)	$CH_{4th}$ (%)	$CH_{4exp}$ (%)
Ayçiçeği sapı	0,928	0,299	50,8	56,9
Kanola sapı	0,915	0,289	48,1	56,7
Çeltik sapı	0,896	0,405	47,7	56,0
Çeltik kavuzu	0,759	0,089	44,2	57,3
Sığır gübresi	0,918	0,455	50,1	58,7
Yumurta tavuğu gübresi	0,925	0,537	48,3	57,4
Etlık Piliç gübresi	0,912	0,365	48,2	56,7

Biyokütellerden elde edilen biyogazın özgül enerji değerleri ile enerji dönüşüm verimlilikleri Tablo 6'da verilmiştir. Bitkisel kökenli hammaddeler içinde en yüksek deneysel özgül enerji 8,3 MJ/kgVS değeri ile çeltik sapında, hayvansal biyokütelerde ise 11,3 MJ/kgVS değeri ile yumurta tavuğu gübresinde elde edilmiştir. Teorik enerji dönüşüm verimliliklerinin deneysel verimliliklere göre oldukça yüksek olduğu görülmüştür. En yüksek deneysel enerji dönüşüm verimliliği %58,6 ile yumurta tavuğu gübresinden elde edilen biyogazda ölçülmüştür. Buna karşın çeltik kavuzunun deneysel enerji dönüşüm verimliliğinin ise %12,7 değeri ile oldukça düşük olduğu belirlenmiştir.

Tablo 6. Biyogazın özgül enerji değerleri ve enerji dönüşüm verimlilikleri

Biyokütle	$HHV_b$ (MJ/kgVS)	$E_{th}$ (MJ/kgVS)	$E_{exp}$ (MJ/kgVS)	$\eta_{th}$ (%)	$\eta_{exp}$ (%)
Ayçiçeği sapı	19,9	17,3	6,2	87,0	31,4
Kanola sapı	18,6	16,2	6,0	87,0	32,4
Çeltik sapı	18,1	15,7	8,3	86,6	46,1
Çeltik kavuzu	14,7	12,3	1,9	83,7	12,7
Sığır gübresi	19,7	16,9	9,8	85,7	49,7
Yumurta tavuğu gübresi	19,3	16,4	11,3	84,9	58,6
Etlık piliç gübresi	19,2	16,1	7,6	84,3	39,7

Denemeye alınan biyokütellerin teorik ve deneysel biyometan potansiyelleri ile biyobozunma dereceleri sırasıyla 0,335-0,472 Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kgVS, 0,051-0,308 Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kgVS ve %15,2-%69,0 arasında değişmiştir. Etlık piliç tavuk gübresinin deneysel biyokimyasal metan potansiyeli (0,207 Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kgVS), yumurta tavukların gübresinden (0,308 Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kgVS) daha düşük olduğu görülmüştür. Bu durum, etlik piliç gübrelerinin kümes içerisindeki bitkisel kökenli sap saman artıklarıyla karışmasından kaynaklanmaktadır. Benzer şekilde etlik piliçlerin biyobozunma derecelerinin de yumurta tavuklarının biyobozunma derecelerinden daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Çeltik sapı dışında kalan bitkisel kökenli lignoselülozik biyokütelerde biyobozunma derecelerinin, daha düşük olduğu saptanmıştır. 20 farklı sebze türünde teorik ve deneysel biyometan potansiyelleri ile biyobozunma değerlerinin %16,76 ile %55,77 arasında değiştini belirtmiştir (Yan et al., 2017). Çim, çit, ağaç ve yabani bitki artıklarının biyokimyasal potansiyellerini belirlemek için yapılan araştırmada, biyobozunma derecelerinin %32,7 ile %66,6 arasında değiştini bildirilmiştir. Araştırma sonucunda çim artıklarının düşük lignin ve



lignoselüloz içeriği, selülozun kristal yapısı nedeniyle yüksek biyolojik metan potansiyeline (0,333 Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kgVS) ve biyobozunma derecesine (%66,6) sahip olduğunu belirtilmiştir (Triolo et al., 2012). 12 çeşit yemek atığı karışımının biyokimyasal metan potansiyelini ve biyobozunma derecelerinin saptandığı çalışmada, teorik biyokimyasal metan verimlerinin, organik bileşimlerdeki farklılıklara bağlı olarak 0,435 ila 0,687 Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kgVS arasında değiştiği, buna karşın deneysel biyokimyasal metan verimlerinin ise 0,385 ila 0,627 Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kgVS arasında olduğu, biyobozunma derecelerinin de %84 ile %96 arasında değiştiği, yemek atıklarında organik madde içeriğinin fazla olması, lignoselülozik yapının olmamasının bu değerlerin yüksek olmasını sağladığı belirtilmiştir (Li et al., 2018). Yapılan bir araştırmada sığır gübresinin deneysel biyokimyasal metan potansiyelinin 0,243 Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kgVS, sıvı fraksiyonundan ayrılarak biyogaz üretildiğinde 0,261 Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kgVS değerine ulaştığı belirtilmiştir (Labatut et al., 2011). Çeltik sapının zengin lignoselülozik yapısı nedeniyle biyogaz potansiyelinin yüksek olduğu, ancak selülozik yapı etrafındaki lignin-slika kabuklanmasının sindirilebilirliğini engellediği, bu nedenle mutlak suretle ön işlem uygulanmasının gerekli olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, bitkisel kökenli biyokütleler içinde çeltik sapının biyokimyasal metan potansiyelinin 0,227 Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kgVS değeri ile yüksek olduğu görülmüştür (Sahil et al., 2023).

Farklı biyokütlerden biyogaz üretilmesi ve biyometan potansiyellerinin saptanması ile ilgili önceki çalışmalarda da görüldüğü gibi biyokütlenin bileşimi, tekstürü, lignoselülozik yapısı biyolojik biyometan potansiyellerini ve biyobozunma derecelerini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu araştırmada da lignoselülozik biyokütlerin teorik metan potansiyellerinin oldukça yüksek olmasına rağmen, deneysel biyometan potansiyellerinin genel olarak hayvansal kökenli lignoselülozik olmayan biyokütlerden daha düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca, biyobozunma derecelerinin de düşük olduğu saptanmıştır. Lignoselülozik biyokütlerin biyolojik metan potansiyellerini arttırmak için ön işlem uygulamasının kaçınılmaz olduğu görülmektedir. Biyokütlerde bozunabilir organik madde içeriği arttıkça biyokimyasal metan potansiyeli de artmaktadır.

Biyokütlerden elde edilen biyogazın teorik ve deneysel özgül enerji değerleri, enerji dönüşüm verimlilikleri sırasıyla 12,3-17,3 MJ/kgVS, 1,9-11,3 MJ/kgVS, %83,7-87,0 ve %12,7-58,6 arasında değişmiştir. En yüksek deneysel enerji dönüşüm verimliliği %58,6 ile yumurta tavuğu gübresinden elde edilen biyogazda belirlenmiştir. Bitkisel kökenli biyokütler ve etlik piliç gübresinden elde edilen biyogazın deneysel enerji dönüşüm verimliliklerinin daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Farklı biyokütlerden elde edilen biyogazın özgül enerji değerlerinin incelendiği bir araştırmada, sığır gübresinden elde edilen ve %55 metan içeren biyogazın özgül enerji değerinin 5,9 MJ/kgTS, tahıl saplarından elde edilen ve %51 metan içeren biyogazın özgül enerji değerinin ise 6,2 MJ/kgTS olduğunu belirtilmiştir (Pöschl et al., 2010). Bu araştırmada da çeltik kavuzu hariç, elde edilen özgül enerji değerlerinin araştırmacıların belirttiği değerler dolayında olduğu görülmüştür. Biyobozunma derecelerinin yüksek olmasından dolayı hayvansal kökenli biyokütlerde enerji dönüşüm verimliliklerinin, daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

#### 4. SONUÇ

Bu araştırmada, Trakya Bölgesinde yoğun üretimi yapılan ve biyogaz üretiminde değerlendirilen bitkisel ve hayvansal artıkların biyokimyasal metan potansiyelleri ve biyobozunma dereceleri saptanmıştır. Araştırmada biyokütle kaynağı olarak lignoselülozik biyokütler olan ayçiçeği sapı, kanola sapı, çeltik sapı ve kavuzu ile sığır, etlik piliç ile yumurta tavuklarının gübresi kullanılmıştır.

En yüksek biyobozunma derecesi %69 değeri ile yumurta tavuğu gübresinde gerçekleşmiştir. Çeltik kavuzunun biyobozunma derecesi oldukça düşük olmuştur (%15.2). Biyokütlelerden elde edilen biyogazın metan oranları birbirlerine yakın olmakla birlikte en yüksek metan oranı %58.7 değeri ile yumurta tavuğu gübresinde bulunmuştur. Deneysel metan oranlarının teorik metan oranlarından daha yüksek olduğu görülmüştür. En yüksek enerji dönüşüm verimliliği yumurta tavuğu gübresi ile üretilen biyogazda elde edilmiştir (%58.6).

Araştırmadan elde edilen bulgularla, bölgede oldukça yüksek potansiyeli bulunan lignoselülozik ve hayvansal kökenli biyokütlelerin, çeltik kavuzu hariç, biyogaz üretimi yapan işletmelerde rahatlıkla değerlendirilebileceği ve lignoselülozik biyokütlelere uygulanacak ön işlemlerle bu potansiyelin arttırılabileceği sonucuna varılmıştır. Bu araştırmadan elde edilen çıktılar konuyla ilgili bundan sonra yapılacak araştırmalara katkıda bulunacaktır.

## KAYNAKLAR

- Garcia, N. H., Mattioli, A., Gil, A., Frison, N., Battista, F., & Bolzonella, D. (2019). Evaluation of the methane potential of different agricultural and food processing substrates for improved biogas production in rural areas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112(May), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.040>
- İleez, B. (2020). *Türkiye’de Biyokütle enerjisi İçinde: Türkiye’nin Enerji Görünümü*.
- Kayıoğlu, B., & Aktaş, T. (2023). *Biyokütle Enerjisi Dönüşüm Teknolojileri* (1st ed.). Nobel Akademik Yayıncılık.
- Khanal, S. K. (2008). *Anaerobic Biothechnology for Bioenergy Production: Principles and Applications*. John Wiley & Sons Ltd.
- Kougias, G.P., & Angalidaki, I. (2018). Biogas and its Opportunities—A review. *Frontiers of Environ. Sci. Eng.*, 12(3), 1–14.
- Labatut, R. A., Angenent, L. T., & Scott, N. R. (2011). Biochemical methane potential and biodegradability of complex organic substrates. *Bioresource Technology*, 102(3), 2255–2264. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.10.035>
- Li, Y., Jin, Y., Li, H., Borrion, A., Yu, Z., & Li, J. (2018). Kinetic studies on organic degradation and its impacts on improving methane production during anaerobic digestion of food waste. *Applied Energy*, 213(December 2017), 136–147. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.01.033>
- Mohamed, M. A., Nourou, D., Boudy, B., & Mamoudou, N. (2018). Theoretical models for prediction of methane production from anaerobic digestion: A critical review. *International Journal of Physical Sciences*, 13(13), 206–216. <https://doi.org/10.5897/ijps2018.4740>
- Nielfa, A., Cano, R., & Fdz-Polanco, M. (2015). Theoretical methane production generated by the co-digestion of organic fraction municipal solid waste and biological sludge. *Biotechnology Reports*, 5(1), 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2014.10.005>
- Pöschl, M., Ward, S., & Owende, P. (2010). Evaluation of energy efficiency of various biogas production and utilization pathways. *Applied Energy*, 87(11), 3305–3321. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.05.011>
- Sahil, S., Karvembu, P., Kaur, R., Katyal, P., & Phutela, U. G. (2023). Enhanced biogas production from rice straw through pretreatment with cellulase producing microbial consortium. *Energy Nexus*, 12, 100246. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100246>
- Sawyer, N., Trois, C., & Workneh, T. (2019). Identification and characterization of potential feedstock

for biogas production in South Africa. *Journal of Ecological Engineering*, 20(6), 103–116. <https://doi.org/10.12911/22998993/108652>

Triolo, J. M., Pedersen, L., Qu, H., & Sommer, S. G. (2012). Biochemical methane potential and anaerobic biodegradability of non-herbaceous and herbaceous phytomass in biogas production. *Bioresource Technology*, 125, 226–232. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.079>

Weiland, P. (2010). Biogas production: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85, 849–860.

Yan, H., Zhao, C., Zhang, J., Zhang, R., Xue, C., Liu, G., & Chen, C. (2017). Study on biomethane production and biodegradability of different leafy vegetables in anaerobic digestion. *AMB Express*, 7(27), 1–9.

## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction and Research Questions & Purpose

In this study, the theoretical and experimental biochemical methane potentials and biodegradation degrees of plant and animal-derived biomass residues, which are intensively produced in the Thrace region and used as feedstock in biogas facilities, were determined. Additionally, the specific energy value and energy conversion efficiencies of biogas obtained from these biomasses were also determined. Sunflower stalks, rice straw and husks, canola stalks were used as plant biomass residues, while cattle manure and boiler and egg chicken manure were used as animal biomass residues.

The aim of the research was to determine the experimental and theoretical biochemical methane potential and biodegradability levels of plant biomass resources and animal manures, which are widely produced in the Thrace Region and have residual potential such as stalks and straw. With the data obtained in the research, it was aimed to create a database containing the necessary information to evaluate these residues resulting from agricultural activities as biogas.

### Methodology

Elemental analyzes required to determine the theoretical biochemical methane potential of the raw materials were performed with a Perkin Elmer brand 2400 Series II CHNS/O device.

Experimental biochemical methane potential ( $BMP_{exp}$ ) tests of biomasses were carried out in Germany in an accredited laboratory that provides quantitative and qualitative reliable data on biogas yield, in accordance with VDI RL 4630 standards.

Theoretical Biochemical Methane Potentials ( $BMP_{th}$ ) of biomasses were calculated using elemental analysis results. For this purpose, the stoichiometric equation based on the atomic composition of the C, O, H and N elements of the biomass was used.

The biodegradation degrees of the materials were calculated by dividing the experimental biochemical methane potential to the theoretical biochemical methane potential.

### Result and discussions

Theoretical and experimental biomethane potentials and biodegradation degrees of the biomass included in the experiment varied between 0.335-0.472  $Nm^3CH_4/kgVS$ , 0.051-0.308  $Nm^3CH_4/kgVS$  and 15.2%-69.0%, respectively. The experimental biochemical methane potential of broiler chicken manure

(0.207 Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kgVS) was found to be lower than that of laying hen manure (0.308 Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kgVS). This is due to the mixing of broiler manure with plant-derived straw residues in the chicken coop. Similarly, it has been determined that the biodegradation levels of broiler chickens are lower than the biodegradation levels of laying hens. It was determined that the biodegradation levels were lower in plant-derived lignocellulosic biomass other than rice straw.

As seen in previous studies on the production of biogas from different biomass and the determination of biomethane potentials, the composition, texture, and lignocellulosic structure of biomass significantly affect biological biomethane potentials and biodegradation degrees. In this research, it was observed that although the theoretical methane potential of lignocellulosic biomass was quite high, the experimental biomethane potential was generally lower than non-lignocellulosic biomass of animal origin. Additionally, biodegradation levels were found to be low. It seems that pre-treatment is inevitable to increase the biological methane potential of lignocellulosic biomass. As the content of degradable organic matter in biomass increases, the biochemical methane potential also increases.

The highest experimental energy conversion efficiency was determined in biogas obtained from laying hen manure with 58.6%. It has been determined that the experimental energy conversion efficiencies of biogas obtained from plant-based biomass and broiler manure are lower. It has been determined that the energy conversion efficiency of animal origin biomass is higher due to their higher degree of biodegradation.

## Yazarların Bibliografisi



### Birol KAYIŞOĞLU

1961 yılında Malatya'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Adana'da tamamladı. 1983 yılında Çukurova Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makinaları Bölümünde lisans eğitimini tamamladı. 1984 yılında Trakya Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makinaları Bölümünde araştırma görevlisi olarak göreve başladı. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarım Makinaları Anabilim Dalı'nda 1987 yılında yüksek lisans eğitimini, 2000 yılında Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarım Makinaları Anabilim Dalı'nda doktora eğitimini tamamladı. 1996 yılında Tarımsal Mekanizasyon Bilim Alanında Üniversite Doçenti unvan ve yetkisini aldı. 2001 yılından bu yana Namık Kemal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği, Tarımsal Enerji Sistemleri Anabilim Dalı'nda Profesör olarak görevini sürdürmektedir. Yenilenebilir enerji, biyogaz, biyokütle gazlaştırma ve güneş enerjisi konularında çalışmaktadır. Evli ve 2 kız çocuğu babasıdır.

**İletişim** bkayisoglu@nku.edu.tr

**ORCID Adresi** <https://orcid.org/0000-0002-2885-3174>



### Melis İNCİ GİRAY

05.05.1993 tarihinde Gölcük'te doğdu. İlköğrenimi Gölcük'te, lise öğrenimini Ankara'da tamamladı. Namık Kemal Üniversitesi Çorlu Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümünden 2017 yılında mezun oldu. 2018-2019 yıllarında İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalında Tezsiz Yüksek Lisans eğitimini tamamladı. 2017 yılından itibaren Kırklareli ilinde bulunan Seleda Biyogaz Enerji ve Sanayi Ticaret Anonim Şirketinde Çevre Mühendisi olarak çalışmaktadır. 2020 yılında Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans eğitimine başladı. Evli ve 1 erkek çocuğu annesidir.

**İletişim** melisinci39@gmail.com

**ORCID Adresi** <https://orcid.org/0009-0002-7575-5478>