

**TAVUK GÜBRESİNİN ANAEROBİK PARÇALANMASI
İÇİN UYGUN KOŞULLARIN BELİRLENMESİ**

Aydın KARATAŞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE BİLİMLERİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2006

ANKARA

**TAVUK GÜBRESİNİN ANAEROBİK PARÇALANMASI
İÇİN UYGUN KOŞULLARIN BELİRLENMESİ**

Aydın KARATAŞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE BİLİMLERİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2006

ANKARA

Aydın KARATAŞ tarafından hazırlanan TAVUK GÜBRESİNİN ANAEROBİK PARÇALANMASI İÇİN UYGUN KOŞULLARIN BELİRLENMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç.Dr. İrfan AR
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Çevre Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: : Prof.Dr. Mübeccel ERGUN

Üye : Prof.Dr. Şenol BAŞKAYA

Üye : Doç.Dr. İrfan AR (Danışman)

Üye : Yrd.Doç.Dr. Ferda MUTLU

Üye : Yrd.Doç.Dr. Göksel ÖZKAN

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

**TAVUK GÜBRESİNİN ANAEROBİK PARÇALANMASI
İÇİN UYGUN KOŞULLARIN BELİRLENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Aydın KARATAŞ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Ocak 2006**

ÖZET

Çalışmada, tavuk gübresinin kesikli sistemde anaerobik arıtımı ve gaz üretimi incelenmiştir. Bu amaçla, 250 mL hacimli 14 adet cam reaktör kullanılmıştır. Anaerobik arıtım süresince oluşan gazları toplamak için her bir reaktör dereceli büretlere bağlanmıştır. Reaktörlerin içerisine hammadde olarak tavuk gübresi ve aşı mikroorganizma olarak da anaerobik tanklardan alınan aktif çamur karışımı koyulmuştur. Bu çalışmada, en yüksek anaerobik arıtım ve gaz üretim hızına ulaşmak için sıcaklık (X_1) ve pH'ın (X_2) etkisi incelenmiştir. Deneyler, Box-Wilson deneysel tasarım yöntemine göre tasarlanmıştır. Sonuçlar “Design Expert” paket programı ile istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Program sonucunda, KOİ (Kimyasal oksijen ihtiyacı)'daki azalma yüzdesi (Y_1) ve gaz üretim hızı (Y_2) için model denklemleri ve R^2 değerleri sırasıyla hesaplanmıştır.

$$Y_1 = 45,40 + 6,90 \cdot X_1 + 3,06 \cdot X_2 + 3,54 \cdot X_1 \cdot X_2 - 5,77 \cdot X_1^2 - 4,15 \cdot X_2^2 \quad R^2 = 0,9040$$

$$Y_2 = 3,01 + 0,54 \cdot X_1 - 0,14 \cdot X_2 - 0,30 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,18 \cdot X_1^2 - 0,38 \cdot X_2^2 \quad R^2 = 0,9618$$

Kullanılan modelde KOİ'daki en yüksek azalma yüzdesi 49,32, ($T=36,6^{\circ}\text{C}$ ve $\text{pH}=7,29$); en yüksek gaz üretim hızı 4,15 mL/100 mL.saat, ($T=37,8^{\circ}\text{C}$ ve $\text{pH}=6,96$) olarak bulunmuştur.

Bilim Kodu : 903.1.066
Anahtar Kelimeler : Anaerobik arıtım, gaz üretimi, tavuk gübresi, istatistiksel analiz
Sayfa Adedi : 91
Tez Yöneticisi : Doç. Dr. İrfan AR

DETERMINING THE APPROPRIATE CONDITIONS FOR ANAEROBIC DIGESTION OF CHICKEN MANURE

(M.Sc. Thesis)

Aydın KARATAŞ

GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

January 2006

ABSTRACT

In this study, anaerobic digestion of chicken manure and gas production in a batch system were examined. For this purpose, 14 glass reactors with 250 mL volume each were used. During anaerobic digestion, each reactor was connected to graduated burette in order to collect the produced gas. Chicken manure as raw material and active sludge which was taken from anaerobic tanks as inoculate microorganism were added. In this study, in order to achieve the highest anaerobic digestion and gas production rate, the effects of temperature (X_1) and pH (X_2) were examined. The experiments were designed according to Box-Wilson experimental design method. The results were evaluated, statistically by “Design Expert” package program. As a result of the program % reduction of Chemical Oxygen Demand (Y_1) and for gas production rate (Y_2) model equations and R^2 values were calculated.

$$Y_1 = 45,40 + 6,90 \cdot X_1 + 3,06 \cdot X_2 + 3,54 \cdot X_1 \cdot X_2 - 5,77 \cdot X_1^2 - 4,15 \cdot X_2^2 \quad R^2 = 0.9040$$

$$Y_2 = 3,01 + 0,54 \cdot X_1 - 0,14 \cdot X_2 - 0,30 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,18 \cdot X_1^2 - 0,38 \cdot X_2^2 \quad R^2 = 0,9618$$

The model used in this study predicts that, the highest chemical oxygen demand reduction is 49,32 % (at T = 36,6 °C and pH = 7,29) and the highest gas production rate is 4,15 mL/100mL hour (at T = 37,8 °C, pH = 6,96).

Science Code : 903.1.066

**Key Words : Anaerobic digestion, gas production, chicken manure,
statistical analysis**

Page Number: 91

Adviser : Assoc. Prof. Dr. İrfan AR

TEŞEKKÜR

Çalışma boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren sayın hocam Doç.Dr. İran AR'a, model çalışmalarında ve laboratuvar olanakları konusunda gösterdiği yardımlardan dolayı sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Ferda MUTLU' ya laboratuvarında ve model çalışmasında çözüm yöntemindeki katkılarından dolayı çok değerli arkadaşlarım Esra ÖZTÜRK ve Gülşah KILIÇ'a, ASKİ laboratuvarlarında çalışan Figen YILDIZ'a, laboratuvarında çalışan tüm çalışma arkadaşlarıma , manevi destekleriyle hiçbir zaman beni yalnız bırakmayan aileme ve çok değerli arkadaşım Nihan CEREN'e teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xvi
RESİMLERİN LİSTESİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xviii
1. GİRİŞ	1
2. KURUMSAL TEMELLER	3
2.1. Anaerobik Parçalanma ve Biyogaz	3
2.2. Biyogazın Özellikleri	3
2.3. Biyogaz Üretiminin Dünyada ve Türkiye’deki Gelişimi	5
2.3.1. Biyogaz üretiminin dünyadaki gelişimi	5
2.3.2. Biyogaz üretiminin Türkiye’deki gelişimi	7
2.4. Biyogaz Üretiminin Mikrobiyolojisi.....	7
2.4.1. Polimerik bileşiklerin hidrolizi	9
2.4.2 Hidrolizle oluşan bileşiklerin organik asitlere dönüşümü (Asit oluşumu)	9
2.4.3. Asetik asit oluşumu	10
2.4.4. Metan oluşumu	11
2.5. Biyogaz Üretim Niceliğini ve Hızını Etkileyen Etkenler	12
2.5.1. Sıcaklık.....	13

	Sayfa
2.5.2. Hidrojen iyonu derişimi (pH)	14
2.5.3. Karıştırma	14
2.5.4. Alıkoyulma süresi	15
2.5.5. Karbon/azot oranı	15
2.5.6. Katı madde içeriğı	15
2.5.7. Aşılama.....	16
2.5.8. Toksik etkiler.....	16
2.6. Biyogaz Üretiminde Kullanılabilecek Atıklar	17
2.6.1. Tavuk gübresi ve diğer atıkların özellikleri	18
2.7. Biyogaz Kullanım Alanları	21
2.7.1. Biyogazın ısıtmada kullanımı.....	22
2.7.2. Biyogazın aydınlatmada kullanımı.....	22
2.7.3. Biyogazın motorlarda kullanımı.....	23
2.7.4. Yan ürün değerlendirme imkanı.....	23
2.8. Biyogaz Üretimde Kullanılan Anaerobik Reaktör Teknolojileri	23
2.8.1. Sabit kubbeli reaktörler	25
2.8.2. Hareketli kubbeli reaktörler.....	25
2.8.3. Torba reaktör	26
2.8.4. Sabit film reaktörleri	26
2.8.5. Yukarı akışlı anaerobik biyoreaktör	26
2.8.6. Yatay-engelli reaktörler.....	27
2.8.7. Anaerobik havuz	27
2.8.8. Karıştırmalı reaktörler	28

	Sayfa
2.8.9. Tapa akışlı biyoreaktörler.....	28
2.8.10. Temas biyoreaktör (Contact bioreactor).....	28
2.8.11. Asit fazlı biyoreaktörler	29
2.8.12. Akışkan yataklı anaerobik biyoreaktörler	29
2.8.13. Yukarı akışlı filtreli kombine biyoreaktör.....	29
2.8.14. Ardışık kesikli anaerobik reaktörler	30
2.8.15. Hibrit biyoreaktörler.....	30
2.9. Biyogaz Üretimde Kullanılan Sistemler	31
2.9.1. Sürekli beslemeli fermentasyon	31
2.9.2. Beslemeli-kesikli fermentasyon	32
2.9.3. Kesikli fermentasyon.....	32
2.10. Anaerobik Biyoteknolojilerin Üstünlükleri ve Sakıncaları.....	32
2.11. Deneylerin Çok Faktörlü Planlanması (Box-Wilson Yöntemi).....	35
3. KAYNAK ARAŞTIRMASI	42
4. METERYAL VE METOT.....	49
4.1. Deneylerde Kullanılan Tavuk Gübresinin Bileşimi ve Özellikleri	49
4.2. Deney Düzenegi	49
4.3. Deneysel Parametrelerin Belirlenmesi	51
4.3.1. Sıcaklık.....	52
4.3.2. pH.....	52
4.3.3. Karıştırma.....	52
4.3.4. Katı madde oranı	53
4.3.5. Bekleme süresi	53

	Sayfa
4.4. Analiz Yöntemleri	53
4.4.1. Toplam katılar	54
4.4.2. Toplam uçucu katı (Organik madde içeriği) tayini	54
4.4.3. Toplam sabit katı (İnorganik madde içeriği) tayini	55
4.4.4. Toplam organik karbon içeriği	55
4.4.5. pH	56
4.4.6. Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ)	56
4.4.7. Azot tayini (Kjeldahl metodu).....	58
4.4.8. Gaz hacmi.....	60
4.5. Box – Wilson Deneysel Tasarım Yöntemi ile Anaerobik Arıtım ve Gaz Üretimi için Optimum Koşulların Bulunması	60
5. DENEYSEL SONUÇLAR	62
5.1. Başlangıç Analiz Sonuçları	62
5.2. Deney Sonuçları	62
5.2.1. KOİ analiz sonuçları	62
5.2.2. Gaz hacimleri ve üretim hızları.....	63
6. BOX WILSON DENEYSEL TASARIM YÖNTEMİ İLE OPTİMUM KOŞULLARIN BELİRLENMESİ	65
6.1. KOİ’ daki Azalma Miktarı (%) için Elde Edilen Sonuçlar.....	66
6.1.1. KOİ’ daki azalma miktarı (%) için model denkleminin kurulması.....	66
6.1.2. 24. saat sonundaki KOİ’ daki azalma miktarı (%) için ANOVA testi sonuçları	68
6.1.3. 24. saat sonunda deneysel ve modelden belirlenen KOİ azalma miktarlarının (%) karşılaştırılması	69

	Sayfa
6.1.4. 24. saat sonundaki KOİ' daki azalma miktarı (%) için optimum koşulların belirlenmesi	71
6.1.5. 24. saat sonunda KOİ' daki azalma miktarı (%) için cevap yüzey eğrilerinin çizilmesi	72
6.2. Gaz Üretim Hızı için Elde Edilen Sonuçlar	73
6.2.1. Gaz üretim hızı için model denkleminin kurulması	73
6.2.2. Gaz üretim hızı için ANOVA testi sonuçları	75
6.2.3. Gaz üretim hızı için deneysel ve modelden hesaplanan değerlerin karşılaştırılması	75
6.2.4. Gaz üretim hızı için optimum koşulların belirlenmesi	77
6.2.5. Gaz üretim hızı için cevap yüzey eğrilerinin çizilmesi	78
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	80
KAYNAKLAR	84
EKLER	88
EK-1 KOİ'deki Azalma Yüzdesi için Design Expert Paket Programında Bulunan Değerler	89
EK-2 Gaz Üretim Hızı için Design Expert Paket Programında Bulunan Değerler	90
ÖZGEÇMİŞ	91

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Biyogazın bileşimi	4
Çizelge 2.2. Organik madde içeriğine göre biyogaz miktarı, ısı değeri ve bileşimi	4
Çizelge 2.3. Biyogazın diğer gazlarla karşılaştırılması.....	5
Çizelge 2.4. Başlıca anaerobik mikroorganizma grupları	8
Çizelge 2.5. Enzimatik hidrolize katkıda bulunan mikroorganizmalar.....	9
Çizelge 2.6. Asit oluşturan organizmalar ve oluşturdıkları asitler	10
Çizelge 2.7. Bazı maddelerin anaerobik işlemi durdurucu derişimleri.....	16
Çizelge 2.8. Tavuk atığının gübre olarak besin bileşimi.....	19
Çizelge 2.9. Nem düzeyine göre tavuk gübresinin bileşimi.....	19
Çizelge 2.10. Biyogaz üretilmiş ve normal koşullarda elde edilmiş gübrelerin kimyasal özellikleri.....	20
Çizelge 2.11. Besleme materyalinin özellikleri	20
Çizelge 2.12. Çeşitli kaynaklardan elde edilebilecek biyogaz verimleri ve biyogazdaki metan miktarları	21
Çizelge 2.13. Bazı yakıt türlerinin biyogaz ile karşılaştırılması	22
Çizelge 2.14. Anaerobik arıtım sistemlerinin üstünlükleri ve sakıncaları	34
Çizelge 2.15. 4400 kg BOI / günlük bir atıksuyun anaerobik (Akışkan Yataklı Reaktör) ve aerobik olarak arıtımının karşılaştırılması	34
Çizelge 2.16. İki değişken için etken, eksen ve merkez noktaları	38
Çizelge 2.17. İki faktörlü ikinci dereceden plan matrisi	39
Çizelge 2.18. Farklı sayıdaki değişkenler için n_0 ve α değerleri.....	40
Çizelge 2.19. ANOVA testinde kullanılan değerler.....	41

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Sığır ve tavuk gübrelerinin değişik sıcaklıklarda biyogaz verimleri	43
Çizelge 3.2. Tavuk ve büyükbaş hayvan işletmelerinin hayvan sayılarına bağlı olarak kurabilecekleri biyogaz tesislerinin; büyüklüğü, günlük biyogaz üretimleri ve bu gazın etkili eşdeğer ısı karşılığı LPG miktarları	44
Çizelge 4.1. Tavuk gübresi ve anaerobik tanklardan alınan aktif çamurun özellikleri.....	49
Çizelge 4.2. Deneysel tasarım değişkenleri, seviye ve aralıkları	60
Çizelge 4.3. Deneysel tasarım matrisinin kodlanmış ve doğal değerleri ile 2 ² faktöriyel merkezi bileşim değerleri	61
Çizelge 5.1. Tavuk gübresi özellikleri	62
Çizelge 5.2. 24. saat sonundaki KOİ miktarları ve % KOİ azalımı	63
Çizelge 5.3. Reaktörlerde 24. saat sonunda oluşan gaz miktarları ve üretim hızları	64
Çizelge 6.1. Deneysel tasarım yönteminde kullanılan bağımsız değişkenler	65
Çizelge 6.2. Deneysel tasarım yönteminde kullanılan bağımlı değişkenler	65
Çizelge 6.3. pH ve sıcaklık değerleri ile 24. saat sonunda elde edilen KOİ yüzde azalma miktarları ve gaz hacimleri.....	66
Çizelge 6.4. KOİ azalma yüzdesi için parametreler arasında ihmal yapılmadan bulunan katsayılar ve istatistiksel hesaplamalar.....	67
Çizelge 6.5. 24 saat sonundaki KOİ' daki azalma yüzdesi için ANOVA testi Sonuçları	69
Çizelge 6.6. KOİ' daki azalma yüzdesi için deneysel olarak bulunan ve modelden hesaplanan Y değerleri ve % hata değerleri	70
Çizelge 6.7. KOİ' daki azalma yüzdesini optimum yapan parametre değerleri.....	71
Çizelge 6.8. Gaz üretim hızı için parametreler arasında ihmal yapılmadan bulunan katsayılar ve istatistiksel hesaplamalar	73

Çizelge	Sayfa
Çizelge 6.9. 24 saat sonundaki gaz üretim hızı için ANOVA testi sonuçları	75
Çizelge 6.10. Gaz üretim hızı için deneysel olarak bulunan ve modelden hesaplanan Y değerleri ve % hata oranı	76
Çizelge 6.11. Parametrelerin en yüksek gaz üretim değerlerindeki optimum değerleri	77

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Organik maddelerin anaerobik ayrışma aşamaları.....	8
Şekil 2.2. Polimerik bileşiklerden asit oluşumu.....	10
Şekil 2.3. Organik asitlerden asetik asit oluşumu	10
Şekil 2.4. Metan oluşumu	11
Şekil 2.5. Çeşitli anaerobik biyoreaktörler.....	31
Şekil 4.1. Gaz toplama düzeneği.....	51
Şekil 6.1. Deneysel olarak bulunan ve modelden hesaplanan KOİ' daki azalma miktarlarının (%) karşılaştırılması	71
Şekil 6.2. KOİ' daki azalma yüzdesi üzerine sıcaklık ve pH'ın etkisi.....	72
Şekil 6.3. KOİ' daki azalma yüzdesi üzerine sıcaklık ve pH'ın etkisi için contour plot	73
Şekil 6.4. Deneysel olarak bulunan ve modelden hesaplanan gaz üretim hızlarının karşılaştırılması.....	77
Şekil 6.5. Gaz üretim hızı üzerine sıcaklık ve pH'ın etkisi.....	78
Şekil 6.6. Gaz üretim hızı üzerine sıcaklık ve pH'ın etkisi için contour plot	79

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Deney düzeneği.....	50

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
C/N	Karbon/azot oranı
C_t	Toplam karbon içeriği
I_m	İnorganik madde içeriği
I, j	1'den değişken sayısı kadar değişir
K	Parametre sayısı
No	Merkez noktada yapılan deney sayısı
Om	Organik madde içeriği
U_i	i parametresinin kodlanmış değeri
Y	Bağımlı değişken
Y_1	24. Saatteki KOI'daki azalma %
Y_2	24. Saatteki biyogaz üretim hızı, ml/100m.sa
X_1	Sıcaklık, $^{\circ}C$
X_2	pH
X_{io}	i parametresinin ortalama değeri
X_i	i parametresinin gerçek değeri
ΔX_i	i parametresinin adım aralığı
β_0	Kayma
β_i	Doğrusal modelin katsayıları
β_{ij}	Karesel modelin katsayılarını
α	Uç nokta değerleri
ε	Y için hata
η	Cevap yüzeyi

Kısaltmalar	Açıklama
ANOVA	Analysis of Variance
DAS	Demir 2 Amonyum Sülfat
HKT	Hata kareler toplamı
HKO	Hata karelerinin oranı
HAS	Uzun katı alıkonma süresi
KM	Kuru madde
KOİ	Kimyasal oksijen ihtiyacı
MKT	Model karelerinin toplamı
MKO	Model karelerinin oranı
OKM	Organik kuru madde
THKT	Toplam hata kareler toplamı
TKM	Toplam katı madde
UKM	Uçucu katı madde

1.GİRİŞ

Dünyanın pek çok ülkesinde olduğu gibi Türkiye’de de endüstrileşme ve nüfus artışı yüzünden hızla büyüyen bir enerji gereksinimi gözlenmektedir. Fosil yakıtlardan elde edilen enerjinin tükenme sınırına yaklaşmış olması, ekonomik olarak kullanıma uygun teknolojilerle yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanılması gerekliliğini doğurmuştur. Biyogaz teknolojisi uygulanabilir, önemli yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde yer almaktadır.

Biyogaz üretimi aslında küçük ölçekli bir anaerobik arıtma sistemidir. Başta hayvan dışkısı olmak üzere lağım suları, kültür bitkilerinin artıkları, gıda işleme ve kağıt işleme fabrikalarının artıkları, yabani otlar ve su bitkileri olmak üzere pek çok organik atık biyogaz üretiminde kullanılabilir.

Türkiye jeotermal, güneş, rüzgar ve biyokütle gibi temiz ve yenilenebilir enerji kaynakları açısından çok iyi bir konumda olmasına karşın bu potansiyelin üretime kazandırılması yönündeki çalışmalara henüz gereken önemin verildiği söylenemez.

Gelişmekte olan diğer ülkelerde olduğu gibi ülkemizde de ekonomik gelişmeler ve nüfus artışı her geçen gün enerji gereksiniminin artmasına neden olmaktadır. Bu enerji gereksinimi ülkemizde genellikle fosil yakıtlardan ve hidrolik kaynaklardan karşılanmaktadır. Ancak istemi karşılayamaz duruma gelen bu kaynakların kullanımı yoğun bir çevre kirliliğine neden olmaktadır. Doğada alıcı ortamların kirlilik özümleme kapasitelerinin hızla aşılmakta olduğu ve enerji darboğazı ile karşı karşıya kaldığı düşünüldüğünde ucuz, temiz ve sürdürülebilir bir enerji politikası izlenmesi zorunlu hale gelmiştir.

Bu enerji politikası ancak yenilebilir enerji kaynaklarının kullanımını içerdiği sürece çevrebilimsel ve ekonomik açıdan verimli olacaktır. Biyokütle enerjisi yenilebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yere sahiptir. Anaerobik biyoteknoloji, çevre kirliliğine neden olan atıkların arıtımını sağlaması hem de değerli bir yan ürün olan metan gazı üretebilmesi nedeniyle yenilenebilir enerji kaynakları arasında dikkat

çekmektedir. Ayrıca, işletme ve yatırım maliyetlerinde büyük üstünlüklerinden dolayı, dünyanın bir çok bölgesinde anaerobik biyoteknolojinin katı-sıvı bütün organik maddelerin giderilmesinde kullanımı giderek artmaktadır. Yoksul ülkelerde yerel olanaklarla yapılan ilkel üretim girişimlerinin yanı sıra, zengin ülkelerde biyogaz teknolojisi endüstriyel anlamda da uygulanmaktadır. Biyokütle enerjisinin sanayileşmiş ülkelerdeki birincil enerji tüketimindeki payı genel olarak %3' ün altında ise de bazı ülkeler bu kaynağı önemli ölçüde kullanmaya başlamıştır. Örneğin, Finlandiya % 15, İsveç %9, ABD %4, eski SSCB ülkeleri %3-4 oranında biyokütle enerjisi kullanmaktadır. ABD ve Avrupa ülkelerinde çeşitli büyüklüklerde binlerce işleyen tesis vardır ve sayıları hızla artmaktadır (1).

Türkiye'de yaygın olarak tavuk çiftliği atığı üretilmektedir. Üretilen bu atıklar önemli miktarda biyogaz potansiyeli oluşturmaktadır. 2000 yılında yapılmış olan bir çalışmada, tavuk gübresinin biyogaz miktarı ve eşdeğer enerji potansiyeli hesaplanmıştır. Buna göre tavuk üretme çiftlikleri kaynaklı yaş atık miktarı 14×10^6 ton/yıl olduğu hesaplanmıştır. Bu atıklardan elde edilecek metan gazı miktarı tavuk yaş atığı için 426×10^6 m³/yıl olarak bulunmuştur. Bulunan bu değer enerji potansiyeli olarak karşılığı, 533 Gwh/yıl'dır. Bu atıkların %100 verimle biyogaza dönüştürüldüğü düşünüldüğünde, Türkiye 1998 yılı enerji gereksinimine (114 024 Gwh) oranı % 0,46 olarak hesaplanmıştır (2).

Bu rakamlar gösteriyor ki tavuk gübresi, Türkiye için önemli bir enerji potansiyeli oluşturmakta ve bu potansiyelin kullanılması gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada ki asıl amaç, tavuk gübresinin anaerobik arıtımını ve en iyi gaz üretimini sağlayacak, optimum pH ve sıcaklık değerlerini Box –Wilson deney tasarım yöntemine göre belirlemektir.

2. KURUMSAL TEMELLER

2.1. Anaerobik Parçalanma ve Biyogaz

Anaerobik parçalanma, mikroorganizmaların organik atıkları moleküler oksijen yokluğunda metan, karbondioksit, hücresel ve diğer organik maddelere çevirdiği biyolojik bir süreçtir. Anaerobik parçalanma sonucunda biyogaz açığa çıkar. Çıkan gazın içeriğini büyük oranda metan (CH_4) gazı oluştururken, diğer kısmını karbondioksit (CO_2), hidrojen sülfür (H_2S), azot (N_2) gibi gazlar oluşturmaktadır (3).

Biyogaz üretiminde kullanılan atıklar organik kökenli olup içeriğinde karbonhidrat (selüloz), protein ve ham yağlar mevcuttur. Başlıca kullanılan atıklar, hayvansal, bitkisel ve insan kökenlidir. Atık türüne göre karbonhidrat, protein ve yağ içeriği değişiklik gösterir. Örneğin tavuk gübresinde organik maddelerin büyük bir bölümünü proteinler daha az bir bölümünü karbonhidrat ve ham yağlar oluştururken, sığır gübresinde organik maddenin büyük bir bölümünü selüloz oluşturur (4).

2.2. Biyogazın Özellikleri

Biyogaz renksiz, kokusuz havadan daha hafif, havaya göre yoğunluğu 0.83, oktan sayısı yaklaşık 110, yanma sıcaklığı 700°C , alev sıcaklığı 870°C olan bir gaz karışımıdır (4). Gaz bileşimi sabit olmayıp ortam sıcaklığına, su miktarına, asiditesine (pH) ve kullanılan gübrenin bileşimine göre değişmektedir. Buna göre, tipik bir biyogazın bileşimi Çizelge 2.1.'deki gibidir (5).

Çizelge 2.1. Biyogazın bileşimi

Gazın cinsi	Yüzde Bileşimi
Metan (CH ₄)	54-80
Karbondioksit (CO ₂)	20-45
Azot (N ₂)	0-1
Karbonmonoksit (CO)	0.1
Oksijen (O ₂)	0.1
Hidrojen Sülfür (H ₂ S)	Az Miktarda

Biyogazın yakıt değeri karışımındaki metan gazından ileri gelmektedir. Biyogazın ısı değeri metana bağlı olarak 17 000 – 25 000 kJ / Nm³ arasında değişmektedir (Çizelge 2.2) (6).

Biyogaz içerisinde bulunan metan yanma ve ısı değeri olarak diğer yanıcı gazlara benzerken diğer fiziksel özellikleri, özellikle propan ve bütan gazlarından farklılık gösterir (Çizelge 2.3) (1). Bu gazlar oda sıcaklığında düşük basınç ve sıcaklıklarda sıvılaştırılırken, biyogazın sıvılaştırılması çok yüksek basınç ve düşük sıcaklık gerektirir. Bu da ekonomik olarak mümkün değildir. Biyogaz kolayca bozunmayan sabit bir yapıya sahiptir ve ancak -164 °C de sıvı hale gelebilir. Bundan dolayı nakil boru hatları aracılığıyla ancak 300 - 500 metre uzağa taşınabilir (7).

Çizelge 2.2. Organik madde içeriğine göre biyogaz miktarı, ısı değeri ve bileşimi

Organik madde	Elde edilen Biyogaz cm ³ /g	Bileşimi %	Isıl değeri KJ/Nm ³
Karbonhidratlar	800	50 CH ₄ – 50 CO ₂	17 782
Proteinler	700	70 CH ₄ – 30 CO ₂	24 894
Organik Yağlar	1200	67 CH ₄ - 30 CO ₂	23 639

Çizelge 2.3. Biyogazın diğer gazlarla karşılaştırılması

Gazlar	Semboller	Bileşimi %	Isıl Değeri Kw-h/m ³	Yoğunluğu D=1,2 kg/m ³	Yanma Hızı cm/s	Hava İhtiyacı m ³
Metan	CH ₄	100	9,94	0,554	43	9,5
Propan	C ₃ H ₈	100	29,96	1,560	57	23,8
Bütan	C ₄ H ₁₀	100	34,02	2,077	45	30,9
Dogalgaz	CH ₄ – H ₂	65-35	7,52	0,384	60	7,0
Sıvı Gazlar	CH ₄ -H ₂ - N ₂	26-50- 24	4,07	0,411	82	3,7
Biyogaz	CH ₄ – CO ₂	60-40	5,96	0,940	40	5,7

Diğer yanıcı gazların kullanıldığı yerlerde biyogaz da kullanılabilir. Biyogaz hava ile 1/20 oranında karıştırılırsa yüksek patlama meydana getirir. Gaz borularındaki sızıntı büyük tehlike uyandırır. Ancak biyogaz içerisindeki hidrojen sülfür çürük yumurta kokusu oluşturarak kötü bir durum oluştursa da bu tür boru kaçaklarındaki sızıntıların belirlenmesinde etkin rol oynar. Hidrojen sülfürün bir diğer etkisi ise, suyla tepkimeye girerek, korozif etki göstermesi ve bu nedenle boru çeperlerinde aşınmalara neden olmasıdır (8).

2.3. Biyogaz Üretiminin Dünyada ve Türkiye’deki Gelişimi

2.3.1. Biyogaz üretiminin dünyadaki gelişimi

Biyogazla ilgili ilk araştırmalar 17. yüzyılda Jan Baptista Van Helmont tarafından, organik maddelerin oksijensiz ortamda parçalanması sonucu yanabilen bir gazın çıktığının belirlenmesiyle başlamıştır (29). Daha sonra yanabilen bu gazın parçalanmış organik madde miktarıyla orantılı olduğu, 1776 yılında Alessandro Volta tarafından kanıtlanmıştır. Volta tarafından göl tortul tabakalarından gaz kabarcıklarının çıktığını gözlemesi ve bu tabakalardan aldığı örneklerde yaptığı deneylerde ürettiği gaza 1787 yılında Lavoisier ve diğer araştırmacılar tarafından “Karbonlu Hidrojen” adı verilmiş

ve bu terim 1865'te Uluslararası Kimya Kongresinde "metan" olarak kabul edilmiştir (9).

Bilimsel anlamda biyogazla ilgili ilk araştırmalar 1808 yılında Sir Humphry Davy tarafından sığır gübresinden oksijensiz ortamda biyogazın üretilmesiyle başlamasına rağmen biyogazın uygulamalı ve ticari kullanımı 1840 ta Yeni Zelanda'nın Otowa kentinde ve 1859'da Hindistan'ın Bombay kentinde bir koloni tarafından biyogaz üreteçlerinin kurulması ile başlamıştır. 1985' te İngiltere'nin Exeter özel kanalizasyon sistemleriyle üretilen biyogaz sokak lambalarında aydınlatma amacıyla kullanılmıştır (9).

Anaerobik arıtım mikrobiyolojisi ile ilgili çalışmalar ise 1930'larda Buswell tarafından anaerobik bakterilerin tanımlanması ve anaerobik işlem için optimum koşulların belirlenmesi ile başlamıştır (10).

Anaerobik arıtım çalışmaları, II. Dünya savaşına kadar sürmüş ancak II. Dünya savaşıyla ortaya çıkan petrol bunalımı ile özellikle Avrupa'da, biyogazın yakıt olarak kullanımı gündeme gelmiştir. 1940-1970 yılları arasında Kuzey Amerika ve Avrupa'da, çamur kararlılaştırılması tekniklerinin ve anaerobik reaktörlerin kullanımının geliştiğı görölmektedir. 1950-1970 arasında ise Hindistan, Çin ve Güneydoğı Asya' da küçük çiftlik tipi anaerobik reaktör hızla çoğalmıştır. 1960'larda endüstriyel atıklardan kaynaklanan çevre kirliliğinin gündeme gelmesi ile anaerobik sistemler, hem enerji üretimi, hem de çevre kirliliğinin önlenmesi amacıyla geliştirilmiş ve kullanılmıştır. 1973 petrol krizi ile anaerobik sistemler bütün dünyada gelişme göstermiş, biyogazın kullanımı ile ilgili enerji politikaları ve programları uygulamaya koyulmuştur. Bu yıllarda Hindistan ve Çin, anaerobik reaktörlerden üretilen enerjiyi şehirlerde elektrik enerjisi gereksinimini karşılamak amacıyla kullanmıştır (10).

1985'den başlayarak biyokütle enerjisi, enerji planlanmalarında önemli bir potansiyel oluşturmuş ve anaerobik arıtımla ilgili çalışmalar, projeler ve programlar gelişmeye başlamıştır. 1990'lardan sonra, gelişmiş ülkeler teknolojik gelişmelere koşut olarak,

merkezi biyogaz tesisleri kurarak, enerji gereksinimlerinin bir bölümünü bu tesislerden karşılamaktadırlar (41). Dünyada, 1990-2000 yılları arasında, 47'si Almanya'da, 22'si Danimarka'da ve Avusturya, İsveç ve İsviçre'de 10'ar adet olmak üzere toplam 135 adet merkezi biyogaz üretim tesisi kurulmuş ve işletilmiştir. Bu tesislerde yıllık 11 472 Mton evsel ve endüstriyel organik atıklar ile hayvan gübreleri anaerobik olarak arıtılmaktadır (11).

2.3.2. Biyogaz üretiminin Türkiye'deki gelişimi

Tüm dünyada önemli bir uygulama alanı olan biyogaz üretim teknolojileri her geçen gün gelişmesine rağmen, Türkiye'de biyogaz konusunda yapılmış çalışmalar neredeyse yok denecek kadar azdır. Başlangıçta akademik düzeyde ele alınmış olan bu çalışmalar, 1960'larda çeşitli lisansüstü çalışmalarla başlamış ve daha sonra projelere bağlı düzenli çalışmalara başlanarak Eskişehir Toprak Su Araştırma Enstitüsünde bir biyogaz üretici kurulmuştur. Daha sonraki yıllarda biyogaz üretimi ile ilgili önemli bir gelişme sağlanamamıştır. Ancak günümüzde konunun önemi daha iyi anlaşılmakta ve konuyla ilgili bilimsel çalışmalarda artış gözlenmektedir.

2.4. Biyogaz Üretiminin Mikrobiyolojisi

Biyogazın başarıyla uygulanabilmesi için her şeyden önce teknik olarak yatırım maliyeti karşılığında verimli gaz üretimi sağlayacak tesislerin tasarlanması gereklidir. Bu aşamada malzeme seçimi, mekanizasyon, ısıtma, kontrol ve güvenlik sistemleri gibi mühendislik gerektiren yönlerin yanı sıra, işlemin biyolojik yönünün de iyi bilinmesi gereklidir.

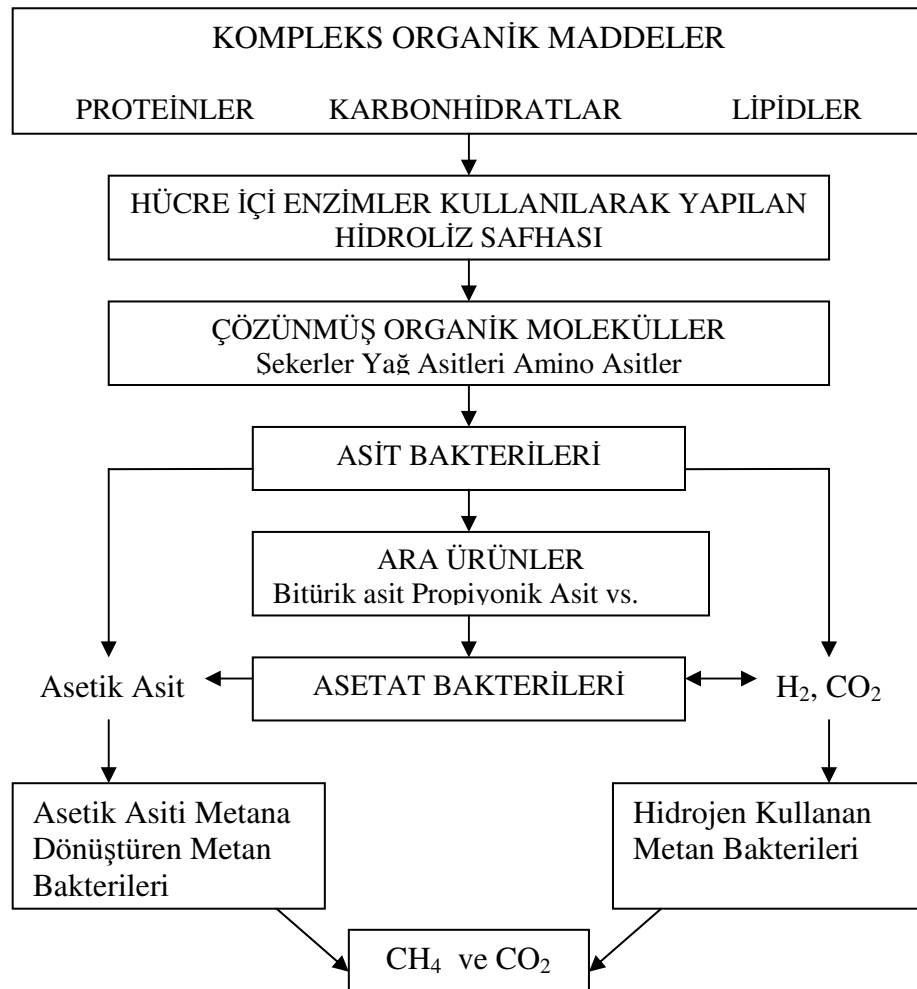
Anaerobik arıtma, birçok mikroorganizma grubunun rol aldığı oldukça karmaşık bir süreçtir. Ancak asıl görevi üstlenen bakteriler, asit ve metan bakterileridir. Asit ve metan bakterileri kendi aralarında alt gruplara ayrılmaktadır (Çizelge 2.4) (3).

Metan üreten bakterilerin yaşaması, ortamda oksijen olmamasına bağlıdır. Buna göre, metan oluşumu doğada ancak bataklık, gübre yığınları, çöplükler ve hayvan

sindirim sistemleri gibi anaerobik yani serbest oksijenin olmadığı sistemlerde gerçekleşebilir (12).

Çizelge 2.4. Başlıca anaerobik mikroorganizma grupları

BAKTERİ TİPİ	ANAEROBİK ARITMADA İŞLEVİ
ASİT BAKTERİLERİ	Uçucu Yağ Asidi Üretenler (Acidogens)
ASETAT BAKTERİLERİ	Asetat ve Hidrojen Üretenler (Acetogens)
METAN BAKTERİLERİ	Asetat Dekarboksilasyonu ile Metan Üretimi
	Karbondiyoksit İndirgenmesi ile Metan Üretenler (Methanogens)



Şekil 2.1. Organik maddelerin anaerobik ayrışma aşamaları (3)

Anaerobik fermentasyon yani biyokütlelerin oksijensiz ortamda metan ve karbondioksit dönüşümü dört basamakta açıklanabilir (13).

2.4.1. Polimerik bileşiklerin hidrolizi

Çözünemeyen kompleks organik moleküllerin organizmalar yardımı ile enzimatik olarak çözünebilen organik moleküllere dönüşümün gerçekleştiği basamaktır.

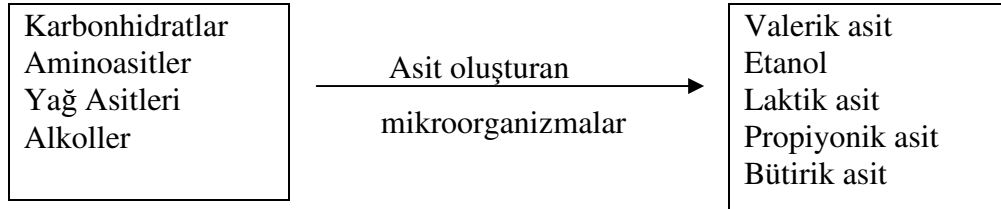
Enzimatik hidrolize katkıda bulunan mikroorganizmalar Çizelge 2.5’ de verilmiştir. Bu basamakta proteinler, aminoasitlere; yağlar, yağ asitlerine ve gliserine; nişasta, glikoz ve dekstroza; selüloz, glikoza hidrolize olurlar (13).

Çizelge 2.5. Enzimatik hidrolize katkıda bulunan mikroorganizmalar

Hidroliz	Mikroorganizma
Protein Hidrolizi	<i>E. coli, Clostridia, S. cerevisia, Küfler</i>
Yağ Hidrolizi	Anaerobik bakterilerin çoğu, mayalar, Küfler
Nişasta Hidrolizi	<i>Clostridia, Bacillus, Aspergillus</i>
Selüloz Hidrolizi	<i>Trichoderma, Thermomonospora, Clostridia, Küfler</i>

2.4.2 Hidrolizle oluşan bileşiklerin organik asitlere dönüşümü (Asit oluşumu)

Hidrolize uğrayan polimerik bileşiklerden oluşan moleküller (glikoz, dekstroz, amino asit, yağ asidi, alkol vb.) asit oluşturan mikroorganizmalar yardımıyla organik asitlere (valerik, bütirik, propiyonik) ve alkollere dönüşür. Asit oluşturan organizmalar ve oluşturdıkları asitler Çizelge 2.6’ da verilmiştir (13).



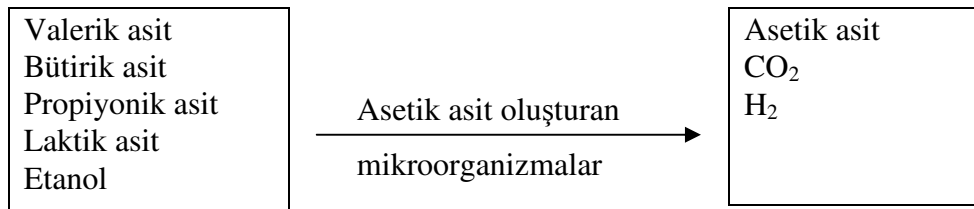
Şekil 2.2 Polimerik bileşiklerden asit oluşumu

Çizelge 2.6. Asit oluşturan organizmalar ve oluşturdıkları asitler

Mikroorganizmalar	Asit
<i>E. coli</i> , <i>E. Aerogenes</i>	Formik, Asetik, Butandiol, Asetoin, CO ₂ , H ₂
<i>Propionibacteriae</i>	Propiyonik, CO ₂ , H ₂
<i>Lactobacillus</i> , <i>Streptococcus</i> , <i>Leuconoctoc</i>	Lactic, Etanol, CO ₂
<i>Clostridia</i>	Valerik, Bütirik, Bütinol, Asetoin, CO ₂ , H ₂
<i>Sacharomyces sp.</i>	Ethanol, CO ₂

2.4.3. Asetik asit oluşumu

İkinci basamakta oluşan organik asitler bir grup anaerobik mikroorganizma aside dönüştürülürler (6).

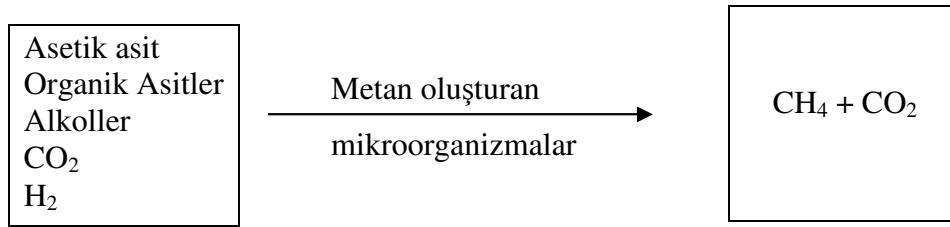


Şekil 2.3. Organik asitlerden asetik asit oluşumu

Bu basamakta fonksiyon gösteren başlıca mikroorganizmalar *Enterobacter sp.* (*E. coli*, *E. aerogenes*), *Clostridia sp.* (*C. acetivum*) vb. dır.

2.4.4. Metan oluşumu

Üçüncü basamakta oluşan asetik asit, CO_2 , H_2 , metan oluşturan mikroorganizmalar yardımıyla metana dönüştürülürler. Bu aşamada metanın %70'i, asetik asidin oluşmaktadır (8).



Şekil 2.4. Metan oluşumu

Metan oluşturan bakterilerden bazıları; *Methanobacter sp.*, *Methanococcus sp.*, *Methanovibrio*, *Methanovibrio sp.* ve *Methanobacillus sp.* dir.

Anaerobik fermantasyonun dördüncü aşamasında devreye giren ve metan oluşumunu sağlayan metan bakterileri, fermantasyon ortamının sıcaklığına göre üç gruba ayrılır.

Bunlar;

- 1- Sakrofilik (Psychrophilic) Bakteriler: Optimum etkinlik sıcaklığı 25°C ,
- 2- Mezofilik (Mesophilic) Bakteriler: Optimum etkinlik sıcaklığı 36°C ,
- 3- Termofilik (Thermophilic) Bakteriler: Optimum etkinlik sıcaklığı 55°C ,

Sakrofilik bakteriler deniz ve göl diplerindeki tortullar ile bataklıklar, termofilik bakteriler ise yüksek sıcaklıklardaki volkanik ve jeotermal bataklıklar içerisinde yaşamaktadırlar. Bu üç bakteri gurubu ile yapılan fermantasyonda, sakrofilik, mezofilik ve termofilik fermantasyon ile aynı adı almaktadır. Bu bakteri gruplarından sakrofilik ve termofilik bakteriler sığır gübresi içerisinde yaşamamaktadır. Sığır gübresinde mezofilik bakteriler bulunmaktadır. Biyogaz

tesisinde sığır gübresi kullanılması durumunda, mezofilik fermantasyon uygulanabilir (8).

Dört basamaklı anaerobik parçalanma sürecinde ya hidroliz (enzimatik) ya da metan oluşumu basamağı hız belirleyici (en yavaş) basamaktır. Hidroliz koşulları anaerobik fermantasyon koşullarından farklı olduğundan ayrı bir reaktörde gerçekleştirilebilir. Asit oluşumu ($T=30-35^{\circ}\text{C}$, $\text{PH}=7-7.5$) ve metan oluşumu ($T=35-40^{\circ}\text{C}$, $\text{pH} = 6.5-7$) iki ayrı reaktörde gerçekleştirilebileceği gibi tek reaktörde de gerçekleştirilebilir ($T=35^{\circ}\text{C}$, $\text{pH}=7$). Son zamanlarda tek biyoreaktör sistemi daha ekonomik olduğundan yeğlenmektedir (13).

Anaerobik parçalanmada H_2S gazı, sülfatın (SO_4) desulfovibrio sp. tarafından indirgenmesi ile oluşur. Ayrıca *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Achromobacter* gibi denitrifiye edici organizmalar NO_3^- ı N_2 gazına dönüştürürler. Böylece, atık maddelerin bileşimine bağlı olarak CH_4 ve CO_2 yanında H_2S ve N_2 gazları da açığa çıkar (13).

2.5. Biyogaz Üretim Niceliğini ve Hızını Etkileyen Etkenler

Fermantasyonu gerçekleştiren farklı mikroorganizmaların değişik koşullardan değişik etkilenecekleri ve bu mikroorganizmalar arasındaki etkileşimler yüzünden bir verim formülü çıkarmak zordur. Ancak bu değişkenlerin genel olarak işlem üzerindeki etkileri verilebilir.

Ayrıca anaerobik arıtımda mikroorganizmaların hem özgül gereksinimleri karşılanmalı hem de optimum çevresel koşullar sağlanmalıdır. Biyogaz üretim hızını etkileyen değişkenler aşağıda verilmiştir (12).

- Sıcaklık
- pH
- Karıştırma

- Alıkoyulma süresi
- Karbon/Azot oranı
- Katı Madde içeriği
- Aşılama
- Toksik Etkiler

2.5.1. Sıcaklık

Sıcaklık, arıtma tesislerinin hem tasarımında hem de işletilmesinde birincil derecede öneme sahip bir parametredir. Anaerobik arıtmada, mikroorganizmaların metabolik etkinlikleri sonucu biyogaz oluşumu kuvvetli bir şekilde sıcaklığa bağlıdır. Anaerobik arıtım için üç sıcaklık aralığı vardır. Bunlar:

Düşük sıcaklık, psikrofilik : 5 – 20 °C

Orta sıcaklık, mezofilik : 20 – 45 °C

Yüksek sıcaklık, termofilik : 50 – 60 °C

Mezofilik ve termofilik koşulların egemen olduğu, 45 – 50 °C arası geçiş bölgesinde, kararlı olmayan işletme koşulları ortaya çıkar. 20 °C' nin altında arıtma verimi büyük ölçüde düşmektedir. Ayrıca, 20 °C' nin altında veya 70 °C' nin üzerinde metan bakterilerinin etkinlikleri azalmaktadır. Bu durum işletme maliyetini artırmakta ve verimi düşürmektedir. Termofilik sistemlerde en uygun sıcaklık 55 °C, mezofilik sistemler için en uygun sıcaklık 35 °C' dir.

Biyogaz üretim miktarının sıcaklık azalışı ile azaldığı, sıcaklığın tekrar optimum sıcaklıklara getirilmesi ile maksimuma ulaştığı belirtilmektedir (14).

Termofilik sistemlerde biyogaz daha hızlı üretilirken, yüksek sıcaklık nedeniyle işlem ekonomik değildir. Ülkemizde kırsal kesimlerin durumu ve hava koşulları da düşünüldüğünde en uygun üretim şekli mezofilik sistem olacaktır.

2.5.2. Hidrojen iyonu derişimi (pH)

pH, mikroorganizmaların davranışlarını ve substratın çözünebilirliğine etki yapan önemli bir parametredir. Bir çok farklı mikroorganizma topluluğunun bulunduğu anaerobik sistemlerde, bakterilerin maksimum gelişmesini sağlayacak bir pH aralığı tutturmak oldukça zordur. Bu yüzden optimum pH aralığı sağlanmalıdır.

Anaerobik bakterilerin, baskın grubu olan asit bakterilerinin en uygun yaşama aralığı pH= 5,5 – 8,0 arasındır. Oysaki, metan bakterilerinin en uygun yaşama aralığı pH = 6,5 – 8,0 arasındadır. Bu yüzden tek kademeli sistemlerde, iki bakteri grubunun da beraber yaşayacağı nötral pH aralığı (6,5 – 7,5) sağlanmalıdır.

pH =6,0 dan küçük olursa metan bakterileri için inhibe edici olmaktadır. Organik asitlerden metan oluşum hızı, asit oluşum hızından düşük olduğundan ortamda genellikle asit birikir ve pH = 4 – 5' e kadar düşebilir. pH = 7' ye getirmek için ortama CaCO_3 ya da Ca(OH)_2 eklenebilir. pH = 8' in üstünde olursa protein bozunması sonucu oluşan amonyak mikroorganizmalar üzerinde zehirleyici etki oluşturur (13).

Bu yüzden pH, anaerobik arıtım sistemlerinde, uygun işletme koşullarının olup olmadığını belirlenmesinde, belirteç değişken olarak kullanılmaktadır.

2.5.3. Karıştırma

Karıştırma ile, üretilen gazın sistemden uzaklaştırılması, sisteme yeni giren malzemenin bakteri içeren malzeme ile karışması, yüzeyde oluşan ve gazın rahat çıkmasını engelleyen tabakanın dağılması ve çökelpmenin önlenmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca karıştırma ile daha homojen bir sıcaklık ve bakteri dağılımı elde edilebilir. Karıştırmada dikkat edilmesi gereken en önemli nokta, aşırı karıştırmanın değişik bakterilerin kendi aralarında oluşturduğu dengeyi bozarak sistemi olumsuz etkileyeceğidir (12).

2.5.4. Alıkoyulma Süresi

Alıkoyulma süresi, tamamen organik maddenin bileşimine ve sıcaklığa bağlıdır. Alıkoyulma süresinin artması, organik maddenin parçalanma hızını artırmaktadır. Ancak en uygun alıkoyulma süresi belirlenmelidir. Örneğin; sığır gübresinde 5 günlük besleme, günlük ve 7 günlük beslemeye göre daha fazla biyogaz verimi sağlamaktadır. Tavuk gübresi kullanımında ise günlük ya da 7 günlük alıkoyulma süresi en iyi sonucu vermektedir (4).

2.5.5. Karbon/azot oranı

Mikroorganizmalar hücre yapılarında ve enerji üretiminde kullanmak için karbon ve azota gereksinim duyarlar. Bu oranın 15/1-45/1 arasında (optimum 30/1) olması istenir. Hayvansal atıklarda bu oran istenilen aralıkta bulunurken bazı tarımsal atıklarda (saman,ot vb.) bu oran istenilen düzeyde değildir. Atıkta bu oran sağlanmamışsa diğer organik maddelerle karıştırılarak istenilen oran elde edilebilir (6,39).

Organik madde içerisinde karbonun en önemli kaynağı karbonhidratlar, azotun kaynağı ise, protein, nitrat ve amonyaktır (6).

Organik atık azot bakımından zengin ise (C/N oranı 10:1 veya daha azı) fermentasyon sırasında amonyak oluşur. Özellikle yüksek pH değerlerinde toksik etki maksimuma çıkar. Azotun az olması durumunda ise (C/N oranı 50/1 veya daha yüksek) bu kez azot eksikliği ve yetersiz tampon kapasitesi oluşur (4).

2.5.6. Katı madde içeriği

Anaerobik arıtımda organik atıkların katı madde içeriği, oluşan biyogazın içerisindeki metan yüzdesini büyük oranda etkilemektedir. Biyoreaktöre doldurulan katı madde oranı % 7 - % 9 arasında olmalıdır. Düşük katı oranlarında havasız ortam

koşullarını sağlamak zorlaşırken, yüksek katı derişiminde bakteriyel etkinliğin yavaşlaması nedeni ile biyogaz üretim hızı düşmektedir.

2.5.7. Aşılama

Organik atıklar havasız ortamda bırakıldıklarında biyogaz oluşum süreci kendiliğinden başlar. Ancak, işletilmekte olan başka bir tesisten alınan çamur yüksek mikroorganizma içerdiği için yeni çalışacak tesise aşılama işlemine alınma süresini kısaltacaktır (12).

2.5.8. Toksik etkiler

Hammadde içerisinde bulunması olası olan DDT, yağ, sabun, deterjan gibi maddeler, biyogaz oluşumunda etkin rol oynayan mikroorganizmalar için belirli düzeyleri aştığında toksik etki yaratmaktadır. Bu maddelerden en önemlileri, amonyak, amonyum iyonu, çözünebilir sülfidler, bakır, çinko ve nikel gibi metallerin tuzlarıdır. Ayrıca gübrenin karıştırılmasında kullanılacak suyun klorlu olmamasına dikkat edilmelidir (6). Bazı maddelerin anaerobik süreçlerde, biyokimyasal olayları durdurucu derişimleri Çizelge 2.7’de verilmiştir (15).

Çizelge 2.7. Bazı maddelerin anaerobik işlemi durdurucu derişimleri

Madde	Toksisite Derişimleri (mg/l)
NH_4^+ , NH_3^+	1 500 – 2 000
H_2S , HS^- , S^{-2}	100-150
K^+	2 500 – 5 000
Na^+	3 500 – 6 000
Ca^+	2 500 – 5 000
Zn^{+2}	1
Ni^{+2}	2
S^{-2}	200
Cu^{+2}	0,5
Mg^{+2}	1 000-1 500

2.6. Biyogaz Üretiminde Kullanılabilecek Atıklar

Biyogaz üretiminde bir çok hammadde kullanılabilir. Ancak bu noktada dikkat edilmesi gereken, hammadde içeriğinin kolaylıkla metana dönüşümünün sağlanabilmesidir. Örneğin, fazla miktarda lignin içeren odundan metan elde etmek ekonomik değildir. Bunun yerine az miktarda lignin içeren bitki atıkları tercih edilmelidir. En fazla biyogaz üretilen organikler sırasıyla, organik yağlar, protein, karbonhidratlardır (6).

Biyogaz üretiminde kullanılabilecek organik atıklar şöyle sınıflandırılabilir (16).

- Bitkisel Atıklar: Sap, saman, mısır atıkları, şekerpancarı yaprakları, fındık kapsülleri, yabani otlar, bitkisel ürün işleyen endüstriyel tesis atıkları , orman endüstrisi atıkları, algler ve yosunlar.
- Hayvansal atıklar: Büyük ve küçükbaş hayvan gübreleri, tavuk ve güvercin gübreleri, mezbaha atıkları, hayvansal ürün işleyen tesislerin atıkları.

- İnsan Atıkları: Atıksu arıtma tesisleri , evsel katı atıklar, yemek atıkları, gıda endüstrisi atıkları (çikolata, maya, süt, içecek üretimi vs.)

Biyogaz üretiminde kullanılabilecek atıklar ve özellikleri aşağıda verilmiştir.

2.6.1. Tavuk gübresi ve diğer atıkların özellikleri

Tavukçulukta, gübre terimi; sindirilmeyen yemlerden ibaret idrar ile karışık hayvan dışkısı ve belirli vücut artıkları ile altlıklı yer kümeslerinde altlık materyali karışımı olarak tanımlanır. Tüm dünyada domuz, sığır ve tavukçuluk işlemlerinden kaynaklanan kirlilik önemli çevresel problemlerden birisi haline gelmiştir. İnsanların çevre kirliliği ve zararlı etkilerine karşı daha duyarlı davranmaları sonucunda, tavukçuluk işletmelerinde atıklar önemle dikkate alınmaya başlanmıştır. Kapasite giderek artmış olan tavukçuluk işlemlerinde gübre ve altlıktan kaynaklanan önemli sorunlar vardır. Bu sorunlardan en önemlileri yapısal düzenin sürdürülmesinde, kokuda, sineklenmede gaz oluşumunda, toz oluşumunda, toprak, su ve hava kirliliğinde gerçekleşmektedir. Bu yüzden gelecekte bir çok gelişmiş ülkede, tavuk başına üretilen atık miktarı azaltılmaya çalışılacaktır. Aynı zamanda tavukçuluktan kaynaklanan bu çevre sorununa karşı anaerobik artım süreçleri kurularak çevresel etkileri azaltılmakta ve yararlı bir gaz olan biyogaz elde edilmektedir (17).

Tavuk dışkısı organik ve inorganik maddelerden oluşmaktadır. Tavuk dışkısının organik kısmı ürik asit, NH_3 tuzları, üre, karetin, kreatinin, iz miktarda amino asitler, ölü bağırsak hücreleri, safra tuzları, pigmentler, hormonlar, vitaminler ve diğer bazı bileşiklerden oluşmaktadır (18).

Tavuk dışkısındaki karbonhidrat miktarı % 35-40 arasında değişmektedir. Bu karbonhidratlar genellikle tavuk tarafından sindirilmeyen selüloz, pentoza ve ligninden oluşur. Kuru tavuk dışkısının ham yağ içeriği yaklaşık % 2 kadardır (18).

Gübrenin besin maddesi içeriği çeşitli etkenlerden etkilenir. Gübrenin bileşimi, gübrenin su kapsamı, hayvan yaşı, yetiştirme sistemi, depolama koşulları ve diğer

etkenlerle değişmektedir. Besin maddesi bakımından gübrenin en önemli kısmını azot oluşturur ve kolayca da kaybedilebilir. Dışkıdaki azotun yaklaşık % 80 kadarı ürik asit şeklindedir (17).

Çizelge 2.8. Tavuk atığının gübre olarak besin bileşimi

Dışkı tipi	Nem %	N (kg/ ton)	P (kg/ ton)	K (kg/ton)
Taze Dışkı	75	13.1	4.5	3.6
Depolanmış dışkı	63.9	10.9	5.9	7.2
Broiler Altlığı	18.9	32.6	11.3	13.6
Yumurtacılık altlığı	22.1	22.7	10.4	16.3
Sulu gübre	92.0	10.0	5.4	3.2

Çizelge 2.9. Nem düzeyine göre tavuk gübresinin bileşimi

Gübre Çeşidi	Su Kapsamı %	Kuru Madde %	Yaklaşık Besin Değeri %		
			Azot	Fosfor	Potasyum
Taze	75	25	1.0	0.6-1.3	0.6-0.7
Kısmen Kurutulmuş	50	50	0	1.1-2.6	1.1-1.4
Kuru Gübre	25	75	3.0	1.7-3.9	1.7-2.1
Tamamen Kurutulmuş	0	100	4.0	2.3-5.2	2.3-2.8

Çürütülmüş gübrenin normal koşullarda elde edilmiş gübreye oranla daha iyi özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir (Çizelge 2.10). Çizelgeden anlaşıldığı gibi biyogaz üretilen ahır gübresinde % 25 kuru maddeye göre % 16,4 organik madde, % 8,2 C ve % 0,85 toplam N bulunmasına karşın, normal koşullarda elde edilmiş gübrede % 15,0 organik madde, % 8,0 C ve % 0,50 toplam N bulunmuştur. Bu iki gübrenin mineral madde içeriğine bakıldığında biyogaz üretilen gübrede, % 0,64 K₂O ve % 0,31 P₂O₅ bulunurken normal koşullarda elde edilmiş gübrede % 0,65 K₂O ve % 0,25 P₂O₅ bulunmuştur (19).

Çizelge 2.10. Biyogaz üretilmiş ve normal koşullarda elde edilmiş gübrelerin kimyasal özellikleri

Gübreler	Kuru Madde	Organik Madde	C %	Toplam N %	NH ₃ -N (Toplam Azot %'si)	K ₂ O %	CaO %	P ₂ O ₅ %
Biyogaz Üretilmiş	25,0	16,4	8,22	0,85	38	0,64	0,43	0,31
Normal	25,0	15,0	8,00	0,50	-	0,65	0,50	0,25

Biyogaz üretiminde tavuk gübresinin yanında, ham madde olarak sığır, koyun, insan dışkısı zirai atıklar olmak üzere bir çok organik materyal de kullanılmaktadır. Kullanılan bu hammaddelerin içerik olarak C/N oranı çok önemlidir. Bu değerin 30/1 olması istenir. Materyal bu orana sahip değilse, diğer organik maddelerle karıştırılarak istenilen oran sağlanır. Çeşitli organik maddelerin C/N oranları: buğday sapında 87/1, çeltik sapında 67/1, mısır sapında 53/1, dökülmüş yaprakta 41/1, soya fasulyesi sapında 32/1, otlarda 27/1, yer fıstığında 19/1 olarak verilebilir (4).

Çizelge 2.11. Besleme materyalinin özellikleri

Hayvan Türleri / Besleme Materyali	Günlük Ortaya Çıkan		Taze Madde Oranı	
	Gübre Miktarı (kg)	Sıvı Atık (kg)	OKM (%)	C / N
Sığır Gübresi	8	4	13	25
Manda Gübresi	12	4	12	20
Domuz Gübresi	2	3	14	13
Koyun Gübresi	1	-	20	30
At Gübresi	10	-	15	25
Tavuk Gübresi	0.08	-	16	5
İnsan Atıkları	0.5	-	15	8
Saman / Posa	-	-	-	70
Yaprak / Çimen	-	-	80	35

OKM : Organik kuru madde

KM : Kuru madde

C/N : karbon / azot oranı

Besleme materyalinin özelliklerine göre üretilen biyogaz miktarında önemli değişiklikler gözlenir (20).

Çizelge 2.12. Çeşitli kaynaklardan elde edilebilecek biyogaz verimleri ve biyogazdaki metan miktarları

KAYNAKLAR	BİYOGAZ VERİMİ (L/kg)	METAN ORANI (% v/v)
Sığır Gübresi	90-310	65
Kanatlı Gübresi	310-620	60
Domuz Gübresi	340-550	65-70
Buğday Samanı	200-300	50-60
Arpa Samanı	290-310	59
Mısır Sapları ve Atıkları	380-460	59
Keten	360	59
Kenevir	360	59
Ziraat Atıkları	310-430	60-70
Dökülmüş Ağaç Yaprakları	210-290	58
Atık Su Çamuru	310-800	65-80

2.7. Biyogaz Kullanım Alanları

Biyogaz, çok yönlü bir enerji kaynağı olarak doğrudan ısıtma ve aydınlatma amacıyla kullanıldığı gibi, elektrik enerjisine ve mekanik enerjiye çevrilmesi de mümkün olmaktadır. Ayrıca biyogaz üretimi sonucu ortaya çıkan yan ürünler de çeşitli amaçlarla değerlendirilebilmektedir (21).

2.7.1. Biyogazın ısıtmada kullanımı

Biyogazın yanma özelliği bileşiminde bulunan metan (CH_4) gazından ileri gelmektedir. Biyogaz, hava ile yaklaşık 1/7 oranında karıştığı zaman tam yanma gerçekleşmektedir.

Isıtma amacıyla gaz yakıtlarla çalışan fırın ve ocaklardan yararlanılabileceği gibi termosifon ve şofbenler de biyogazla çalıştırılarak kullanılabilir.

Biyogaz, sıvılaştırılmış petrol gazı ile çalışan sobaların meme çaplarında basınç ayarlaması yapılarak kolaylıkla kullanılabilir. Biyogaz sobalarda kullanıldığında bünyesinde bulunan hidrojen sülfür (H_2S) gazının yanmadan ortama yayılmasını önlemek üzere bir baca sistemi gerekli olmaktadır. Bu nedenle, daha sağlıklı bir ısınma için kalorifer sistemleri yeğlenmektedir.

Çizelge 2.13. Bazı yakıt türlerinin biyogaz ile karşılaştırılması (22)

Yakıt Türü	Birimi	Enerji Değeri (MJ)	Yanma Verimi (%)	Kullanılabilir Enerji (MJ)	Biyogaz Enerji Eşdeğeri
Biyogaz	m ³	20	60	11,8	1 m ³
Elektrik	kwh	3,6	70	2,5	4,7 kwh
Gazyağı	L.	38	50	19	0,62 L.
Kömür	kg	29	28	8,1	1,46 kg.

2.7.2. Biyogazın aydınlatmada kullanımı

Biyogaz, hem doğrudan yanma ile hem de elektrik enerjisine çevrilerek de aydınlatmada kullanılabilir. Yapılan bir çalışmada biyogazın yakıt hücreli güç tesislerinde kullanılabileceği ve böylece küçük yakıt hücreli güç tesisleri ile çiftlik tipi biyogaz üreteçlerinin elektrik enerjisinin sağlanabileceği belirtilmiştir. Çalışmada ayrıca biyogazın CO_2 içeriğinin, metanın tamamının yanmasında pozitif bir etkisinin olduğu belirtilmiştir (40). Biyogazın doğrudan aydınlatmada kullanımında sıvılaştırılmış petrol gazları ile çalışan lambalardan yararlanılmaktadır. Bu sistemde

aydınlatma alevini artırmak üzere amiyant gömlek ve cam fanus kullanılmaktadır. Cam fanus ışığı sabitleştirdiği gibi çıkan ısıyı geri vererek alevin daha fazla olmasını sağlamaktadır (21). 1 m³ biyogaz ile 60 W eşdeğerindeki fitilli bir lambayı 7 saat süre ile çalıştırılabilir. Aynı zamanda 1 kw-h elektrik enerjisi üretilebilir (7).

2.7.3. Biyogazın motorlarda kullanımı

Biyogaz, benzinle çalışan motorlarda hiçbir katkı maddesine gerek kalmadan doğrudan kullanılabilirdiği gibi içeriğindeki metan gazı saflaştırılarak da kullanılabilir. Dizel motorlarda kullanılması durumunda belirli oranda (% 18-20) motorin ile karıştırılması gerekmektedir (21). 1 m³ biyogazla, 2 BG motoru 1 saat süreyle çalıştırılabilirken, 300 litrelik bir buzdolabı ise 3 saat süre ile çalıştırılabilir (7).

Dizel motorlarda biyogazın yakıldığı bir çalışmada biyogazın CO₂ içeriğinden dolayı diğer dizel yakıtlardan daha az yanma verimi sağladığı, biyogazdaki CO₂' in dizel motorların çalışma veriminde en önemli sakınca olduğu belirtilmiştir (23).

2.7.4. Yan ürün değerlendirme imkanı

Biyogaz üretimi sonucu sıvı şekilde fermente organik gübre elde edilmektedir. Bu da biyogaz üretiminde kullanılan atıkların toprağa kazandırılmasına olanak sağlamaktadır. Elde edilen gübre tarlaya sıvı olarak uygulanabilir, tanecikli hale getirilebilir ve/veya beton-toprak havuzlarda doğal kurumaya bırakılabilir. Fermente olmuş gübre fermente olmamış gübreye oranla % 20- 25 oranla daha verimlidir (6).

2.8. Biyogaz Üretimde Kullanılan Anaerobik Reaktör Teknolojileri

Birçok ülkede biyogaz tesisleri planlanan amaca göre farklı teknolojiler kullanılarak inşaa edilmektedir. Biyogaz tesisleri, aile tipi (6-12 m³ kapasiteli) çiftlik tipi (50-100-150 m³ kapasiteli), köy tipi (100-200 m³ kapasiteli) tesisler olarak ele alınabileceği

gibi başta Almanya olmak üzere Amerika, Danimarka, İsviçre gibi pek çok ülkede 1000-10.000 m³ kapasiteli çeşitli biyogaz tesisleri işletilmektedir (21).

Aile tipi 6-12 m³ kapasiteli sabit kubbeli biyogaz tesisleri Çin'de çok yaygın bir biçimde kullanılmakta ve bu tip tesislerde oluşan biyogaz tesis içinde (kubbe bölümünde) toplanmakta ayrı bir gaz depolama tankı kullanılmamaktadır. Ancak bu durum biyogazın kullanımı sırasında gaz basıncının düşmesine neden olmakta dolayısıyla gaz basıncı sabit kalmamaktadır. Yeterli gaz basıncını sağlamak üzere Çin tipi tesisler genellikle kullanım yerlerine yakın kurulmaktadır. Büyük kapasiteli tesislerde ise oluşan biyogaz, tesisten ayrı veya tesis içinde sabit olmayan bir yerde toplanmakta (gaz depolama tankı) ve gaz basıncının sabit kalması sağlanabilmektedir. Bu tip biyogaz tesislerine en çok Hindistan'da rastlanmaktadır (21).

Son zamanlarda anaerobik arıtmaya duyulan ilgi değişik reaktör tiplerinin gelişimine neden olmuştur. Bu çok seçenekli arıtım, anaerobik sistemleri verimli ve ekonomik kılmıştır. Bu ileri ve modern uygulamalar, çok kısa hidrolik alıkoyulma sürelerinde (HAS) uzun katı alıkoyulma süresi yaratmaktadır. Sonuçta yüksek organik yüklemelerde yüksek arıtma verimi elde edilmektedir. Hayvansal atıkların arıtımında anaerobik biyoreaktörler kullanılır. Çünkü, yüksek kirlilik içeren atıkların aerobik sistemlerde arıtılmasında, aşırı yükleme ve ortamda serbest oksijen yetersizliği oluşması sebebiyle verim düşüşleri görülmektedir (24).

Biyogaz üretiminde kullanılan anaerobik reaktörler aşağıda verilmiştir (25).

- 1) Sabit kubbeli reaktör
- 2) Hareketli kubbeli reaktör
- 3) Torba reaktör
- 4) Sabit film reaktörleri
- 5) Yukarı akışlı anaerobik reaktör
- 6) Yatay-engelli biyoreaktör
- 7) Anaerobik havuz reaktörü

- 8) Karıştırılmalı biyoreaktör
- 9) Tapa akışlı biyoreaktör
- 10) Temas biyoreaktör (Contact bioreactor)
- 11) Asit fazlı biyoreaktör
- 12) Akışkan yataklı anaerobik biyoreaktör
- 13) Yukarı akışlı filtreli kombine biyoreaktör
- 14) Ardışık kesikli anaerobik reaktör
- 15) Hibrit biyoreaktörü

2.8.1. Sabit kubbeli reaktörler

Özellikle kırsal bölgelerde biyogaz üretimi için uzun zamandır kullanılan çok basit reaktörlerdir. 1930'larda Çin'de kullanılmaya başlanmış, ülkemizde de denemeleri yapılmıştır. Sistem toprağa gömülü olarak inşa edilmiş su ve hava sızdırmazlığı sağlanmıştır. Tuğla veya betonarmeden yapılmakta olup kapalı haznelerden oluşur. Besleme ve atık çıkarma için kapaklar konulmuştur. Sabit kubbede biriken biyogaz evlerdeki basit sistemlerle gündelik ihtiyacı karşılamakta kullanılmaktadır. Bu reaktörler kırsal bölgelerdeki malzemelerle yapılabildiğinden kurulumu ve işletimi rahat olsa da verimleri düşüktür, bu nedenle büyük kapasiteli kullanımlarında engeller bulunmaktadır.

2.8.2. Hareketli kubbeli reaktörler

Bu reaktörler, sabit kubbeli reaktörlerin geliştirilmiş tasarımlarıdır. 1950'lerde Hindistan'da kullanılmaya başlanmıştır. Bu reaktörlerde gazın biriktiği kubbenin hareketli oluşu, basıncın kontrolünü sağladığından bu sistemlerin verimi sabit kubbelilere göre daha yüksektir. Fakat hareketli sistem için gereken işçilik ve kubbe için kullanılan metal türü ağır parçalar maliyeti artırarak ekonomik yük getirmektedir.

2.8.3. Torba reaktör

Bu tasarım 1960'lerde Tayvan'da geliştirilmiştir. Ülkedeki inşaat malzemeleri ve işçiliğin pahalı oluşu nedeniyle, daha ucuz olan PVC, plastik gibi sızdırmaz malzemeler kullanılarak bu problem aşılmaya çalışılmıştır. Torba reaktörler içlerine atıkların doldurulduğu kapalı sistemlerdir, gaz çıkışı yine kırsal bölgelerdeki evsel ihtiyaçları karşılamakta kullanılır. Büyük ölçekte kullanımında çeşitli modifikasyonlar yapılarak adapte edilmişlerdir.

2.8.4. Sabit film reaktörleri

Bu reaktörlerde anaerobik işlemleri gerçekleştiren bakteriler reaktör içindeki plastik, kum, PVC, seramik veya toksik olmayan farklı destek maddelerinden oluşan dolgu materyallerinin üzerine tutunurlar. Atıklar reaktör içindeki dolguda tutunan bakterilerin üzerlerinden akarken, çözünerek gaza çevrilir. Ancak partikülleri büyük olan katıları bakteriler parçalamaya fırsat bulamayabilirler. Bu tip reaktörler özellikle atık suların işlenmesiyle biyogaz üretilmesinde uygundur. Yüksek oranda katı içeren atıkların dolgu materyaline tutunarak sistemi bozması mümkündür. Kuruluşları kolaydır, mekanik karıştırma gerektirmezler, yüksek oranlardaki yükleme miktarlarına ve toksik şoklara dayanıklıdır, organizmaların sürüklenme riskleri azaltılmıştır. Fakat hacimleri, dolgu materyaline ve kapasiteye bağlı olduğundan, genelde yüksektir.

2.8.5. Yukarı akışlı anaerobik biyoreaktör

1980'lerde Hollanda'da geliştirilmişlerdir. Yüksek derişimlerde tutuklanmış bakteri içerirler. Herhangi bir dolgu materyali olmasa da bakteriler reaktörün tabanında örtü şeklinde tabaka oluşturan büyük granüllü artıklara tutunurlar ve sisteme beslenen atıklar sistemin tabanındaki bu katmandan geçerken gaz çıkışını sağlayan reaksiyonlar gerçekleştirirler. Endüstride yaygın olarak kullanılan reaktörlerdir. Damıtma birimleri, gıda üretim birimleri, kanalizasyon sistemleri ve mandıra birimlerinden çıkan atıklarla çalışmaya uygundur. Çözünebilir organik maddelerin,

özellikle tanecik boyutları da küçükse, gaza dönüştürülmesinde çok verimlidirler. Tasarımı yardımıyla yüksek yükleme miktarlarına dayanıklıdır. Ayrıca işletme maliyetleri, çok farklı atıklarla çalışmaya olanak verdiği için uygundur. Parçacıklı katmanlı, yumaklaşmış katmanlı veya genişletilmiş parçacıklı katmanlı olarak geliştirilen alt türleri vardır (25).

2.8.6. Yatay-engelli reaktörler

Bu tür reaktörler yukarı akışlı anaerobik biyoreaktörlerin benzerleridir. Reaktörlerin içlerinde bulunan engeller yardımıyla, sisteme giren atıklar engellere takılarak reaktör içinde ilerlerken aynı anda aşağı ve yukarı yönlü hareket olanağı bulur. Aşağı hareket sırasında reaktör tabanında oluşan anaerobik katmanlardaki bakterilerle etkileşip tepkimeler gerçekleşmesi sağlanırken, sürüklenme riski engeller ile aşımaya çalışılır. Reaktörlerin seri olarak çok basamaklı kullanılabilme üstünlüğü olsa da, karşılaşılan en önemli sorun özellikle katı tanecikli atıkların işlenmesinde çökelmelerden dolayı sistemde oluşan tıkanmalar ve düzensizlikler oluşmasıdır. Yüksek miktarlarda bakteri koyulmasına rağmen bu sistemlerin verimlerinin artırılması için beslenen atıkların taneciklerinden ayrılmasını sağlayacak ayırma işlemlerinin uygulanması, reaktör verimini artırmaktadır.

2.8.7. Anaerobik havuz

Bu reaktörler üzerleri gaz sızdırmaz örtülerle kapatılmış basit havuzlardır. Besleme bir taraftan sağlanırken belli tepkime süresi sonunda artıklar diğer taraftan dışarı alınır. Bu tip reaktörler özellikle yaz-kış sıcaklık farkının düşük olduğu bölgelerde sıcaklık denetimine gerek olmadan normal ortam koşullarında kullanılabilirler. Biyolojik oksijen ihtiyacı 500 mg/L gibi düşük kuvvetteki atık sularla çalışılırken başarı sağlanmış, basit işletimleri ve düşük maliyetleri ile üstünlüklerini ortaya koymuş sistemlerdir. Reaktörlerin sakıncaları, verimin dış ortam sıcaklık değişimine bağlı olarak mevsimsel değişmesi, gaz üretimlerinin düşük oluşu, karışmanın neredeyse hiç olmaması, katıların dibe çökerek verimi etkilemesi olarak sıralanabilir. Maliyetleri düşüktür, fakat temizlenmeleri sırasında zorluklarla karşılaşılır.

2.8.8. Karıştırılmalı reaktörler

Amerika ve Avrupa’da yerel hayvan çiftliklerinde çok yaygın kullanılan bir reaktör sistemidir. Ayrıca kanalizasyon atıkları ve endüstriyel atık işleyen birimlerde de bu sistem kullanılmaktadır. Isıtma ve karıştırmanın eşliğinde optimum koşullar sağlanmaktadır. Mezofilik ve termofilik aralıklarda çalıştırılabilirler. Yükseklikleri az, taban alanları fazla olabilir veya tam tersi tasarımlar kullanılabilir. Sabit kubbeli, hareketli kubbeli tasarımları vardır. Gaz karıştırılmalı, mekanik karıştırılmalı ve farklı ısı değiştirici sistemli reaktörler bulunmaktadır. Karıştırılmalı reaktörlerin en önemli üstünlükleri çok farklı koşullara uyarlanabilmeleri, hızlı gaz dönüşümünü sağlamaları ve sistem içindeki eş dağılımı korumaları olarak sıralanabilir. Fakat kuruluş ve enerji maliyetleri açısından sakıncaları vardır, bakteri kayıpları nedeniyle ek besleme gerekebilir.

2.8.9. Tapa akışlı biyoreaktörler

Bu biyoreaktörler 1957’de Güney Afrika’da kullanılmaya başlanmıştır. Kuruluş maliyeti en düşük biyoreaktörlerden biridir, yatay veya dikey olabilir. Atıklar sisteme beslenirler ve dışarı çıkarlar. Bu biyoreaktörler karıştırılmalı biyoreaktörler gibi mikroorganizma büyümesinin temel alındığı sistemlerdir, bu nedenle gaz verimleri düşüktür. Sistemden ayrılan atıklarla birlikte mikroorganizma kaybı olduğu için sisteme mikroorganizma beslemesi gerekebilir. Katıların çökmesinden dolayı oluşacak katmanları önlemek için sistemin düzenli temizlenmesi gerekmektedir, bu gibi işlemler ek mali yük getirmektedir.

2.8.10 Temas biyoreaktörler (Contact bioreactor)

Bu biyoreaktörlerde katılar farklı bir birimde ayrılır, konsantre edilir ve daha sonra reaktöre beslenirler. Bakteriyel biyokütle, biyoreaktörde alıkoyularak korunduğu için gaz verimi artar. Termofilik ve mezofilik aralıklarda kullanılabilir. Seyrelmiş veya konsantre atıklarla, özellikle 1000-2000 mg/L KOİ aralığındaki orta kuvvetli

atıklarla, çalışmaya uygundurlar. Çünkü sistemde ayırma işlemi kullanılmaktadır. Bu tip biyoreaktörlere karıştırma sistemi de uyarlanabilir.

2.8.11. Asit fazlı biyoreaktörler

Bu biyoreaktörler asit üreten mikroorganizmaların metan üretenlere göre daha hızlı büyümesini temel alırlar. Sistemde entegre biyoreaktörler kullanılmaktadır. İlk biyoreaktör asit üreten bakteriler için uygun asidik ortam sağlar ve boyutları küçük olabilir. Diğer biyoreaktör ise metan üreten bakteriler için uygun koşulların sağlandığı bölümdür. Bu sistemler asit yardımıyla parçalanmanın hızlandığı ve parçalanan atıkların diğer bir tanktaki metan üreten organizmaların işini kolaylaştırdığı için verimlidir. Kanalizasyon ve şehir sularının işlenmesinde kullanılmışlardır.

2.8.12. Akışkan yataklı anaerobik biyoreaktörler

Bakterilerin tutunduğu dolgu materyali (aktif karbon, pelletler, kum v.s), beslenen atıklar ile her an akışkan halde bulunurlar. Bu sayede her parçacık yüzey alanını tamamen kullanma fırsatı bularak bakteri tutunmasını artırır ve dolayısıyla biyofilm oluşumu artarak verim artar. İnhibisyona ve yüksek yükleme miktarlarına dayanıklıdır. Akışkan yataklı reaktörler, sabit yataklı sistemlere göre daha verimlidirler. Çünkü mikroorganizmaların substratlarla daha iyi etkileşimi gerçekleşebilir ve maliyetleri, daha düşük hacimlerle çalışmaya uygundur.

2.8.13. Yukarı akışlı filtreli kombine biyoreaktör

Bu biyoreaktörler 20 yıldan bu yana kullanılmaktadırlar. Genel tasarım olarak uzunlamasına (yükseklik/tabana çapı oranı 8-10) kapalı biyoreaktörlerdir. İçlerinde sabit bir elek tarzında geçirgen yapının altında tutulan, biyolojik etkinliğin gerçekleştiği, anaerobik bir ortam örtüsü bulunmaktadır. Bu biyoreaktörler temelde sabit film biyoreaktörleri ile yukarı akışlı anaerobik biyoreaktörlerin bileşimidirler. Sistem işletim açısından sabit bir ortam sağladığından denetimi kolaydır. Uzun süre

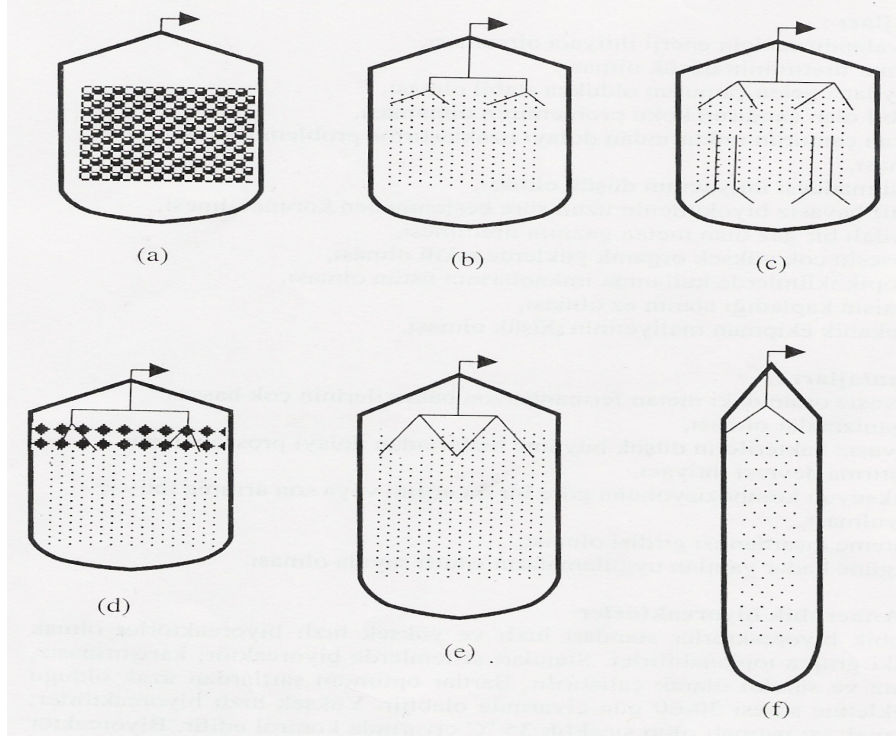
çalıştırılmasa da kısa zamanda yeniden başlatılabilir. Enerji kullanımları düşüktür. Bu biyoreaktörlerde en önemli kısıtlama ise geçirgen yapının tıkanma riskidir, fakat bu risk düzenli temizleme ile azaltılabilir. Tıkanmaların önlenmesi adına sistemin yukarıdan aşağıya doğru beslenmesi de yapılmaktadır. Ancak sistemden çıkan artıklarda biyokütlenin kaybedilme riski arttığından yukarı akıştan daha az verim elde edilmektedir.

2.8.14. Ardışık kesikli anaerobik reaktörler

Bu reaktörler Amerika'da geliştirilen farklı tür temas reaktörleridir. Anaerobik sistemlerde karşılaşılan, yüksek inkübasyon miktarı, karıştırma verimi, tepkime dengesizlikleri gibi sorunların giderilmesi için tasarlanmışlardır. Reaktörde hem ayırma hem biyolojik dönüşümler gerçekleşir. Ayırma işlemi çökeltme ile gerçekleşir. Genelde iki veya daha fazla tank sistemi doldurma ve boşaltmada destek sağlar.

2.8.15. Hibrit biyoreaktörler

Hibrit biyoreaktörler farklı tasarımların üstünlüklerini yapılarında toplayarak en yüksek verim eldesini ve sorunların giderilmesini sağlamak amacıyla tasarlanan sistemlerdir. Örneğin yukarı akışlı anaerobik biyoreaktörler ile anaerobik filtre biyoreaktörleri veya yatay akışlı engelli biyoreaktörlerin özelliklerini bir biyoreaktörde birleştiren hibrit sistemler üzerinde çalışılmaktadır (25).



Şekil 2.5. Çeşitli anaerobik biyoreaktörler (13)

- a) Anaerobik damlatmalı filtre b)Yukarı akışlı anaerobik biyoreaktör
- c) Kompartmanlı yukarı akışlı anaerobik biyoreaktör d) Yukarı akışlı
filtreli kombine biyoreaktör e) Genişlemiş yatak Granül biyoreaktör
- f) Akışkan yataklı anaerobik biyoreaktör

2.9. Biyogaz Üretiminde Kullanılan Sistemler

Reaktör içerisinde biyogaz üretimi, materyalin besleme şekline göre üç kısımda incelenebilir (8).

2.9.1. Sürekli beslemeli fermantasyon

Bu fermantasyon biçiminde organik madde biyoreaktöre her gün belirli miktarlarda verilmekte ve aynı oranlarda fermente olmuş materyal günlük olarak biyoreaktörden alınmaktadır. Bu fermantasyon şeklinde gaz üretimi sürekli olmaktadır.

2.9.2. Beslemeli-kesikli fermentasyon

Burada biyoreaktör başlangıçta belirli oranda organik madde ile doldurulmakta ve geri kalan hacmi fermentasyon süresine bölünerek günlük miktarlarla tamamlanmaktadır. Belirli fermentasyon süresi sonunda biyoreaktör tamamen boşaltılarak yeniden doldurulmaktadır.

2.9.3. Kesikli fermentasyon

Burada biyoreaktör başlangıçta organik madde ile tamamen doldurulmakta, fermentasyon süresi sonunda biyoreaktör boşaltılarak yeniden doldurulmaktadır.

2.10. Anaerobik Biyoteknolojilerin Üstünlükleri ve Sakıncaları

Anaerobik sistemler yeterli miktarda biyokütleyi tutabilecek bir biçimde ve doğru bir güvenlik katsayısı ile tasarlanıp, işletildiği koşullarda yüksek bir işletim kararlılığına (değişken çevresel koşullar altında istenilen kirletici gideriminin sağlanabilme kapasitesi) sahiptir (3).

Anaerobik biyoteknoloji, aerobik sistemler için gerekli olan oksijen gereksinimini ortadan kaldırdığı gibi düşük mikrobiyal sentezleme özelliği ile de oluşan atık biyokütle miktarını önemli ölçüde azaltır. Buna ek olarak, anaerobik sistemlerin azot ve fosfor gereksinimi de aerobik sistemlere göre düşüktür.

Ayrıca, anaerobik sistemlerde çok yüksek organik madde yükleme hızlarına ulaşmak mümkündür. Aerobik sistemlerde $0,5-3,2 \text{ kg/m}^3\text{gün}$ olan organik madde yükleme hızı, anaerobik sistemlerde için $3,2-32 \text{ kg/m}^3\text{gün}$ 'dür. Bu büyük fark, anaerobik reaktör hacimlerinin aerobik reaktöre göre çok daha küçük olmasını, dolayısıyla ilk yatırım maliyetlerinde önemli bir azalma sağlamaktadır (3).

Aerobik olarak 1 kg kimyasal oksijen ihtiyacı dengi organik maddenin arıtılması için gereken 1,5-6 kWsaat'lik oksijen sağlama gideri, anaerobik sistemlerde ortadan

kalkmaktadır. Ayrıca, 1 kg KOİ dengi organik maddenin anaerobik arıtımı sonucu yaklaşık 3,6 kWsaat eşdeğeri metan gazı ortaya çıkmaktadır. Bu gaz, elektrik üretimi, ısıtma vb. amaçlarla kullanılabilir. Bu ise enerji tasarrufuna ve ek enerji üretimi demektir.

Anaerobik sistemlerde, özellikle çözücü maddeler içeren atıksularda görülen, havalandırma ve/veya kabarcıkların yol açtığı köpüklenme sorunu, anaerobik sistemlerde büyük ölçüde azalmaktadır. Ayrıca fermentasyon sonucu artık madde kokusuz, yumuşak yapıda ve kolay akabilir durumdadır (19).

Anaerobik sistemlerde mikroorganizmalar beslenmedikleri durumlarda bile canlılıklarını aylar boyu koruyabilmektedir. Bu da mevsimsel işletilmelere olanak sağlamaktadır.

Anaerobik sistemlerde bir çok üstünlük olduğu gibi sakıncaları da vardır. Bunların başında, düşük sıcaklıklarda ve seyreltik atıksuların arıtımının güçlüğü, işleme alının uzun sürmesi, kimi atıksuların yüksek alkalinite gereksinimi, çevresel koşullara metan oluşturan bakterilerin aşırı duyarlı olması söylenebilir (3).

Anaerobik arıtma sistemlerin başlıca üstünlük ve sakıncaları Çizelge 2.14' de verilmiştir. Çizelge 2.15' de ise aeraobik ve anaerobik sistemler çeşitli açılardan karşılaştırılmaktadır.

Çizelge 2.14. Anaerobik arıtım sistemlerinin üstünlükleri ve sakıncaları (19,26)

Üstünlükleri	Sakıncaları
- Atıkların yüksek derecede kararlaştırılması - Düşük atık biyokütle üretimi - Düşük azot ve fosfor gereksinimi - Düşük reaktör hacmi - Enerji tasarrufu ve CH₄ oluşumu - Atık gaz arıtımını gereksiniminin ortadan kalkması - Düşük köpüklenme problemleri - Arıtım oksijen aktarımı ile sınırlı değildir. - Mevsimler arıtım olanağı - İşletme maliyeti düşüktür. - Kullanılan metaryalin gübre değeri azalmaz, tersine artar. - Metaryel içerisindeki yabancı ot tohumları ile hastalık etmenleri etkisiz şekle dönüşür.	- Biyokütle büyümesi için uzun süre gereksinimi - Isıtma gereksinimi - Düşük sıcaklıkta düşük kinetik hızlar - Maksimum biyokütle etkinliği için gerekli olan amonyum (NH₄) değişimi (40-70 mg/L) - Sıcaklık, pH gibi çevresel koşullara metan oluşturan bakteriler aşırı duyarlıdır. - Ekipmanın başlangıçta yatırım giderleri yüksektir. - Koku problemi

Çizelge 2.15. 4400 kg BOİ / günlük bir atıksuyun anaerobik (Akışkan yataklı reaktör) ve aerobik olarak arıtımının karşılaştırılması (26)

Parametreler	Anaerobik	Aerobik
Reaktör hacmi (m ³)	844	6 435
Yüzey alanı (m ²)	84	1 393
Enerji Gereksinimi (kw- saat /gün)	720	8 600
Enerji Gideri (Dolar / yıl)	15.700	-
Metan Gazı Üretimi (m ³ / gün)	2.040	-
Metan Gazının Getirisi (Dolar / yıl)	150.000	1 800
Atık Biyokütle Üretimi (ton / yıl)	180	

2.11. Deneylerin Çok Faktörlü Planlanması (Box-Wilson Yöntemi)

Süreçlerde en yüksek verimin ekonomik olarak elde edildiği koşulların belirlenmesi için optimizasyon yapılır. Sürecin optimizasyonu için çeşitli yöntemler vardır. Bu yöntemlerden bazıları; analitik ve sayısal yöntemler, dinamik programlardır.

Bu optimizasyon yöntemlerinde, diğer parametrelerin sabit değerlerine karşılık bir parametre değiştirilmekte ve elde edilen veriler sadece bu parametreye bağlı olmaktadır. Bundan dolayı da çok sayıda deney yapılması gerekmektedir. Bu şekilde optimizasyon için çok zaman harcanır ve parametrelerin birbiri arasındaki etkileşimleri belirlenemez (27).

İstatistiksel optimizasyon yöntemleri, bu yöntemlere seçenek olarak ortaya çıkmıştır. İstatistiksel modelleme yöntemlerinden süreçlerin parametrelerinin belirlenmesi ve optimum kontrol sistemlerinin kullanılmasında daha çok yararlanır. Bu istatistiki yöntemler içerisinde en etkili ve son yıllarda daha çok geliştirilmekte olan deneylerin çok faktörlü optimal planlanması yöntemleridir. Bu yöntemler, aslında optimum stratejinin seçilmesini hedefleyerek deneysel incelemelerin oluşturulmasına ve yapılmasına hizmet eder. Bu yöntemlerin yaratılmasında, İngiliz bilim adamı R. Ficsher'in ve Amerikalı bilim adamı J. Box'un çalışmaları oldukça önemlidir.

Box-Wilson deneysel tasarım yöntemi, deneysel tasarımla istatistiksel ve matematiksel teknikleri içeren bir yöntemdir ve problemlerin modellenmesini ve analizini içerir. Bu istatistiksel yöntemin diğer yöntemlere göre üstünlüğü, bütün parametrelerin aynı zamanda değişimine bakılmasıdır. Bu yüzden deneylerin sayısı diğer yöntemlerle kıyaslandığında oldukça azalır. Doğruluğu ise bir o kadar artar. Bu yöntem, en çok bilgiye ulaşılacak noktalarda deney yapılmasını sağlar. Sistem için optimum işletme koşullarının belirlenmesi veya optimum işletme koşullarının sağlandığı bağımsız değişken alanının belirlenmesi bu yöntemin amacıdır (27,28).

Deneysel tasarım yöntemlerinde, belirlenmesi gereken aşamalar şunlardır;

1. Problem tanımlanır.
2. Faktörler, seviye ve aralıklar belirlenir.
3. Cevap değişkeni seçilir.
4. Deneysel tasarım matrisi oluşturulur.
5. Deneyler yapılır.
6. Verilerin istatistiksel analizi yapılır.
7. Sonuçlar değerlendirilir.

Bu yöntemde ilk basamak, bağımlı değişken (response) ile bağımsız değişkenler (factors) arasında uygun bir bağıntının oluşturulmasıdır.

Örneğin X_1 ve X_2 değişkenlerinin değeri Y değişkeninin verimini artırmak üzere tasarlanacak olursa;

$$Y = f(X_1, X_2) + \varepsilon \quad [2.1]$$

ε : Y için hata,

X_1, X_2 : bağımsız değişkenler

$$E(Y) = f(X_1, X_2) = \eta \quad [2.2]$$

η cevap yüzeyi, $\eta = f(X_1, X_2)$

Bir çok cevap yüzeyi metodolojisi RSB (Response Surface Methodology) probleminde bağımsız değişkenler arasındaki ilişki bilinmez. Bunun için öncelikle bağımsız değişkenlerle bağımlı değişkenle arasında doğru fonksiyonel ilişkiyi tanımlamak üzere uygun yaklaşım yapılmalıdır. İstatistiksel modellerin kurulmasında doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon denklemlerinin birinci ve ikinci dereceden polinomlarından yararlanılır.

Eğer bağımlı değişken bağımsız değişkenlere göre doğrusal bir fonksiyonu olarak tanımlanabiliyorsa, fonksiyon birinci mertebe modelle tanımlanır.

$$Y = f(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i X_i + \sum_{i < j}^3 \beta_{ij} X_i X_j + \epsilon \quad [2.3]$$

Eğer sistemde bir dönüm noktası varsa, daha yüksek mertebeden örneğin ikinci mertebeden modelle tanımlanır.

$$Y = f(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i X_i + \sum_{i < j}^3 \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} X_i^2 + \epsilon \quad [2.4]$$

Burada;

Y :bağımlı değişken

$X_1, X_2, \dots, X_k$:bağımlı değişken üzerinde etkili olan giriş değişkenleri

i, j :1'den değişken sayısı kadar değişir.

ϵ :hata

β_0 :kayma

β_i :doğrusal modelin katsayıları

β_{ij} :karesel modelin katsayılarını gösterir.

Böylece, iki değişkenli bir problem için cevap fonksiyonu şöyle olacaktır.

$$Y = f(x) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_1^2 + \beta_4 X_2^2 + \beta_5 X_1 X_2 + \epsilon \quad [2.5]$$

Modelin katsayılarını belirlemek için, araştırmacının amacı doğrultusunda bağımsız değişkenlerin her biri beş düzeyde belirtilir. Her bir değişken için bu beş düzeyin değeri deneydeki değişkenlerin sayısına ve üzerindeki çalışılacak aralığa bağlıdır (36,37).

Doğrusal ve doğrusal olmayan modellerin değişkenlerinin belirlenmesi, optimal plan matrisinin oluşturulması ile elde edilir. Plan matrisinin oluşturulmasında, aşağıdaki eşitlik kullanılarak değişkenlerin kodlanmış değerleri hesaplanır ve modelin oluşturulmasında bu kodlanmış değerlerden yararlanılır.

$$U_i = (X_i - X_{i0}) / \Delta X_i \quad [2.6]$$

Bu eşitlikte;

U_i : i parametresinin kodlanmış değeri

X_{i0} : i parametresinin ortalama değeri

X_i : i parametresinin gerçek değeri

ΔX_i : i parametresinin adım aralığıdır.

Parametrelerin kodlanmış değeri (+1), (-1), (0) olmak üzere üç değer taşır. Burada; (+1) yüksek seviyeyi, (-1) düşük seviyeyi ve (0) ise orta seviyeyi gösterir. Bu durum deney sonuçlarının boyutsuz bir şekilde işlenmesi imkanını sağlar ve aynı zamanda hesaplamayı kolaylaştırır. Plan matrisleri oluşturulurken önce her bir parametre için değişim aralığı ve merkez değer belirlenir (28).

Tasarımdaki deney sayısı (N_d) aşadaki eşitlikle tanımlanır.

$$N_d = 2^K + 2K + N_0, \quad K < 5 \quad [2.7]$$

$$N_d = 2^{K-1} + 2K + N_0, \quad K \geq 5$$

K : parametre sayısı

N_0 : merkez noktada yapılan deney sayısı (37).

Çizelge 2.16. İki değişken için etken, eksen ve merkez noktaları

Etken Noktaları		Eksen Noktaları		Merkez Noktaları	
U_1	U_2	U_1	U_2	U_1	U_2
+1	+1	$+\alpha$	0	0	0
+1	-1	$-\alpha$	0		
-1	+1	0	$+\alpha$		
-1	-1	0	$-\alpha$		

Plan matrisinin kurulması Çizelge 2.16'daki ardışıklıkla yapılır (36). Araştırma bölgesi ve merkezi plan seçilir. Koordinat başlangıcı yazılır. Daha sonra her bir faktör için değişim aralığı seçilir. Planın merkezinin ve aralığının seçilmesi ancak deney yapanın deneyimi ve süreçlerin tanımlanmasıyla mümkün olur. Tasarım kuralı üç çeşit kombinasyonu içerir. Bunlar; Eksen noktaları, Etken noktaları ve Merkez (orta) noktalarıdır. Eksen noktalarında, diğerleri merkez nokta düzeyinde iken her bir değişkenin uç noktalarını içerir. Burada uç noktalar alt ve üst sınır değerleridir. Etken noktaları, merkezden yaklaşık eşit uzaklıktaki düzeyler için yapılan deneylerdir. Deneysel hatayı azaltmak amacıyla merkez noktalarında deneyler genellikle üç veya beş kez tekrarlanır. İki faktörlü doğrusal olmayan plan matrisi Çizelge 2.17'de gösterilmiştir (29).

Çizelge 2.17. İki faktörlü ikinci dereceden plan matrisi

Deney No	U_1	U_2	Gözlenen Değerler
1	-1	-1	Y_1
2	+1	-1	Y_2
3	-1	+1	Y_3
4	+1	+1	Y_4
5	0	0	Y_5
6	0	0	Y_6
7	0	0	Y_7
8	$-\alpha$	0	Y_8
9	$+\alpha$	0	Y_9
10	0	$-\alpha$	Y_{10}
11	0	$+\alpha$	Y_{11}
12	0	0	Y_{12}
13	0	0	Y_{13}
14	0	0	Y_{14}

İkinci derece eksen üzerinde değişebilir tasarımda α değeri Eş. 2.10 ile tanımlanmaktadır (36).

$$\begin{aligned}\alpha &= 2^{K/4}, & K < 5 \\ \alpha &= 2^{(K-1)}, & K \geq 5\end{aligned}\quad [2.8]$$

Farklı sayıdaki değişkenler için n_0 ve α 'nın değerleri Çizelge 2.18' de verilmiştir.

Çizelge 2.18. Farklı sayıdaki değişkenler için n_0 ve α değerleri

Değişken sayısı, K	2	3	4	5	5	6	6	7	7
Tasarım	2^2	2^3	2^4	2^5	2^{5-1}	2^6	2^{6-1}	2^7	2^{7-1}
α	1.41	1.68	2.00	2.38	2.00	2.83	2.38	3.33	2.83
n_0	5	6	6	10	6	15	9	21	14

Model katsayısının ($\beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$) belirlenmesi için Taylor serisi kullanılır.

$$\beta_i = \partial f / \partial x_i \Big|_{x_i=0}, \beta_{ij} = \partial^2 f / \partial x_i \partial x_j \Big|_{x=0}, \beta_{ii} = \partial^2 f / \partial x_i^2 \Big|_{x=0} \quad [2.9]$$

Bu katsayıların bulunması için en küçük kareler yöntemi kullanılır. En küçük kareler yöntemine göre gözlenen fonksiyon değerleri arasındaki değerleri ile hesaplanan fonksiyon değerleri arasındaki farkın minimum olması gerekir.

$$L = \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i) = \min \quad [2.10]$$

Gerçekleştirilen tasarım yönteminde kullanılan model, Sapma Analizi ANOVA (Analysis of Variance) testi ile istatistiksel olarak değerlendirilir. Bu test, sistem için önerilen model ve hatanın serbestlik derecesi, kareler toplamı ve kareler oranını içerir (37). Çizelge 2.19'de ANOVA testinde kullanılan değerler verilmiştir.

Çizelge 2.19. ANOVA testinde kullanılan değerler

Kaynak	Serbestlik derecesi (df)	Kareler toplamı (KT)	Kareler oranı (KO)	F
Model	f_3	MKT	MKT/ f_3	MKO/HKO
Hata	f_2	HKT	HKT/ f_2	
Toplam	f_1	THKT	THKT/ f_1	

HKT : Hata kareler toplamı

MKT : Model karelerinin toplamı

THKT : Toplam hata kareler toplamı

MKO : Model karelerinin oranı

HKO : Hata karelerinin oranı

Regresyon katsayısı; $R^2 = \text{MKT} / \text{THKT}$ olarak ifade edilir. Buradaki R^2 değerinin 1'e yakın olması, modelin sistemi iyi ifade ettiğini gösterir (27).

3. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Biyogazla ilgili ilk çalışmalar 17. Yüzyılda Jan Baptida Van Helmont tarafından, organik maddelerin oksijensiz ortamda parçalanmasıyla yanabilen bir gazın çıktığının belirlenmesiyle başlamıştır (16).

Biyogaz üretimi ile ilgili çalışmalar çok yönlü olarak kamu kurumlarınca ve akademik düzeyde çalışılmış ve hala çalışılmaktadır.

Bu konudaki çalışmalar ülkemizde 1957 yılında Toprak ve Gübre Araştırma Enstitüsünde başlatılmıştır (6). Özellikle, 1980-86 yılları arasında bu konudaki araştırmalar hızlandırılmış ve Merkez TOPRAKSU Araştırma Enstitüsünde (Köy Hizmetleri Ankara Araştırma Enstitüsü) biyogaz üretimi ile ilgili birçok temel bulgular elde etmiştir. Enstitü’de kurulan biyogaz laboratuvarlarında yürütülen araştırmalar ve elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir (21).

Yürütülen çalışmaların ilkinde sığır-koyun-tavuk gübreleri ve bunların karışımlarından elde edilebilecek biyogaz verimleri incelenmiştir. Araştırma, biyoreaktör sıcaklığı 30 °C’de sabit tutulan 1 m³ kapasiteli prototip biyogaz tesislerinde yürütülmüştür. En yüksek biyogaz verimi tavuk gübresinden elde edilmiştir (1215,6 L/m³). Tavuk gübresinin karışıma girdiği konularda biyogaz üretimi artmıştır.

Ankara koşullarında 12 m³ kapasiteli topraksu tip A biyogaz tesisinde yapılan çalışmada sığır gübresinin biyogaz verimleri incelenmiştir. Çalışmada, sabit kubbeli (Çin Tipi) biyogaz tesisi kullanılmıştır. Biyoreaktör sıcaklığına müdahale edilmemiştir. Biyoreaktör sıcaklığı 9 °C’de biyogaz verimi 1,4 m³/gün, 20 °C’de 5,9 m³/gün olmuştur.

Ankara’da 28 m³ kapasiteli biyogaz tesisinin gaz verimi incelenmiştir. Bu araştırma, çiftlik tipi ısıtılmalı ve gaz depolama tankı tesisten ayrı olan bir biyogaz tesisinde, karıştırma sistemlerinin karşılaştırılması amacıyla yürütülmüştür. Tesis sıcaklığı

20°C ile 30°C arasında tutulmuş, mekanik karıştırmalı uygulamadan 9,97-25,05 m³/gün, kabarcık tüfeği ile karıştırmalı uygulamadan ise 7,64-14,56 m³/gün biyogaz elde edilmiştir.

Değişik sıcaklıklarda sığır ve tavuk gübrelerinden elde edilen biyogaz miktarlarının incelendiği çalışmada, sığır ve tavuk gübresinden 9-18-27 ve 36 °C’de elde edilebilecek biyogaz miktarları araştırılmış ve sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Çizelge 3.1. Sığır ve tavuk gübrelerinin değişik sıcaklıklarda biyogaz verimleri

Biyoreaktör Sıcaklığı (°C)	Sığır Gübresi (L/m ³)	Tavuk Gübresi (L/m ³)
9	101,4	253,3
18	339,7	448,0
27	509,8	1008,9
36	686,0	1266,2

Değişik besleme aralıklarında sığır ve tavuk gübrelerinden elde edilen biyogaz miktarları incelenmiştir. Biyoreaktör sıcaklıkları 30 °C’de sabit tutularak her gün, üç günde bir, beş günde bir ve yedi günde bir besleme yapılmıştır. Sığır gübresinden en yüksek biyogaz verimi, beş günde bir beslenen durumda sağlanırken (785,7 L/m³) tavuk gübresinden en yüksek biyogaz verimi her gün beslenen durumda elde edilmiştir (1099,7 L/m³).

12 m³ kapasiteli biyogaz tesisinde tavuk gübresinin gaz verimi incelenmiştir. Doğal koşullarda yürütülen araştırmada biyoreaktör sıcaklığı 5-19 °C arasında gerçekleşmiştir. Tesisten 10 °C’ de 2,4 m³/gün, 15 °C’ de 4,8 m³/gün ve 19 °C’ de 6,9 m³/gün biyogaz elde edilmiştir.

Başka bir çalışmada ise hayvan sayılarına göre kurulacak biyogaz tesisi büyüklüğü tespit edilmiştir (21).

Çizelge 3.2. Tavuk ve büyükbaş hayvan işletmelerinin hayvan sayılarına bağlı olarak kurabilecekleri biyogaz tesislerinin; büyüklüğü, günlük biyogaz üretimleri ve bu gazın etkili eşdeğer ısı karşılığı LPG miktarları.

İşletmelerin Hayvan Sayısı	Uygun Tesis Büyüklüğü (m ³)	Günlük Beslemeler İçin Gereken Gübre (kg(yaş)/gün)	Üretilebilecek Biyogaz Miktarı (m ³ /gün)	Eşdeğer LPG Miktarı (kg)
2 500 adet tavuk	15	200	17	7
5 000 adet tavuk	30	400	34	14
10 000 adet tavuk	60	800	68	28
20 000 adet tavuk	120	1 600	136	56
50 000 adet tavuk	300	4 000	340	140
5 adet büyükbaş	5 m ³	75	2,5	1
10 adet büyükbaş	10	150	5	2
50 adet büyükbaş	50	750	25	10
100 adet büyükbaş	100	1 500	50	20

Biyoreaktör sıcaklığı: 30 °C, gübrelerin katı madde oranı: büyükbaş hayvan için 15 kg (yaş)/gün, tavuk için 0.08 kg (yaş)/gün, alıkoyma-bekleme süresi: büyükbaş hayvan için 30 gün, tavuk için 24 gün olarak kabul edilmiştir (21).

Anaerobik arıtım ve biyogaz üretimi ile ilgili bir çok akademik düzeyde de yapılmış çalışmalar vardır. Bunların birkaçı özetlenecek olunursa;

Kalyuzhnyi ve arkadaşlarının 1998 yılında yapmış oldukları çalışmada, tavuk gübresinin sıvı kısmının UASB reaktörlerde anaerobik arıtımını incelemiştir. Deneylerde kullanılan tavuk gübresi sıvı kısmının özellikleri 10,5 -20,0 gKOİ/L, 8,9-15,8 gTKM/L, 8,1-14,7 gUKM/L ve pH= 6,2-7,1 olup 35 °C' de iki adet paralel 26

L'lik reaktör kullanılmıştır. Besleme yapılmadan önce atıksuyun 1-2 gün boyunca 18-20 °C sıcaklıkta bekletilerek asit oluşum safhasının geçirilmesi sağlanmıştır. UASB reaktörlerinde organik besleme hızlarının 1-11 gKOİ/L.gün aralığında artırılmış ve 1-2 günlük bekleme sürelerinde çalışılmıştır. Çalışma sonucunda maksimum üretim hızının 11 gKOİ/L.gün organik besleme miktarı ile 3,5-3,6 L/L.gün biyogaz üretimin olduğu gözlenmiştir. Arıtım sonunda pH değerinin 8 civarında görüldüğü reaktörlerde oluşan biyogaz içerisindeki metan miktarının ise % 79-81 oranında olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada ayrıca % 70-75 oranında KOİ giderimi sağlanarak, tavuk gübresinden anaerobik metan üretiminde tavuk gübresinin sıvı kısmının kullanılmasının daha iyi bir verim sağladığı ve UASB reaktörlerin bu tür atıklardan metan üretiminde kullanılabileceği belirtilmiştir (30).

Bujoczek ve arkadaşlarının 2000 yılında yapmış oldukları çalışmada yüksek katı içerikli tavuk gübresinin anaerobik arıtılabilirliği incelenmiştir. Bu amaçla taze tavuk gübresi, 6 ay çukurda bekletilmiş tavuk gübresi ve anaerobik arıtım çamuru ile farklı oranlarda karıştırılarak, 35 °C 'de, 160 mL'lik şişelerinde, 119 günlük alıkonma sürelerinde , farklı katı madde derişimlerinde (%5-27 KM) metan üretim verimi bakılmıştır. Çalışma sonucunda, taze tavuk gübresinin tek başına anaerobik işleminde, maksimum metan üretim veriminin (5848 mLCH₄/gUKM_{gid.}) kütlece % 5 katı madde olacak şekilde sulandırılan gübreden elde edildiği tespit edilmiştir. Taze tavuk gübresinin, 6 ay bekletilmiş gübre ile karıştırılması ile metan üretiminin düştüğü belirtilmiş, anaerobik arıtma çamuru ile, kütlece %10,3 katı madde olacak şekilde ve % 40 taze gübre % 60 anaerobik çamuru olacak şekilde karıştırılmasının en uygun karışım olduğu belirlenmiştir. Çalışmada bu karışımla, 473 mLCH₄/gUKM_{gid.} metan verimi olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada ayrıca kullanılan gübrenin seyreltilmesinin reaktör performansını etkileyen en önemli faktör olduğu, organik yükleme hızındaki artışın organik maddelerin metana dönüşümünü düşürdüğü ve 250 mgNH₄/L ve üzeri derişimlerde amonyanın metan üretimini durdurduğu belirtilmiştir (31).

Collaghan ve arkadaşlarının 2001 yılında yapmış olduğu çalışmada sığır gübresi, meyve sebze atıkları ve tavuk gübresi karışımının anaerobik arıtım verimliliğine

etkisi incelenmiştir. Bu amaçla devamlı karıştırılmalı 18 L kapasiteli reaktör kullanılmış, 35 °C’ de mezofilik şartlarda çalışılmıştır. Bekleme süresinin 21 gün olduğu bu sistemde, değişen yükleme oranlarında 3,19-5,01 UKM/m³.gün yürütülmüştür. Karışım sığır gübresi + meyve-sebze atığı ve sığır gübresi + tavuk gübresi karışım oranları olarak belirlenmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki; sığır gübresi içerisindeki meyve sebze atıklarının % 20’den % 50’ ye yükseltilmesi, metanın 0,23’ den 0,45 m³ CH₄ kg⁻¹’ a çıkmasına neden olmuştur. Tavuk gübresi ve sığır gübresinin birlikte sindiriminde verimli sonuçlar elde edilmemiştir. Beslemedeki tavuk gübresi miktarının artması metan üretimi ve uçucu madde giderim verimini azaltmıştır. Bu azalma karışımın sıvı içeriğindeki serbest amonyak miktarının artması ve bakteri faaliyetlerinin durmasından kaynaklanmaktadır (32).

Itodo ve Awulu’nun 1999 yılında yaptıkları çalışmada, kümes, ahır ve domuz çiftliklerinden alınan gübrelerde katı madde oranının biyogaz üretimindeki etkisi incelenmiştir. En fazla biyogaz oluşumu sırasıyla kümes çiftliklerinden alınan gübreden, sonra domuz gübresinden ve en son olarak ahır gübresinden elde edilmiştir. Katı madde oranı olarak %5, %10, % 15, ve % 20 değerleri alınmıştır. Katı madde oranı arttıkça gaz veriminin azaldığını sonuçlar göstermiştir (33).

Güngör G. ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, tavuk ve büyükbaş hayvan gübresi ile bunların 5 değişik orandaki karışımı (%100 tavuk; %75 tavuk-%25 büyükbaş hayvan, %50 tavuk-%50 büyükbaş hayvan, %25 tavuk-%75 büyükbaş hayvan; ve %100 büyükbaş hayvan gübreleri) kullanılarak kesikli anaerobik reaktör deneyleri gerçekleştirilmiştir. İki farklı kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) (12 000 mg/l ve 53 500 mg/l) ve toplam katı madde (TKM) (%1 ve %4,3) derişiminde çalışılmıştır. Besin takviyesinin etkisini belirlemek üzere bu deneyler hem basal ortam (BO) içeren hem de içermeyen reaktörlerde gerçekleştirilmiştir. Düşük KOİ içeren reaktörlerde 41 gün sonunda elde edilen biyogaz verimi ortalama 245 mL biyogaz/eklenen g KOİ, biyogaz içindeki metan yüzdesi % 57-67, yüksek KOİ içeren reaktörlerde ise 91 gün sonunda ortalama 300 mL biyogaz/ eklenen g KOİ, biyogaz içindeki metan yüzdesi % 49-67 olmuştur. KOİ derişimi arttıkça tavuk gübresi için verimin düştüğü görülmüştür (34).

Ergüder ve arkadaşlarının 1998 yılında yapmış olduğu bir çalışmada tavuk besleme çiftlikleri atıklarının anaerobik arıtılabilirliği araştırılmıştır. Deneysel çalışmada % 89,7 sıvı madde içeren seyreltilmemiş tavuk atığı kullanılmıştır. Deney sonucunda litre başına yaklaşık 6,9-7,3 L metan üretilmiştir. Deneysel çalışmada, kullanılan anaerobik kültürün tavuk atığına alıştırmamış olması ve oldukça yüksek KOİ değerlerine (1 262, 3 785, 6 308, 12 617, 17 633 mg/L) sahip olduğu göz önüne alındığında, tavuk atığının anaerobik olarak yüksek arıtılabilirliğe sahip olduğunu gözlenmiştir. Ayrıca çalışma sonunda tavuk atığının anaerobik giderimi için fazladan besiyer eklenmesine gerek olmadığı görülmüştür (3).

Chaly ve arkadaşlarının 1996 yılında, yaptığı bir çalışmada farklı sıcaklıkta ve alıkonma sürelerinde , manda gübresi ve asidik peyniraltı suyunun 2 aşamalı anaerobik çürütücüdeki performansı araştırılmıştır. Çürütücü, reaktör içerisindeki mikrobiyal faaliyetleri maksimum edecek gerçek bir separatör gibi davranacak şekilde tasarlanmış ve üç farklı alıkonma süresinde (10, 15 ve 20 gün) ve iki farklı sıcaklıkta (25⁰C ve 35⁰C) işletilmiştir. pH denetiminin sürece olan etkisi incelenmiştir. Sonuçlar, pH denetimi olmadan peyniraltı suyu ve manda gübresinden biyogaz üretiminin imkansız olduğunu göstermiştir. Methanojenik basamağın pH değerini denetlemek biyogaz üretim oranını ve metan oluşumunu 2,7 – 3,0'lük bir faktörle artırmıştır (35).

Ernest ve arkadaşlarının 2001 yılında yapmış oldukları bir çalışmada mezofilik şartlarda tavuk çiftliği atıksularının UASB reaktörlerde arıtımı ve metan üretim verimliliği incelenmiştir. 978 mgKOİ/L, 0,85 gAKM/L ve pH = 6,5 özelliğine sahip olan tavuk çiftliği atıksuları, 3,5 L'lik UASB reaktörde, 30 ⁰C' de ve 95 günlük alıkonma süresinde çalışılmıştır. Çalışma sonuçlarını göre, maksimum KOİ giderimi 2,9 kgKOİ m³/gün organik besleme hızında ve 13.2 saat HRT'de % 78 oranında sağlanmıştır. Ortalama biyogaz üretim hızı ise 1,44 kgKOİ m³/gün organik yükleme hızında % 57 CH₄ içeriği ve biyogaz üretim hızı, 0,26 m³biyogazm³/gün olduğu belirtilmiştir (36).

Guowei ve arkadaşlarının 1997 yılında yapmış oldukları çalışmada, taze tavuk gübresinden santrifüj yöntemiyle elde edilen sıvı kısmına (80 kgKOİ/L), 4 L 'lik UBF reaktörde ve 35°C 'de anaerobik arıtımı incelenmiştir. UBF reaktör, UASB reaktöre yumuşak plastik liflerden dolgu eklenerek oluşturulmuştur. Deneyler 17 ve 41 günlük iki fazlı başlangıç ve 19 günlük yatışkın durum bölümlerinden oluşan toplam 77 gün sürmüştür. İlk başlangıç fazında $2.97 \text{ kgKOİ m}^3/\text{gün}$ organik besleme hızı ile 10,04 saat hidrolik bekleme süresinde % 76,85 KOİ giderimi ve ortalama $173,93 \text{ Lbiyogaz/kgKOİ}_{\text{gid.}}$ verimle biyogaz üretilmiştir. İkinci başlangıç fazında ise $11,69 \text{ kgKOİ m}^3/\text{gün}$ organik besleme hızı ile 16,45 saat hidrolik bekleme süresinde % 82,47 KOİ giderimi ve ortalama $395,3 \text{ Lbiyogaz/kgKOİ}_{\text{gid.}}$ biyogaz üretilmiştir. Çalışmanın 58. gününden sonra $28,85 \text{ kgKOİ m}^3/\text{gün}$ organik besleme hızı ile 18,73 saat hidrolik bekleme süresinde % 80,03 KOİ giderimi ve $437,34 \text{ Lbiyogaz/kgKOİ}_{\text{gid.}}$ verimle biyogaz üretilmiştir. Çalışma sonucunda ayrıca UBF reaktörün, anaerobik metan üretiminde reaktör performansını etkileyen parametreleri elimine ettiği, değişik tipte filtreler kullanılarak performansın arttırılabileceği belirtilmiştir (37).

4. MATERYAL VE METOT

4.1. Deneylerde Kullanılan Tavuk Gübresinin Bileşimi ve Özellikleri

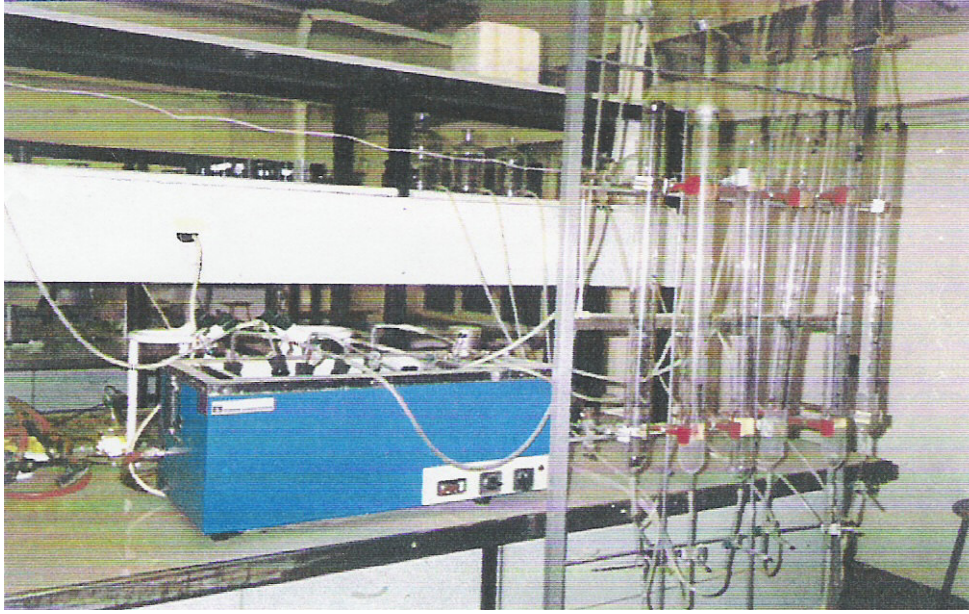
Deneyisel çalışmada kullanılan hammadde, tavuk gübresi ve aşı olarak alınan aktif çamur karışımıdır. Tavuk gübresi Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Hayvan Besleme Tesislerinden ve aktif çamur ise ASKİ' nin Ankara Atıksu Arıtma Tesisi anaerobik çamur çürütme tanklarından temin edilmiştir. Alınan numuneleri karakterize etmek amacıyla yapılan deneyisel çalışmalar ve sonuçları Çizelge 4.1.'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Tavuk gübresi ve anaerobik tanklardan alınan aktif çamurun özellikleri

Parametreler	Tavuk Gübresi	Anaerobik tanklardan alınan aktif çamur
KOİ mg/l	1 8350	-
Katı Madde %	24	2,45
Uçucu katı madde (organik madde) mg/l	73,6	-
Karbon İçeriği %	27,45	-
Azot İçeriği %	1,19	-
C/N	23,06	-

4.2. Deney Düzenegi

Deneylerde, reaktör olarak 250 ml hacimli 14 adet erlen kullanılmıştır ve kesikli sistemde çalışılmıştır.

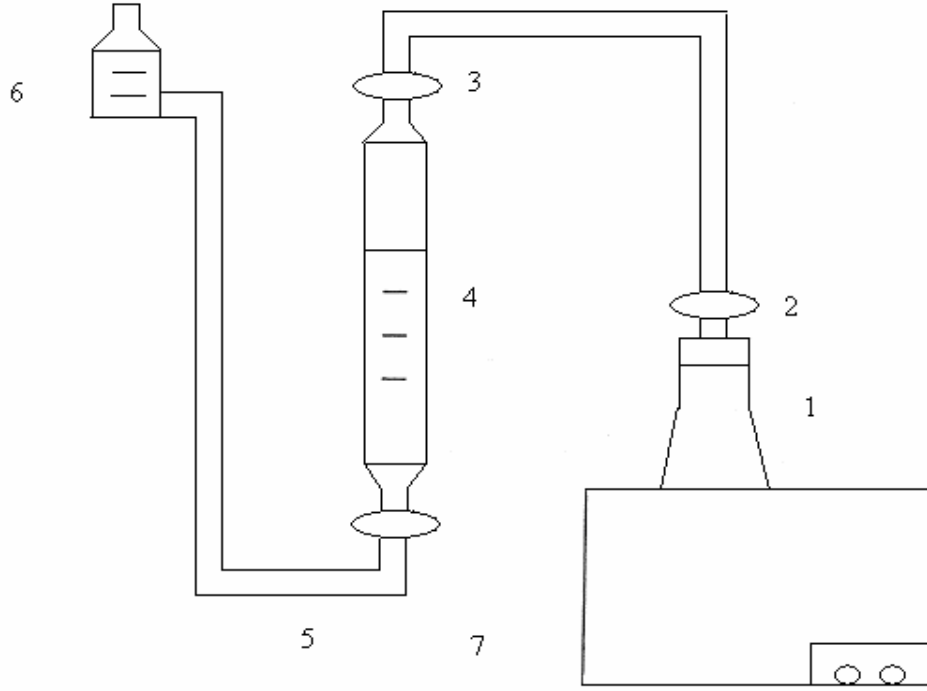


Resim 4.1. Deney düzeneği

Erlenlerin dış yüzeyi siyah cam boyasıyla boyanmış ve 3 saat 105°C sıcaklıkta etüvde tutularak daha dayanıklı olması sağlanmıştır. Bunun nedeni ise, metan bakterilerin sıcaklığa olduğu kadar ışığa karşı da duyarlı olmasındandır (38).

Anaerobik koşulların sağlanması için, tavuk gübresi erlenlere yerleştirildikten sonra erlenlerin ağzı tıpayla kapatılarak hava girişi engellenmiştir. Ancak oluşacak gazın çıkışı sağlanması için tıpanın ucuna silikon-kauçuk hortum bağlanmıştır.

Reaktör içerisinde, anaerobik koşullar sonucunda oluşan gazın toplanması için, 1 L hacimli dereceli büretler kullanılmıştır. Büretlerin içerisinde yer değiştirme sıvısı olarak sulu $\text{Na}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{SO}_4$ doymuş çözeltisi kullanılmıştır. Bu çözelti yerine civada kullanılabilirdi, ancak pahalı olduğu için tercih edilmemiştir. Seviye şişesinin aşağı-yukarı hareketi ile de bürete gelen gazın hacmi okunmuştur. Gaz toplama düzeneği Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Gaz toplama düzeneği

1. Reaktör 2. İki yöllü musluk 3. Üç yöllü musluk 4. Gaz toplama büreti
5. Silikon kauçuk hortum 6. Seviye şişesi 7. Çalkalamalı su banyosu

Sistemde, erlen gaz toplama büretleri ve gaz toplama büretlerinin seviye şişelerine bağlantısını sağlamak için silikon-kauçuk hortumlar kullanılmıştır. Kullanılan hortumlar, daha dayanıklı oluşu ve sızma yapmaması gibi nedenlerle tercih edilmiş olup eşit uzunlukta oluşuna dikkat edilmiştir.

Çalışma sırasında; örnek alınmasının gerekli olduğu durumlarda, pH denetimi yapılırken seviye şişelerinde oluşan gazın sistemden uzaklaşmaması için çift yönlü musluk kullanılmıştır. Ayrıca gaz toplama büretlerinin seviyelerini ayarlamak ve büretlerde oluşan gazın boşaltılmasını sağlamak amacıyla da alt ve üst kısımlara birer tane üç yöllü musluk takılmıştır.

4.3. Deneysel Parametrelerin Belirlenmesi

Çalışmada, KOİ’deki azalma miktarına (%) ve gaz üretimine pH ve sıcaklığın etkisi incelenmiş ve deneyler, Box-Wilson deneysel tasarım yöntemine göre

tasarlanarak bu parametrelerin optimum değerleri bulunmuştur. Literatür değerleri karşılaştırılarak sıcaklık ve pH için çalışma aralıkları belirlenmiştir.

4.3.1. Sıcaklık

Metan üreten bakterilerin, büyümeleri ve faaliyetlerini gerçekleştirebilmeleri sıcaklıkla doğrudan bağlantılıdır. Bu yüzden bu çalışmada, sıcaklık bir parametre olarak seçilmiştir. Literatür değerleri doğrultusunda mezofilik şartların olduğu, 33⁰C – 37⁰C sıcaklık aralığı seçilmiştir. Deneylerde sıcaklığın denetimini sağlamak için çalkalamalı, sıcaklık denetimli su banyoları kullanılmıştır.

4.3.2. pH

Anaerobik süreçlerde, mikroorganizmaların davranışlarını ve substratın çözünübilirliğine etki eden en önemli parametrelerden biride pH'dır. Bir çok farklı mikroorganizma topluluğunun bulunduğu anaerobik sistemlerde, bakterilerin maksimum gelişmesini sağlayacak bir pH aralığı sağlanmalıdır. Bu yüzden çalışmamızda, pH da bir parametre olarak seçilmiştir. Literatür bilgileri doğrultusunda pH 6,6-7,4 aralığında seçilmiştir. Deneyler sırasında pH ölçümleri 8314 model, Hanna Instruments marka bir pH metre kullanılarak sağlanmıştır. pH kontrolü 1M NaOH ve 1M H₂SO₄ tampon çözeltisi ile yapılmıştır.

4.3.3. Karıştırma

Deneylerde, her saat başı pH denetimi yapıldığı için, sürekli karıştırma yapılmasıyla sistemde oksijen transferinin artmasına sebep vereceği için periyodik karıştırma tercih edilmiştir. Periyodik karıştırma işlemi gazın reaktörün üst kısmında birikiminin engellemek ve hortumlara iletimini kolaylaştırmak amacıyla pH denetiminden önce 1 dakikalık süreyle yapılmıştır. Karıştırma işlemi için çalkalamalı ve sıcaklık denetimli su banyoları kullanılmıştır.

4.3.4. Katı madde oranı

Biyogaz üretiminde kullanılan organik atıkların katı madde içerikleri, optimum gaz üretimi ve gaz içerisindeki metan yüzdesini büyük oranda etkilemektedir. Bu yüzden katı madde oranı da bir parametre olarak seçilmiştir. Çalışmalar boyunca katı madde oranı literatür değerleri doğrultusunda %8 olarak ayarlanmıştır.

4.3.5. Bekleme süresi

Yirmi dört saatlik bir bekleme süresi seçilmiştir. Yirmi dört saatlik bekleme süresinde çalışılmasının sebebi; ilk yirmi dört saatte aktivitenin fazla olmasıdır.

4.4. Analiz Yöntemleri

Deneysel çalışmalardaki analizler standart yöntemlere göre yapılmıştır.

Deneysel çalışmada yapılan analizler aşağıda sıralanmıştır.

- Toplam katılar
- Toplam uçucu katılar (organik madde)
- Toplam sabit katılar
- Toplam organik karbon
- pH
- Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ)
- Azot tayini
- Gaz hacmi

4.4.1. Toplam katılar

Bir cam kroze alındı, duyarlı terazide tartıldı ve darası kaydedildi. Cam kroze sabit tartıma gelinceye kadar $103^{\circ}\text{C} - 105^{\circ}\text{C}$ de etüvde tutuldu. Desikatörde 20 dakika soğutuldu ve tekrar duyarlı terazide tartıldı ve darası kaydedildi. Tavuk gübresi numunesi iyice karıştırıldıktan sonra alınarak cam kroze içerisine konuldu ve tekrar tartıldı. Bulunan tartımdan dara çıkarılarak tartım sonucu kaydedildi (m_1). Katı madde içeriğini belirlemek için cam kroze, $103^{\circ}\text{C} - 105^{\circ}\text{C}$ de 24 saat etüvde tutuldu. Cam kroze etüvden alınarak desikatörde 20 dakika soğutuldu ve daha sonra tekrar tartıldı. Bu değerden dara çıkartılarak ikinci tartım bulundu (m_2). Aşağıda verilen Eş. 4.1'e göre katı madde miktarı belirlendi.

$$\% \text{ KM} = 100 - [(m_1 - m_2) / m_1] \times 100 \quad [4.1]$$

Burada;

m_1 = ilk tartım, gr

m_2 = Son tartım (etüvden sonra), gr

% KM = Katı madde miktarı

4.4.2. Toplam uçucu katı (Organik madde içeriği) tayini

Bir porselen kroze alındı, duyarlı terazide tartıldı ve darası kaydedildi. Porselen kroze sabit tartıma getirilmek için $550^{\circ}\text{C} - 600^{\circ}\text{C}$ ' de fırında tutuldu. Daha önce etüvde kurutulmuş tavuk gübresinin iki ayrı noktasından atık örneği alınarak porselen kroyeye konuldu. Tekrar tartıldı ve yapılan tartımdan dara çıkartılarak tartım sonucu kaydedildi (m_1). Porselen kroze $550^{\circ}\text{C} - 600^{\circ}\text{C}$ ' de 3 saat süre ile fırında tutuldu. Daha sonra kroze fırından çıkarılarak desikatörde 20 dakika süre ile soğutuldu ve daha sonra tartıldı. Bulunan tartım sonucundan dara çıkartılarak tartım sonucu kaydedildi (m_2). m_2 değeri, inorganik madde miktarını verir. m_1 ile m_2 arasındaki fark ise organik madde içeriğidir.

$$\% Om = [(m_1 - m_2) / m_1] * 100 \quad [4.2]$$

Burada;

m_1 : İlk tartım, gr

m_2 : Son tartım (fırından sonra), gr

$\% Om$: Yüzde organik madde içeriği

4.4.3. Toplam sabit katı (İnorganik madde içeriği) tayini

Toplam uçucu katı tayini işleminde, fırında yakılma işlemi sonrası porselen krozede kalan kısmın ağırlığı toplam sabit katı miktarı olarak alınmıştır.

$$\% İm = (m_2 / m_1) * 100 \quad [4.3]$$

Burada;

m_1 : İlk tartım, gr

m_2 : Son tartım (fırından sonra), gr

$\% İm$: Yüzde inorganik madde içeriği

4.4.4. Toplam organik karbon içeriği

Organik madde muhtevassından karbon içeriğine geçmek için korelasyon katsayısı $R^2 = 0,82$ olan bir regrasyon denklemi kullanıldı (1).

$$C_t = 3,2 \sqrt{Om} \quad [4.4]$$

C_t : Toplam karbon içeriği, %

Om : Organik madde içeriği, %

4.4.5. pH

Deneyler sırasında pH ölçümünü, HI 8314 model, Hanna Instruments marka bir pH metre kullanılarak yapılmıştır.

4.4.6. Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ)

Kimyasal oksijen ihtiyacı, örneğin organik madde içeriğine eşdeğer oksijen miktarının bir ölçüsüdür. Organik madde içeren örnek, kromik ve sülfürik asidin kaynayan bir karışımı ile yükseltgenir. Örnek, kuvvetli asit çözeltisinde aşırı potasyum dikromat ($K_2Cr_2O_7$) ile işleme sokulur. Örnek içerisindeki organik madde, eşdeğer miktarda $K_2Cr_2O_7$ 'i tüketir. Tükenen $K_2Cr_2O_7$ 'nin miktarının organik madde miktarının belirlenmesi için, artan $K_2Cr_2O_7$ demir-2amonyum sülfat (DAS) ile titre edilir. Böylece, oksitlenebilen organik maddeye eşdeğer oksijen miktarı hesaplanır. Organik maddenin oksijeni tüketme süresi yaklaşık olarak 2 saattir.

Tayinde kullanılan aletler aşağıda sıralanmıştır.

- 1) Geri soğutucu
- 2) 500 ml balon
- 3) Yeterli güce sahip ceketli ısıtıcı

Tayin süresince kullanılacak reaktifler aşağıdaki gibi hazırlanmıştır.

- 1) Standart potasyum dikromat reaktifi, 0,0417 M : 2 saat süre ile 103 °C' de önceden kurutulmuş primer standart 12,259 gram $K_2Cr_2O_7$ saf suda çözüldü ve 1000 mL' ye seyreltildi.
- 2) Sülfürik asit reaktifi : 5,5 gram Ag_2SO_4 / 1 kg H_2SO_4 hızında derişik H_2SO_4 'e teknik, kristal veya toz Ag_2SO_4 eklendi. Ag_2SO_4 'ün çözünmesi için 1-2 gün bekletildi.

- 3) Ferroin indikatör reaktifi : 1,485 g. 1,10-fenantrolin monohidrat ve 695 mg. $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ saf suda çözüldü ve 100 mL'ye seyreltildi. Bu indikatör çözeltisi hazırda satın alınabilir.
- 4) Standart demir-2-amonyum sülfat (DAS) titrant, 0,25 M : 98 g. $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ saf suda çözüldü. 20 mL derişik H_2SO_4 eklendi, soğutuldu ve 1000 mL' ye seyreltildi. Bu çözeltinin günlük standardı, standart $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ çözeltisinden aşağıdaki gibi yapıldı.

10 mL standart $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, yaklaşık olarak 100 mL' ye seyreltildi. 30 mL derişik H_2SO_4 eklendi ve soğutuldu. 0,1-0,15 mL (2-3 damla) ferroin indikatörü kullanılarak DAS titrantı ile titre edildi.

$$\text{DAS titrantının Molaritesi} = \frac{0,0417 \text{ M } \text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \text{ reaktifinin hacmi, mL} \times 0,25}{\text{Titrasyonda kullanılan DAS hacmi, mL}}$$

Civa-2-sülfat : kristal veya toz

Deneyin yapılışı:

50 mL'ye seyreltilmiş tavuk gübresi 500 mL' lik bir balona konuldu. 1g HgSO_4 , bir cam boncuk ve 5 mL sülfirik asit reaktifi çok yavaş eklendi. Karıştırılarak HgSO_4 ' ın çözülmesi sağlandı. Uçucu maddelerin kaybını azaltmak için karıştırılırken soğutuldu. 25 mL 0,0417 M $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ reaktifi eklendi ve karıştırıldı. Erlen soğutucuya bağlandı ve soğuk su açıldı. Kalan sülfirik asit reaktifi, soğutucunun açık uçundan eklendi. Sülfirik asit reaktifi eklenirken sürekli döndürülürdü ve karıştırıldı. Geri akan karışımdan yabancı maddeleri uzaklaştırmak için küçük bir beher ile soğutucunun açık ucu kapatıldı ve 2 saat geri soğutucu altında kaynatıldı. Saf su ile soğutucu soğutuldu ve temizlendi. Hacminin yaklaşık iki katına saf su ile seyreltilen karışım ile geri soğutucunun bağlantısı kesildi. Oda sıcaklığına soğutuldu ve DAS ile aşırı $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ titre edildi. 0,1-0,15 mL (2-3 damla) ferroin indikatörü kullanıldı. Ferroin indikatörünün miktarı kritik olmamasına rağmen tüm titrasyonlar için aynı

hacim kullanıldı. Titrasyonun dönüm noktasında mavi yeşilden kırmızı kahverengine doğru şiddetli bir renk dönüşü oldu. Aynı yolla bir de tanık deney yapıldı.

Deney sonucunda KOİ değerleri Eş. 4.5 ile hesaplanmıştır.

$$\text{KOİ mgO}_2/\text{L} = (\text{A}-\text{B}) * \text{M} * 8000 / \text{mL örnek} \quad [4.5]$$

Burada:

A: Tanık deney için kullanılan DAS hacmi, mL

B: Örnek deney için kullanılan DAS hacmi, mL

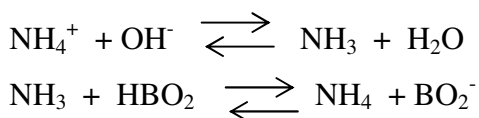
M: DAS titrantının molaritesi

4.4.7. Azot tayini (Kjeldahl metodu)

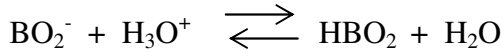
Azot, gübrelerde organik veya inorganik bileşikler halinde bulunabilir. Bununla beraber gübrelerde sadece toplam azot miktarının tayini istenir.

Kjeldahl yöntemi yalnız organik azot ve amonyak içeren örneklerle uygulanabilir. Nitrat halindeki azot bu yöntemle tayin edilemez. Yöntem yaygın kullanım alanına sahiptir. Özel bir sistem gerektirmez ve büyük miktardaki örneklerin sürekli testleri bu yöntem ile kolaylıkla gerçekleştirilebilmektedir.

Bu yöntemde örnek içindeki azot, sıcak derişik sülfirik asit ile amonyum sülfat haline dönüştürülür. Yalnız sülfirik asit kullanıldığı taktirde tepkime yavaş gerçekleşir. Sıcaklığı yükseltmek ve tepkime hızını artırmak için ortama potasyum sülfat, civa-2-oksit, selenyum gibi maddeler ilave edilir. Parçalama tamamlandıktan sonra ortama sodyum hidroksit eklenerek amonyak serbest hale geçirilir ve borik asit çözeltisi ile tutulur.



Oluşan borat iyonu hidroklorik asit çözeltisi ile bromokrezol yeşili veya bromofenol mavisi indikatörü yanında titre edilir.



Deneyin yapılışı:

- 1) 0,2 g. gübre numunesi tartılarak kjeldahl balonuna kondu. Üzerine 20 mL damıtık su ve 3 damla fenol ftalein indikatör çözeltisi eklendi.
- 2) Balon, sisteme yerleştirildi ve sisteme buhar gönderilmeye başlandı. Sistemden bol miktarda buhar geçirilerek havanın boşalması sağlandı.
- 3) Erlene 50 ml % 4' lük borik asit çözeltisi ve 1-2 damla bromokrezol yeşili veya bromofenol mavisi indikatörü konularak sisteme yerleştirildi. Yerleştirme sırasında soğutucunun ucunun erlenin dip kısmına yakın olması esas alındı.
- 4) Damlatma hunisinin musluğu açılarak içine konmuş olan % 20' lik sodyum hidroksitin damla damla akması sağlandı. Çözeltinin rengi pembeye döndüğü anda nötralleşme tamamlanmış demektir. Bu anda huninin musluğu kapatıldı.
- 5) Sisteme buhar gönderilerek açığa çıkan amonyağın soğutucuya sürüklenmesi sağlandı. Bu işleme balondaki çözeltiden gaz çıkışı bitinceye kadar devam edildi. Gaz çıkışı tamamlandıktan sonra 5 dakika daha buhar gönderilmesine devam edilerek sistemde amonyak kalmaması sağlandı.
- 6) Erlen sistemden alındı ve ayarlı 0,1 N hidroklorik asit çözeltisi ile borik asit titre edilerek harcanan HCl miktarı ml olarak kayıt edildi (V_1).
- 7) Erlene 50 mL % 4' lük borik asit çözeltisi ve 1-2 damla daha önce kullanılan indikatörden konarak 0,1 N HCl ile titre edildi. Harcanan asit miktarı ml olarak kayıt edildi (V_2).
- 8) Eş. 4.6 yardımıyla numunedeki azot miktarı hesaplandı.

$$\% \text{ Azot (m/m)} = (V_1 - V_2) \cdot N_{\text{HCl}} \times 1,4 / (\text{g numune miktarı})$$

[4.6]

4.4.8. Gaz hacmi

Atıkların anaerobik arıtımı süresince oluşan gazın toplanması için, 1 L hacimli dereceli büretler kullanıldı. Büretlerin içerisine yer değiştirme sıvısı olarak sulu $\text{Na}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{SO}_4$ 'in doymuş çözeltisi kullanıldı (38).

Sodyum sülfat-sülfürik asit çözeltisi 800 mL saf su içinde 200 g. Na_2SO_4 çözülerek ve 30 mL derişik H_2SO_4 eklenerek hazırlanmıştır.

4.5. Box – Wilson Deneysel Tasarım Yöntemi ile Anaerobik Arıtım ve Gaz Üretimi için Optimum Koşulların Bulunması

Gaz üretimi için deneysel tasarım değişkenleri, seviye ve aralıkları Çizelge 4.2.'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Deneysel tasarım değişkenleri, seviye ve aralıkları

Bağımsız değişkenler	Aralık ve seviyeleri				
	- α	- 1	0	+1	+ α
Sıcaklık, $^{\circ}\text{C}$	32,1	33	35	37	37,8
pH	6,44	6,6	7	7,4	7,56

Çizelge 4.2.'de hesaplanan - α ve + α değerleri Eş. 2.6'dan yararlanılarak bulunmuştur. Sıcaklık için adım aralığı 2, pH için adım aralığı ise 0,4 olarak alınmıştır.

Deneysel tasarım matrisinin kodlanmış ve gerçek değerleri ile 2^2 faktöriyel merkezi bileşim değerleri Çizelge 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Deneysel tasarım matrisinin kodlanmış ve doğal değerleri ile 2^2 faktöriyel merkezi bileşim değerleri

Deney No	U_1	U_2	$X_1, (T, ^\circ C)$	$X_2, (pH)$
1	-1	-1	33	6,6
2	+1	-1	37	6,6
3	-1	+1	33	7,4
4	+1	+1	37	7,4
5	0	0	35	7,0
6	0	0	35	7,0
7	0	0	35	7,0
8	$-\alpha$	0	32,2	7,0
9	$+\alpha$	0	37,8	7,0
10	0	$-\alpha$	35	6,43
11	0	$+\alpha$	35	7,57
12	0	0	35	7,0
13	0	0	35	7,0
14	0	0	35	7,0

5. DENEYSEL SONUÇLAR

5.1. Başlangıç Analiz Sonuçları

Deneysel çalışmanın ilk aşamasında, tavuk gübresini karakterize etmek amacıyla standart yöntemlere göre deneyler yapılmış ve sonuçları Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Tavuk gübresi özellikleri

Parametreler	Tavuk Gübresi
KOİ mg/l	1 8350
Katı Madde %	24
Uçucu katı madde (organik madde) %	73,6
Karbon İçeriği %	27,45
Azot İçeriği %	1,19
C/N	23,06

5.2. Deney Sonuçları

5.2.1. KOİ analiz sonuçları

24. saat sonucunda örneklerden elde edilen KOİ analiz sonuçları, Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. 24. saat sonundaki KOİ miktarları ve % KOİ azalımı

Deney No	KOİ, mgO ₂ /l.gün tavuk gübresi	KOİ'daki % azalma
1	13 836	24,6
2	12 313	32,9
3	13 257	27,77
4	9 130	50,24
5	10 320	43,76
6	9 575	47,82
7	10 775	41,28
8	13 428	26,82
9	10 254	44,12
10	11 505	37,30
11	10 845	40,09
12	9 944	45,81
13	9 875	46,18
14	9 624	47,55

5.2.2. Gaz hacimleri ve üretim hızları

Deney süresince oluşan gaz hacimleri ve üretim hızları Çizelge 5.3'de verilmiştir.

Çizelge 5.3. Reaktörlerde 24. saat sonunda oluşan gaz miktarları ve üretim hızları

Deney no	Gaz hacmi, mL/100mL örnek	Gaz üretim hızı, mL/100mL örnek. saat
1	53	2,21
2	93	3,88
3	56,5	2,35
4	68	2,83
5	70	2,92
6	74	3,08
7	77	3,21
8	62,5	2,61
9	99	4,13
10	56	2,33
11	52	2,16
12	75	3,13
13	70,5	2,94
14	67,5	2,81

6. BOX WILSON DENEYSEL TASARIM YÖNTEMİ İLE OPTİMUM KOŞULLARIN BELİRLENMESİ

İstatiksel optimizasyon yöntemi olan cevap yüzey yöntemi kullanılarak, tavuk gübresinin anaerobik arıtımı ve gaz üretimi için optimum koşullar belirlenmiştir. Tavuk gübresinin anaerobik arıtımı ve gaz üretimi üzerine pH ve sıcaklığın etkisinin incelendiği bu çalışmada , 2^2 tam faktöriyel merkezi bileşen kullanılarak parametrelerin en uygun koşulları belirlenmiştir. Bu parametrelerin gerçek ve kodlu değerleri Çizelge 4.3’ de verilmiştir. Bu değerlerin maksimum ve minimum değerleri, literatür değerleri ile belirlenmiştir. Deneysel tasarım yönteminde kullanılan bağımsız süreç değişkenleri ise Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Deneysel tasarım yönteminde kullanılan bağımsız değişkenler

Bağımsız değişken	Tasarım değişkeni
Sıcaklık, T ($^{\circ}$ C)	X ₁
pH	X ₂

Deneysel tasarım yönteminde kullanılan bağımlı değişkenler, Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Deneysel tasarım yönteminde kullanılan bağımlı değişkenler

Bağımlı değişkenler	Tasarım değişkeni
24. saat sonundaki KOİ’ daki azalma, %	Y ₁
24. saat sonundaki gaz üretim hızı mL/100mL örnek.saat	Y ₂

Deneysel tasarım matrisine göre elde edilen sonuçlar Çizelge 6.3’de verilmiştir.

Çizelge 6.3. pH ve sıcaklık değerleri ile 24. saat sonunda elde edilen KOİ yüzde azalma miktarları ve gaz hacimleri

Deney no	X ₁	X ₂	Y ₁	Y ₂
1	33	6,6	24,6	2,21
2	37	6,6	32,9	3,88
3	33	7,4	27,77	2,35
4	37	7,4	50,24	2,83
5	35	7,0	43,76	2,92
6	35	7,0	47,82	3,08
7	35	7,0	41,28	3,21
8	32,1	7,0	26,82	2,61
9	37,8	7,0	44,12	4,13
10	35	6,43	37,30	2,33
11	35	7,57	40,09	2,16
12	35	7,0	45,81	3,13
13	35	7,0	46,18	2,94
14	35	7,0	47,55	2,81

Design expert istatistiksel paket programı ile Eş. 2.5 her bir deney sonucu için çözülmüştür.

6.1. KOİ' daki Azalma Miktarı (%) için Elde Edilen Sonuçlar

6.1.1. KOİ' daki azalma miktarı (%) için model denkleminin kurulması

Yapılan çözüm sonucu KOİ'daki azalma yüzdesi için hesaplanan katsayılar ve istatistiksel hesaplamalar Çizelge 6.4'de verilmiştir.

Çizelge 6.4. KOİ azalma yüzdesi için parametreler arasında ihmal yapılmadan bulunan katsayılar ve istatistiksel hesaplamalar

$Y_1 = a + b \cdot X_1 + c \cdot X_2 + d \cdot X_1 \cdot X_2 + e \cdot X_1^2 + f \cdot X_2^2$			
Model Parametresi	Hesaplanan Katsayılar	P değeri	Standart Hata
Sabit	45,40	0,0007	1,37
X_1	6,90	0,0004	1,19
X_2	3,06	0,0333	1,19
$X_1 X_2$	3,54	0,0685	1,24
X_1^2	-5,77	0,0016	1,24
X_2^2	-4,15	0,0101	7,77

Modelde yapılan çözüm sonucunda KOİ’deki azalma miktarı (%) için elde edilen model eşitliği, hiçbir model parametresi ihmal edilmeden aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$Y_1 = 45,40 + 6,90 \cdot X_1 + 3,06 \cdot X_2 + 3,54 \cdot X_1 \cdot X_2 - 5,77 \cdot X_1^2 - 4,15 \cdot X_2^2 \quad [6.1]$$

$R^2 = 0,9040$ olarak bulunmuştur.

Bulunan bu eşitlikte, yüzde KOİ’deki azalma miktarı; pH ve sıcaklığa bağlı olarak bulunmuştur. Burada görülen R^2 değeri, bağımlı değişkenin, bağımsız değişkenler tarafından ne kadar iyi açıklandığını gösterir. Bu durum istatistiksel olarak ifade edilirse; regresyon modelindeki bağımlı değişkenlerin ortalamadan sapmalarının, deneysel olarak elde edilen bağımlı değişkenlerin ortalamadan sapmalarına oranı olarak ifade edilir. R^2 değerinin 0,7-1,0 aralığında olması modelin doğruluğu hakkında bilgi verir.

Modelde hesaplanan KOİ’deki azalma miktarı (%) için R^2 değeri 0,9040 olarak bulunmuştur. Sonuç olarak, KOİ’deki azalma miktarı için modeldeki R^2 değerinin 0,9040 olarak bulunması, modelden hesaplanan değerle deneysel değerler karşılaştırıldığında deneysel sonuçların kabul edilebilir bir uyum içerisinde olduğunu göstermiştir.

X_1 ve X_2 birbirleriyle olan bütün etkileşimleri yaptırıldığında ve parametreler arasında gerekli ihmallere yapıldığında, parametre sayısının az ve R^2 değerinin büyük olmasından dolayı en uygun parametre ve etkileşimlerinin X_1 , X_1^2 , X_1X_2 , X_2 , X_2^2 olduğu görülmüştür.

Modelde ayrıca, P değerleri her bir katsayının sistem için önemi göstermektedir. Modeldeki parametrelerden P değeri 0,05'den küçük olan değerler diğer model parametrelerinden daha önemlidir. P değeri 0,1'den büyük olan parametreler modelde ihmal edilebilirler. Çizelge 6.4'e bakıldığında, kesikli sistemde KOİ'daki azalma yüzdesi üzerine en etkin parametrenin X_1 sıcaklık olduğu [$(X_1$ için $P=0,0004$) ve $(X_1^2$ için $P=0,0016$)] görülmektedir. Sistem için sıcaklıktan sonra etkin olan diğer parametrenin ise, pH [$(X_2^2$ için, $P=0,0094$) ve $(X_2$ için, $P=0,0333$)] olduğu görülmektedir.

Burada, parametreler arasındaki iç etkileşimler değerlendirildiğinde sıcaklık, pH arasındaki etkileşiminin (X_1X_2 için, $P=0,0659$) tüm sistemdeki etkisinin en az olduğu görülmektedir.

6.1.2. 24. saat sonundaki KOİ'daki azalma miktarı (%) için ANOVA testi sonuçları

Modelde hiçbir parametrenin ihmal edilmesine gerek görülmemiştir. Model denkleminde ANOVA testi uygulanarak elde edilen sonuçların doğruluğu kontrol edilmiştir.

Çizelge 6.5. 24 saat sonundaki KOİ' daki azalma yüzdesi için ANOVA testi sonuçları

ANOVA	Kareler Toplamı	Karaler toplamı, %	Karaler Oranı		Serbestlik derecesi
Kaynak	KT	KT%	KO	F	df
Model	854,13	90,3	170,83	15,06	5
Hata	90,73	9,7	11,34		8
Toplam	944,85	100			13

Regrasyon katsayısı $R^2 = 854,13 / 944,85 = 0,9040$ olduğu görülmektedir. R^2 değeri model kareler toplamının, toplam hata kareler toplamına oranıdır. Bu değer, oluşturulan modelin bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi iyi ifade ettiğini göstermektedir.

6.1.3. 24. saat sonunda deneysel ve modelden belirlenen KOİ azalma miktarlarının (%) karşılaştırılması

Çizelge 6.6.' da daha önceden belirlenen parametreler için modelden hesaplanan ve deneysel olarak bulunan KOİ' daki azalma miktarının (%) karşılaştırmalı değerleri ve % hata oranları verilmiştir. Görüldüğü gibi deneysel olarak bulunan ve modelden hesaplanan değerler birbirine yakın çıkmıştır. Hata oranı Eş. 6.2 ile hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Hata} = [(Y_{\text{model}} - Y_{\text{deneysel}}) / Y_{\text{deneysel}}] * 100$$

[6.2]

Çizelge 6.6. KOİ' daki azalma yüzdesi için deneysel olarak bulunan ve modelden hesaplanan Y değerleri ve % hata değerleri

Deney no	T °C	pH	Deneysel bulunan Y ₁	Modelden Hesaplanan Y ₁	Hata %
1	33	6,6	24,6	29,06	18,13
2	37	6,6	32,9	35,79	8,78
3	33	7,4	27,77	28,09	1,15
4	37	7,4	50,24	48,96	-2,54
5	35	7,0	43,76	45,40	3,74
6	35	7,0	47,82	45,40	-5,06
7	35	7,0	41,28	45,40	9,98
8	32,1	7,0	26,82	24,10	-10,14
9	37,8	7,0	44,12	43,63	-1,11
10	35	6,44	37,30	32,77	-12,14
11	35	7,56	40,09	41,42	3,31
12	35	7,0	45,81	45,40	-0,89
13	35	7,0	46,18	45,40	-1,68
14	35	7,0	47,55	45,40	-4,52

Design Expert 7.0 istatistiksel paket programıyla modelden hesaplanan ve deneysel olarak bulunan KOİ'daki azalma yüzde değerlerinin grafiksel olarak karşılaştırılması Şekil 6.1'de verilmiştir.

6.1.5. 24. saat sonunda KOİ' daki azalma miktarı (%) için cevap yüzey eğrilerinin çizilmesi

Sıcaklık ve pH'ın değişimini incelemek üzere cevap yüzey eğrileri (response surface) Design Expert istatistiksel programı ile çizilmiştir. Bu tür eğrilerde, x ve y koordinat eksenleri bağımsız değişkenlerin değerini, z koordinat eksenini bağımlı değişkenin değerini göstermektedir. Burada; x ve y eksenlerinde sabit olmayan değişkenlerin değeri, z ekseninde ise 24. saatte KOİ' daki azalma miktarları (%) değerleri görülmektedir.

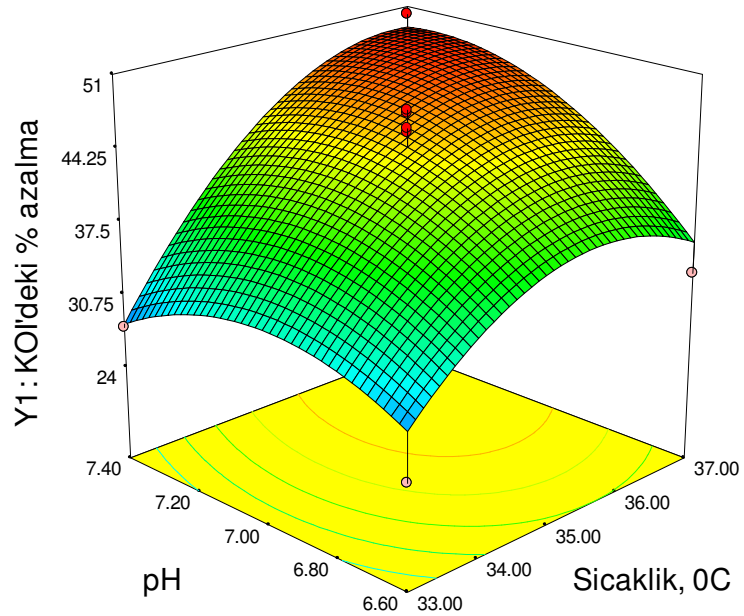
En yüksek KOİ' daki azalma yüzdesi, sıcaklık ve pH'ın fonksiyonu olarak üç boyutlu gösterimi Şekil 6.2.'de verilmiştir.

Design-Expert® Software

Y1



X1 = A: X1
X2 = B: X2



Şekil 6.2. KOİ' daki azalma yüzdesi üzerine sıcaklık ve pH'ın etkisi

Cevap yüzeyini daha iyi anlayabilmek için contour plot Şekil 6.3.' de gösterilmiştir.

Design-Expert® Software

Y1

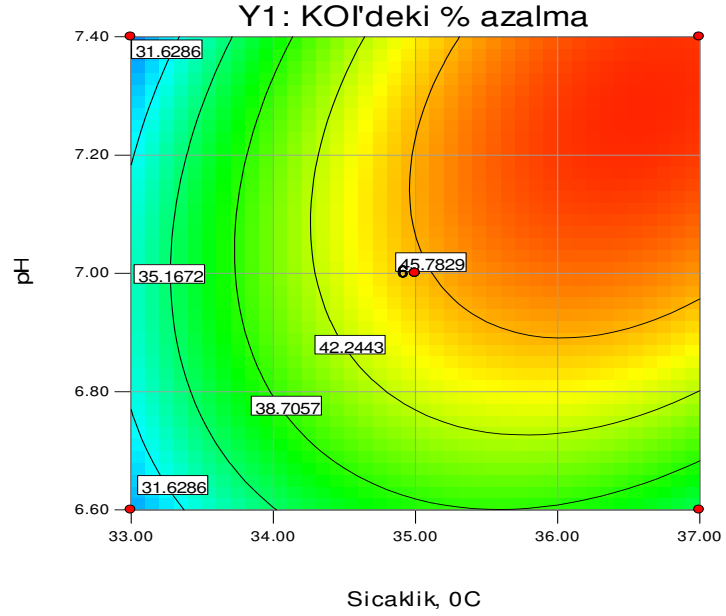
● Design Points

50.24

24.6

X1 = A: X1

X2 = B: X2



Şekil 6.3. KOİ'daki azalma yüzdesi üzerine sıcaklık ve pH'ın etkisi için contour plot

6.2. Gaz Üretim Hızı için Elde Edilen Sonuçlar

6.2.1. Gaz üretim hızı için model denkleminin kurulması

Çözüm sonucu gaz üretim hızı için hesaplanan katsayılar ve istatistiksel hesaplamalar Çizelge 6.8'de verilmiştir.

Çizelge 6.8. Gaz üretim hızı için parametreler arasında ihmal yapılmadan bulunan katsayılar ve istatistiksel hesaplamalar

$Y_2 = a + b \cdot X_1 + c \cdot X_2 + d \cdot X_1 \cdot X_2 + e \cdot X_1^2 + f \cdot X_2^2$			
Model Parametresi	Hesaplanan Katsayılar	P değeri	Standart Hata
Sabit	3,01	< 0,0001	0,059
X_1	0,54	< 0,0001	0,051
X_2	-0,14	0,0231	0,051
$X_1 X_2$	-0,30	0,0034	0,073
X_1^2	0,18	0,0098	0,053
X_2^2	-0,38	< 0,0001	0,053

Modelde yapılan çözüm sonucunda gaz üretim hızı için elde edilen model eşitliği gerçek değerler cinsinden, hiçbir model parametresi ihmal edilmeden aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$Y_2 = 3,01 + 0,54*X_1 - 0,14*X_2 - 0,30*X_1*X_2 + 0,18*X_1^2 - 0,38*X_2^2 \quad [6.3]$$

$R^2 = 0,9618$ olarak bulunmuştur.

Bulunan bu eşitlikte gaz üretim hızı; pH ve sıcaklığa bağlı olarak bulunmuştur. Sonuç olarak, gaz üretim hızı için regrasyon modelinde R^2 değerinin 0,9618 olarak bulunması, modelden hesaplanan değerle deneysel değerler karşılaştırıldığında deneysel sonuçların kabul edilebilir bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

X_1 ve X_2 birbirleriyle olan bütün etkileşimleri yaptırıldığında ve parametreler arasında gerekli ihmaller yapıldığında, parametre sayısının az ve R^2 değerinin büyük olmasından dolayı en uygun parametre ve etkileşimlerinin $X_1, X_2, X_1^2, X_1X_2, X_2^2$ olduğu görülmüştür.

Modelde ayrıca, P değerleri her bir katsayının daha önce de ifade edildiği gibi sistem için önemi göstermektedir. Çizelge 6.8'e bakıldığında, kesikli sistemde KOİ'daki % azalma üzerine en etkin parametrenin X_1 yani sıcaklık olduğu (X_1 için, $P < 0,0001$) ve ($X_1^2 = 0,0098$) görülmektedir. Sistem için sıcaklıktan sonra etkin olan diğer parametrenin ise sıcaklık ve pH etkileşimi ($X_1X_2^2$ için, $P=0,0034$) olduğu görülmektedir.

Burada, X_2 (pH) parametresinin tek başına etkileşiminin model üzerine etkisinin daha az olduğu görülmektedir.

6.2.2. Gaz üretim hızı için ANOVA testi sonuçları

Modelde hiçbir parametrenin P değeri 0,1000'den büyük olmadığı için ihmal edilmesine gerek görülmemiştir. Model denklemine ANOVA testi uygulanarak elde edilen sonuçların doğruluğu kontrol edilmiştir.

Çizelge 6.9. 24. saat sonundaki gaz üretim hızı için ANOVA testi sonuçları

ANOVA	Kareler Toplamı	Kareler toplamı, %	Kareler Oranı		Serbestlik derecesi
Kaynak	KT	KT%	KO	F	df
Model	4,24	96,3	0,85	40,25	5
Hata	0,17	3,87	0,019		8
Toplam	4,40	100			13

R^2 değeri model kareler toplamının, toplam hata kareler toplamına oranıdır. Buna göre, regresyon katsayısı $R^2 = 0,9618$ olduğu görülmektedir. Bu değer, oluşturulan modelin bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi iyi ifade ettiğini göstermektedir.

6.2.3. Gaz üretim hızı için deneysel ve modelden hesaplanan değerlerin karşılaştırılması

Çizelge 6.10.' da daha önceden belirlenen parametreler için modelde hesaplanan ve deneysel olarak bulunan gaz üretim hızı karşılaştırmalı değerleri ve % hata oranları verilmiştir. Görüldüğü gibi deneysel olarak bulunan ve modelden hesaplanan değerler birbirine yakın çıkmıştır. Hata oranı Eş. 6.2 'deki formülle hesaplanmıştır.

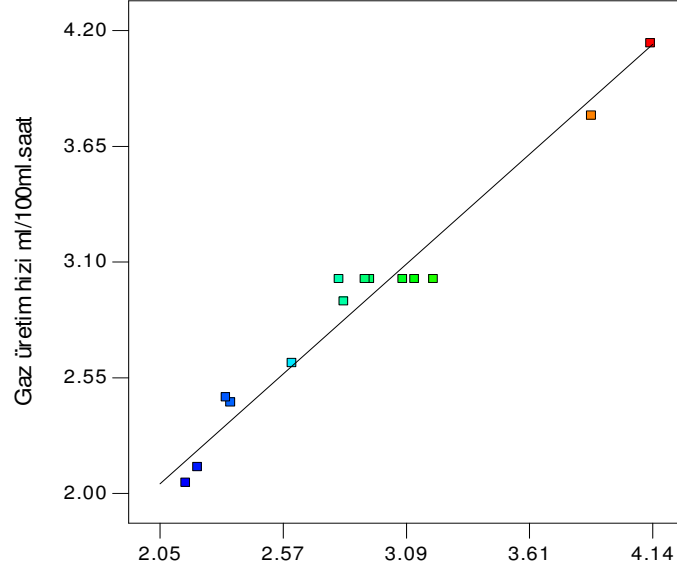
Çizelge 6.10. Gaz üretim hızı için deneysel olarak bulunan ve modelden hesaplanan Y değerleri ve % hata oranı

Deney no	T °C	pH	Deneysel bulunan Y ₂	Modelden Hesaplanan Y ₂	Hata %
1	33	6,6	2,21	2,12	-4,07
2	37	6,6	3,88	3,79	-2,92
3	33	7,4	2,35	2,43	3,4
4	37	7,4	2,83	2,91	2,83
5	35	7,0	2,92	3,02	3,42
6	35	7,0	3,08	3,02	-1,95
7	35	7,0	3,21	3,02	-5,92
8	32,1	7,0	2,61	2,61	0
9	37,8	7,0	4,13	4,14	0,24
10	35	6,44	2,33	2,45	5,15
11	35	7,56	2,16	2,05	-5,09
12	35	7,0	3,13	3,02	-3,51
13	35	7,0	2,94	3,02	2,72
14	35	7,0	2,81	3,02	7,47

Design Expert 7.0 istatistiksel paket programıyla modelden hesaplanan ve deneysel olarak bulunan gaz üretim hızı değerleri Şekil 6.4.' de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, gaz üretim hızının deneysel olarak bulunan ve modelden hesaplanan değerleri, birkaç değer dışında diagonalin üzerinde ve diagonale yakın olması değerlerin birbirine yakın olduğunu göstermektedir.

Design-Expert® Software
Y2

Color points by value of
Y2:



Modelden hesaplanan gaz üretim hızı ml/100ml.saat

Şekil 6.4. Deneysel olarak bulunan ve modelden hesaplanan gaz üretim hızlarının karşılaştırılması

6.2.4. Gaz üretim hızı için optimum koşulların belirlenmesi

Elde edilen model denkleminde gaz üretim hızını en yüksek yapan sıcaklık ve pH'nın optimum değerleri Çizelge 6.11.' de verilmiştir.

Çizelge 6.11. Parametrelerin en yüksek gaz üretim değerlerindeki optimum değerleri

Parametreler	X ₁ (Sıcaklık, °C)	X ₂ (pH)
Min . değer	32,1	6,43
Ort. Değer	35	7,0
Max. Değer	37,8	7,57
Optimum değer	37,8	6,96

24. saat sonunda gaz üretimin en yüksek değeri : 4,15 ml gaz /100ml.saat

6.2.5. Gaz üretim hızı için cevap yüzey eğrilerinin çizilmesi

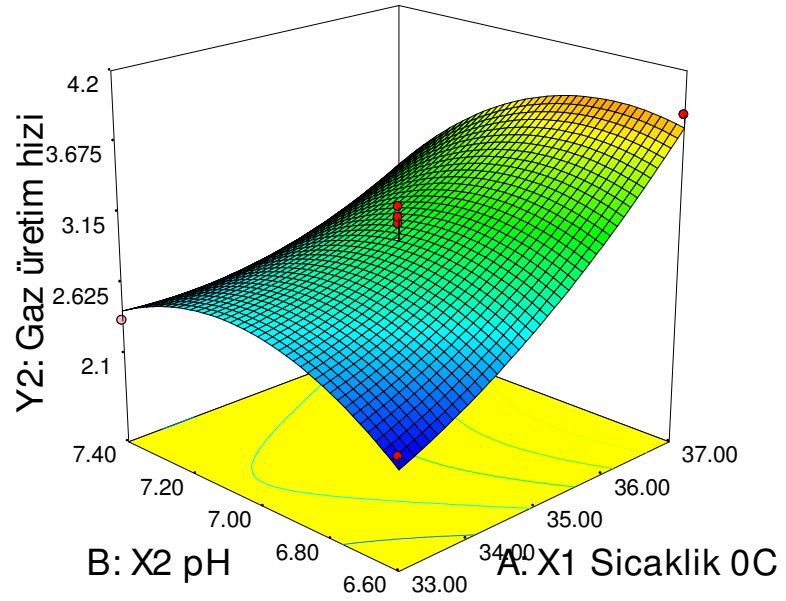
Sıcaklık ve pH'ın değişiminin gaz üretim hızı üzerine etkisini incelemek üzere cevap yüzey eğrileri (response surface) Design Expert istatistiksel programı ile çizilmiştir.

Gaz üretim hızının, pH ve sıcaklığın fonksiyonu olarak üç boyutlu gösterimi Şekil 6.5'de verilmiştir.

Design-Expert® Software

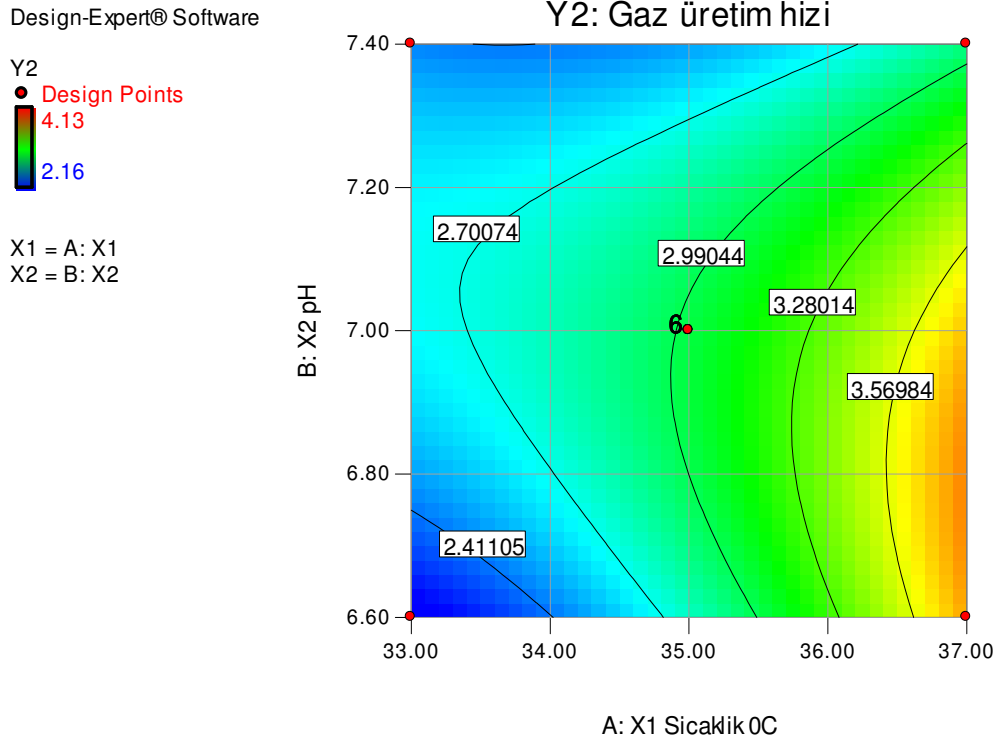
Y2
4.13
2.16

X1 = A: X1
X2 = B: X2



Şekil 6.5. Gaz üretim hızı üzerine sıcaklık ve pH'ın etkisi

Cevap yüzeyi için contour plot Şekil 6.6'da gösterilmiştir.



Şekil 6.6. Gaz üretim hızı üzerine sıcaklık ve pH'ın etkisi için contour plot

En yüksek gaz üretim hızı pH 6,96 ve 37,8 °C' de olduğu görülmektedir. Sistemde, sabit pH değerinde sıcaklık arttıkça gaz üretim hızı artmaktadır. Bunun sebebi sıcaklık attıkça karışım içerisindeki bakteri etkinliklerinin artması ve dolayısıyla besi ortamındaki besinin daha hızlı kullanılmasındandır.

Sabit bir sıcaklıkta pH değerinin gaz üretim hızı üzerindeki etkisi incelendiğinde ise gaz üretim hızı pH 6,96 değerinde en yüksek değere çıktığı görülmektedir. Yüksek pH değerlerinde ise verimin iyice düştüğü görülmektedir. Bunun nedeni ise sistemde amonyak üretiminin artması ve amonyak değerinin fazla olması sistem içerisinde zehirliliğe yol açmasıdır. Bu durumda özellikle metan bakterileri etkinlikleri azalmakta ve gaz üretim hızı düşmektedir.

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Çalışmada, tavuk gübresinin kesikli sistemde anaerobik arıtımı ve yan ürün olarak gaz elde edilmesi incelenmiştir. Bu çalışmada sıcaklık ve pH'ın KOİ' daki azalma ve gaz üretim hızı üzerindeki etkisi incelenmiş ve deneyler Box-Wilson deneysel tasarım yöntemine göre tasarlanmıştır. “Design Expert” istatistiksel paket programı ile yapılan KOİ'daki azalma yüzdesi ve gaz üretim hızı için model denklemleri oluşturulmuş, seçilen sıcaklık ve pH değerlerinde en yüksek KOİ azalma yüzdesi ve en yüksek gaz üretim verimi için optimum değerler bulunmuştur.

Birinci çözüm sonucunda, KOİ'daki azalma üzerine en etkin parametrenin X_1 (sıcaklık) olduğu, sistem için sıcaklıktan sonra etkin olan diğer parametrenin ise, X_2 (pH) olduğu, sıcaklık ve pH arasındaki ikili etkileşimin model üzerindeki etkisinin en az olduğu görülmüştür. Buna göre model denklemi Eş. 6.1 bulunmuştur.

$$Y_1 = 45,40 + 6,90 \cdot X_1 + 3,06 \cdot X_2 + 3,54 \cdot X_1 \cdot X_2 - 5,77 \cdot X_1^2 - 4,15 \cdot X_2^2 \quad [6.1]$$

$R^2 = 0,9040$ olarak bulunmuştur.

Modelden hesaplanan ve deneysel olarak bulunan KOİ azalma yüzdesi değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Bu da modelin sistem için uygun olduğunu göstermektedir.

KOİ' daki en yüksek azalma, % 49,32 olarak bulunmuş ve KOİ' daki azalma yüzdesini en yüksek yapan optimum sıcaklık 36,6 °C ve optimum pH 7,29 olarak bulunmuştur.

Deney süresi boyunca KOİ bağımlı değişken olarak seçilmiştir. KOİ'nin bağımsız değişken olarak seçilmemesinin sebebi, sıcaklık ve pH gibi değişiminin kolay incelenememesi ve anaerobik arıtmada, kirlilik gideriminin bir göstergesi olmasıdır.

Literatürde tavuk gübresinin anaerobik arıtımı ile ilgili yapılan çalışmalarda bulunan KOİ % giderim verimlerinde farklılıklar görülmüştür. Kalyuzhnyi (1998), organik

besleme hızlarının 1-11 gKOİ/l.gün aralığında pH= 6,2-7,1 ve sıcaklık 35 °C' de iken 2 günlük bekleme süresinde % 70-75 oranında KOİ azalması, Ernest (2001), 2,9 kgKOİ m³/gün organik besleme hızında ve 95 günlük alıkonma süresinde % 78 oranında KOİ azalması, Guowei (1997), 35 °C'de 58 günlük hidrolik bekleme süresinde % 80,03 KOİ giderimi gözlemişlerdir.

Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar, literatür değerleriyle kıyaslandığında; 24 saatlik alıkonma süresi için KOİ' daki azalma miktarının (%) yüksek olduğu görülmektedir. Bu ise optimum işletme koşullarının iyi belirlendiğinin göstergesidir. Ayrıca bakterilerin yüksek sıcaklıkta organik maddeleri daha hızlı parçalamasından dolayı, sıcaklık artıkça deney süresince KOİ' daki % giderim oranlarında artışlar gözlenmiştir.

Gaz üretim hızı için yapılan 2. çözüm sonucunda üretim hızı üzerine en etkin parametrenin X₁ yani sıcaklık olduğu, sistem için sıcaklıktan sonra etkin olan diğer parametrenin ise sıcaklık ve pH etkileşimi olduğu, modelde ihmal edilebilecek hiçbir parametrenin olmadığı görülmektedir. Buna göre model denklemi Eş. 6.3 bulunmuştur.

$$Y_2 = 3,01 + 0,54*X_1 - 0,14*X_2 - 0,30*X_1*X_2 + 0,18*X_1^2 - 0,38*X_2^2 \quad [6.3]$$

$$R^2 = 0,9618$$

Deneyssel olarak bulunan ve modelden hesaplanan gaz üretim hızı değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Bu da modelin sisteme uyduğunu göstermektedir.

R² değerlerini bulmak için ANOVA testi yapılmıştır. Bulunan R² değerleri deneyssel olarak hesaplanan değerlerin modelden hesaplanan değerlerle karşılaştırıldığında doğruluğu hakkında bize bilgi vermektedir.

Literatürde tavuk gübresinin anaerobik arıtımı sonucu açığa çıkan gaz üretim hızı ve metan içeriği ile ilgili çalışmalarda, Merkez TOPRAKSU Araştırma Enstitüsünde

yapılan 12 m³ kapasiteli biyogaz tesisinde tavuk gübresinden 0,575 L/L.gün üretim hızında biyogaz elde edildiği ,Ernest (2001), pH 6,5, 30⁰C ve 95 günlük alıkoyulma süresinde, gaz üretim hızı 0,26 L/L.gün ve % 57 oranında CH₄ içerdiği, Ergüder (1998), % 89,7 sıvı madde içeren seyreltilmemiş tavuk atığından litre başına 6,9-7,3 L metan üretildiği gözlenmiştir.

Optimum koşullarda bulunan gaz üretim hızının literatür değerleriyle karşılaştırılabilmesi amacıyla aynı baza getirmek üzere birimi değiştirilmiş ve bu çalışmada optimum şartlarda elde edilen gaz üretim hızı 0,99 L/(L.gün) olarak bulunmuştur. Bu değer literatürde verilen değerlerden yüksek çıkmıştır. Bilindiği gibi ilk 24 saatte mikroorganizma aktivitesi ve dolayısıyla gaz üretim hızı en yüksek seviyededir. Literatürde rapor edilen değerler toplam çalışma süresinin ortalaması olarak verilirken bu çalışmada ilk 24 saatte elde edilen değerler verildiğinden bulunan değerler literatür değerlerinden daha yüksektir.

Ayrıca Degisn Expert paket programı ile maksimum KOİ azalma miktarını ve maksimum gaz üretim hızını birlikte dikkate alarak optimizasyon işlemi gerçekleştirilebilir. Modelde bu kıstas dikkate alındığında hesaplanan değerler: maksimum KOİ'daki azalma miktarının % 44,6, maksimum gaz üretim hızının 4,05 ml gaz / 100ml.saat olarak hesaplanmış ve bu değerleri elde etmek için gerekli optimum koşulların ise sıcaklık için 37,8 ⁰C, pH için ise 7,05 olarak bulunmuştur.

Modelde yapılan hesaplamalara göre en yüksek KOİ giderim miktarı için, en yüksek gaz üretim hızı için ve en yüksek KOİ giderim miktarı ve gaz üretim hızını aynı anda dikkate alarak üç farklı optimum koşul hesaplanmıştır. Bir biyoreaktör tasarlanacağı zaman işletim aşamasında ne istenileceğine bağlı olarak bulunan optimum şartlardan biri seçilir.

KOİ giderim miktarı ve gaz üretim hızı için optimum koşullarda bulunan pH değerlerine bakıldığında, gaz üretim hızı için pH değerinin (6,96) asidik özelliklerde olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, ilk 24 saatte asit oluşturan

mikroorganizmaların daha etkin faaliyet göstermesi ve metan oluşum hızının asit oluşum hızından düşük olmasından kaynaklanmaktadır.

24. saatten sonra gaz üretim miktarlarındaki değişiminin incelenmesi amacıyla deney düzeneğine dokunulmadan bir gün daha bekletilmiştir. Ancak gaz hacimlerinde bir değişiklik görülmemiştir. Küçük hacimlerde ve kesikli sistemde çalışıldığında, reaktör içerisinde mikroorganizmaların tüketebileceği besin maddesinin kalmamasından ötürü gaz çıkışının olmadığı belirlenmiştir.

Tavuk gübresinin anaerobik arıtımı ile ilgili yapılacak çalışmalarda, bu çalışmada elde edilen, en yüksek KOİ azalma yüzdesi ve en yüksek gaz üretim hızı için optimum sıcaklık ve pH değerlerinde sürekli beslemeli çalışan bir biyoreaktör kullanılarak, oluşacak gaz üretim hızı, gazın kimyasal yapısı ve KOİ azalma miktarı üzerine etkileri araştırılabilir. Ayrıca gaz üretim hızı ve KOİ giderimine etki eden C/N oranı, katı madde içeriği, alıkoyulma süresi gibi diğer parametrelerin birlikte etkileşimleri incelenebilir.

Yapılan çalışmada Bow-Wilson deneysel tasarım yöntemi kullanılmıştır. Diğer çalışmalarda başka bir model yöntemi kullanılarak da çözüme gidilebilir.

KAYNAKLAR

1. Tafdrup S., “Centralized biogas plants combine agricultural and environmental benefits with energy production”, *Water Science and Technology*, 30:133-140 (1994).
2. Duran, M., Güven E., Uğurlu Ö., Tezel U., “Organik Atıklardan Anaerobik Yöntemlerle Biyogaz Eldesi, Türkiye’de Uygulanabilirlik”, *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, İzmir, 99-103 (2001).
3. Gökçay C., Demirer, G.N., Ergüder T.N., Uzal N.V. ve Tezel U., “Anaerobik Arıtım Teorik Altyapı ve Uygulamaları Eğitim Semineri Notları”, *TBMM Çevre Mühendisleri Odası*, Ankara, 3-21, 47-50, 84-86 (2002).
4. Bayrakçeken H., Biyogaz Üretim Sistemi Tasarımı ve Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon, 21-29 (1997).
5. Eryılmaz H., “Biyogaz Üretiminde Türkiye koşullarına en uygun Üreteç tipinin tesbiti” , *T.C. Köy İşleri ve Kooperatifler Bakanlığı Topraksu Genel Müdürlüğü Merkez Topraksu Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü yayınları*, Ankara, 21 (1981).
6. Bilir M., Karabay E., Deniz Y., Katlı N., “Biyogazın Önemi, Yararları, Kullanımı, Biyogaz Tesislerin Tasarımı Ve Türkiye’de Yaygınlaştırma Olanakları” , *T.C. Köy İşleri ve Kooperatifler Bakanlığı Topraksu Genel Müdürlüğü Merkez Topraksu Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü yayınları*, Ankara, 1-4 (1982).
7. Kaya, O., “Yemek Atıklarından Biyogaz Enerjisi Üreten Sistemin Tasarım ve İmalatı”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 14-21 (1999).
8. İnternet: Biyogaz Üretimi, <http://www20.uludag.edu.tr/~yahyau/biyogaz.htm> (2004).
9. Ferry, J. G. “Methanogenesis, ecology, physiology, biochemistry and genetics”, *Chapman & Hall*, New York, 25 -33 (1993).
10. Lusk, P. And Moser, M., “Anaerobic Digestion, Yesterday, Today and Tomorrow”, *Ninth European Bioenergy Conference*, Copenhagen, Denmark, Pergamon Pres, UK, 284-289 (1996).
11. Ardınc, İ., “Termal Kimyasal ve Termokimyasal Önişlemlerin Tavuk Gübresinden Biyogaz Üretim Verimine Etkilerinin Araştırılması”, Yüksek lisans tezi, *Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Mersin, 8-10 (2002).

12. Demirci G., Türkavcı L., “ Biyogaz Atıklardan Enerji”, *TÜBİTAK Basımevi*, Ankara, 9-11 (2001).
13. İleri R., “ Çevre Biyoteknolojisi”, *Değişim Yayınları*, Adapazarı, 268-354 (2000).
14. Ahn, J-H., Forster, C.F., “The effect of temperature variations on the performance of mezophilic and thermophilic anaerobic filters treating a simulated papermill wastewater”, *Process Biochemistry*, 37:589-594 (2000).
15. Filibeli, A., Büyükkamacı, N. Ve Ayol, A.,”Anaerobik Arıtma”, *DEÜ. Müh. Fak. Yayınları*, İzmir, 280 (2000).
16. “Biyogaz Araştırma ve Fizibilite Etüdü”, *Sanayi ve Ticaret Bakanlığı , Sanayi Araştırma ve Geliştirme Genel Müdürlüğü*, Ankara, 10-19 (1986).
17. Türoğlu M., Arda M., Yetişir R., Sarıca M., Atlan A., Erensayın C. “ Tavukçuluktaki Gelişmeler ve Türkiye Tavıkçuluğu”, *Ankara Üniversitesi Yayınları* Ankara, 138-151 (2004).
18. Ergün A., Çoldan İ., “Yemler Yem Hijyeni Ve Teknolojisi” , *Ankara Üniversitesi Yayınları* Ankara, 204-207 (2004).
19. Kacar B., “ Gübre Bilgisi” *Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları*, Ankara, 58-69 (1997).
20. İnternet: Biyogaz Üretiminde Kullanılabilecek Atıklar, <http://www.biyogaz.com/bguka.htm> (2004).
21. İnternet: Biyogaz Nedir?, http://www.khgm.gov.tr/kutuphane/_BIYOGAZ/_BIGAZ.HTM (2004).
22. Nalbant,M. “Biyogaaz ve Kullanımı”, *2. Uluslar arası Tarımsal Mekanizasyon ve Enerji Sempozyumu*, Ankara, 4-12 (1984).
23. Bari, S., “Effect of carbon dioxide on theperformance of biogas/diesel duel-fuel engine”, *Renewable Energy*, 9:1-4, (1996).
24. Toprak H. “Atıksu Arıtım Sistemlerinin Tasarım Esasları” Cilt 2, *D.E.Ü Mühendislik Fakültesi Basım Ünitesi*, İzmir, ‘17-1’-‘17-12’ (2000).
25. Öncel S., İkizoğlu E., Öngen G., Vardar F., “Tarımsal Atıkların Değerlendirilmesinde Kullanılan Biyogaz Üreteç Tipleri”, *II. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, 121-137 (2003).
26. Demirer G., Duran M., Zitomer D., Speece R., “ Anaerobik Biyoteknoloji ile endüstriyel Atıksu Arıtımı”, *2. Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi*, İstanbul, 387-392 (1997).

27. Çelik D., Çift Fazlı Sistemde 2- Feniletanolün Fenilasetaldehite Biyotransformasyonu, Yüksek Lisans Tezi, **Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 35-42 (2001).
28. Çetinkaya, A., *Aspergillus niger* (ATCC 6275 ve NRRL 599) Fermantasyonu ile Şeker Pancarı Melasından Sitrik Asit Üretiminde Optimum Koşulların Belirlenmesi”, Yüksek lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 15-21 (2002).
29. Tüzüm A.P., “Yemek Atıklarının Anaerobik Arıtımı ve Biyogaz Üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 82-84 (2003).
30. Kalyuzhnyi S. ,Fedorovich, V., and Nozhevnikova, A., “Anaerobic treatment of liquid fraction of hen manure in UASB reactors”, **Bioresource Tecnology**, 65: 221-225 (1998).
31. Bujoczek, G., Oleszkiwicz, J., Sparling, R., Cenkowski, S., “High solid anaerobic digestion of chicken manure”, **J. Agricultural Engineering Resources**, 75: 51-60 (2000).
32. Callaghan, F.J., Wase, D.A.J., Thayanithy, K., Forster, C.F., “Continuous co-digestion of cattle slurry with fruit and vegetable wastes and chicken manure”, **Biomass and Bioenergy**, 27: 71-77 (2002).
33. Itodo I.N., Awulu J.O., “Effects of total solids concentrations of poultry, cattle and piggery waste slurries on biogas yield”, **Transactions of the ASAE**, 42(6): 1853-1855 (1999).
34. Güngör G, Demirer G.N., “Effect of initial COD concentration, nutrient addition, temperature and microbial acclimation on anaerobic tretability of broiler and cattle manure ” , **Bioresource Tecnology** 93: 109-117 (2004).
35. Ghaly A.E., “Comparative study of acid cheese whey and dairy manure in a two-stage reactor” **Technical Univ of Nova Scoia**, 61-72 (1996).
36. Atuanya, E. And Aıgbırıor, M., “Mesophilic biomethanation and treatment of poultry waste- water using pilot scale UASB reactor”, **Environmental Monitoring and Assessment**, 77: 139-147 (2002).
37. Guowei, Z.J.G., Tayel, S.A., Ibrahim, I.I.G., Khairy, M.F.A., El-Shimi, S.A., “Anaerobic digestion for waste water poultry manure by UBF reactor”, **Journal of Environmental Sciences**, 9(2): 149-161 (1997).

38. APHA, "Standart Methods for the Examination of Water and Wastewater", ***American Public Health Association***, 20th Edition, Washington D.C., 5-13 (1998).
39. Lapp, H.M., Schulte, D.D., Sparling, A.B. and Buchanan, L.C., "Methane production from animal wastes. 1. Fundamental Considerations", ***Canadian Agr. Eng.***, 17(2): 97-102 (1975).
40. Naumann, S.T. and Myren, C., "Fuel processing of biogas for small fuel cell power plants", ***Journal of Power Sources***, 56(1): 45-49, (1995).

EKLER

EK-1 KOİ'deki Azalma Yüzdesi için Design Expert Paket Programında Bulunan Değerler

Çizelge 1. KOİ'deki azalma yüzdesi için Design Expert paket programında bulunan farklı istatistiksel model değerleri

Model Summary Statistics						
	Std.		Adjusted	Predicted		
Source	Dev.	R-Squared	R-Squared	R-Squared	PRESS	
Linear	6,665512	0,482757	0,388713	0,11629	834,9782	
2FI	6,622102	0,535884	0,396649	-0,31112	1238,815	
Quadratic	3,367647	0,903976	0,843962	0,502747	469,8321	Suggested
Cubic	2,928693	0,945533	0,881988	-0,43868	1359,343	Aliased

Çizelge 2. KOİ'deki azalma yüzdesi için Design Expert paket programında bulunan ANOVA testi sonuçları

ANOVA for Response Surface Quadratic Model						
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]						
	Sum of		Mean	F	p-value	
Source	Squares	df	Square	Value	Prob > F	
Model	854,1266	5	170,8253	15,06257	0.0007	significant
A-X1	381,3755	1	381,3755	33,6279	0.0004	
B-X2	74,75989	1	74,75989	6,591976	0.0333	
AB	50,19723	1	50,19723	4,426155	0.0685	
A^2	245,5358	1	245,5358	21,65019	0.0016	
B^2	127,4115	1	127,4115	11,23455	0.0101	
Residual	90,72836	8	11,34104			
Lack of Fit	59,80896	3	19,93632	3,223917	0.1200	not significant
Pure Error	30,9194	5	6,18388			
Cor Total	944,855	13				

Çizelge 3. KOİ'deki azalma yüzdesi için Design Expert paket programında bulunan standart hata değerleri

	Coefficient		Standard	95% CI	95% CI	
Factor	Estimate	df	Error	Low	High	VIF
Intercept	45,4	1	1,374836	42,22962	48,57038	
A-X1	6,904487	1	1,190643	4,158859	9,650114	1
B-X2	3,056957	1	1,190643	0,31133	5,802584	1
AB	3,5425	1	1,683823	-0,3404	7,425404	1
A^2	-5,76625	1	1,23926	-8,62399	-2,90851	1,005952
B^2	-4,15375	1	1,23926	-7,01149	-1,29601	1,005952

EK-2 Gaz Üretim Hızı için Design Expert Paket Programında Bulunan Değerler

Çizelge 4. Gaz üretim hızı için Design Expert paket programında bulunan farklı istatistiksel model değerleri

Model Summary Statistics						
	Std.		Adjusted	Predicted		
Source	Dev.	R-Squared	R-Squared	R-Squared	PRESS	
Linear	0,418725	0,562161	0,482553	0,093347	3,99371	
2FI	0,396814	0,642531	0,535291	0,227194	3,404127	
Quadratic	0,145083	0,961771	0,937879	0,872541	0,561445	Suggested
Cubic	0,136839	0,974494	0,944738	0,960431	0,174296	Aliased

Çizelge 5. Gaz üretim hızı için Design Expert paket programında bulunan ANOVA testi sonuçları

ANOVA for Response Surface Quadratic Model						
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]						
	Sum of		Mean	F	p-value	
Source	Squares	df	Square	Value	Prob > F	
Model	4,2365	5	0,8473	40,2535	< 0.0001	significant
A-X1	2,310825	1	2,310825	109,7826	< 0.0001	
B-X2	0,165432	1	0,165432	7,859348	0.0231	
AB	0,354025	1	0,354025	16,81901	0.0034	
A^2	0,239262	1	0,239262	11,36683	0.0098	
B^2	1,080415	1	1,080415	51,32834	< 0.0001	
Residual	0,168393	8	0,021049			
Lack of Fit	0,056243	3	0,018748	0,835827	0.5293	not significant
Pure Error	0,11215	5	0,02243			
Cor Total	4,404893	13				

Çizelge 6. Gaz üretim hızı için Design Expert paket programında bulunan standart hata değerleri

	Coefficient		Standard	95% CI	95% CI	
Factor	Estimate	df	Error	Low	High	VIF
Intercept	3,015	1	0,05923	2,878416	3,151584	
A-X1	0,537451	1	0,051295	0,419165	0,655736	1
B-X2	-0,1438	1	0,051295	-0,26209	-0,02552	1
AB	-0,2975	1	0,072542	-0,46478	-0,13022	1
A^2	0,18	1	0,053389	0,056884	0,303116	1,005952
B^2	-0,3825	1	0,053389	-0,50562	-0,25938	1,005952

ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında Ankara’da doğan Aydın KARATAŞ, ilk ve orta öğrenimini Ankara’da tamamladıktan sonra 1999 yılında Selçuk Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümünde lisans eğitimine başladı. 2003 yılında lisans eğitimini tamamlayarak, aynı yılda Gazi Üniversitesi Çevre Bilimleri Anabilim Dalında Yüksek Lisansa başladı. 2005 yılında işe başladığı MNG Holding bünyesindeki Topkapı Palace Hotel’de halen çalışmaktadır.