

**PEYNİRALTI SUYUNUN ANAEROBİK ARITMA ÇAMURU
REAKTÖRÜNDE ARITIMINDA EN UYGUN KOŞULLARIN
BELİRLENMESİ**

Esra ÖZTÜRK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE BİLİMLERİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ŞUBAT 2007
ANKARA**

**PEYNİRALTI SUYUNUN ANAEROBİK ARITMA ÇAMURU
REAKTÖRÜNDE ARITIMINDA EN UYGUN KOŞULLARIN
BELİRLENMESİ**

Esra ÖZTÜRK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE BİLİMLERİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ŞUBAT 2007
ANKARA**

Esra ÖZTÜRK tarafından hazırlanan PEYNİRALTI SUYUNUN ANAEROBİK ARITMA ÇAMURU REAKTÖRÜNDE ARITIMINDA EN UYGUN KOŞULLARIN BELİRLENMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç.Dr. İrfan AR

Tez Yöneticisi

(1. Danışman)

Yrd.Doç.Dr. S.Ferda MUTLU

(2. Danışman)

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Çevre Bilimleri Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: : Prof. Dr. Serpil TAKAÇ

Üye : Prof. Dr. Mübeccel ERGUN

Üye : Prof. Dr. Selma ATEŞ

Üye : Doç. Dr. İrfan AR

Üye : Yrd. Doç. Dr. S. Ferda MUTLU

Tarih : 01.02.2007

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

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Esra ÖZTÜRK

**PEYNİRALTI SUYUNUN ANAEROBİK ARITMA ÇAMURU
REAKTÖRÜNDE ARITIMINDA EN UYGUN KOŞULLARIN
BELİRLENMESİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

Esra ÖZTÜRK

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Şubat 2007

ÖZET

Çalışmada, peyniraltı suyunun kesikli sistemde, anaerobik özümleyiciden alınan arıtma çamuru karışımı ile anaerobik arıtımı incelenmiştir. Bu amaçla, 250 mL hacimli 20 adet cam reaktör kullanılmıştır. Anaerobik arıtım süresince, mikroorganizmaların etkinlikleri sonucu oluşan gazlar dereceli büretlerde toplanmıştır. Reaktör karışımını; peyniraltı suyu ve aşı mikroorganizma içeren anaerobik özümleyicilerden alınan arıtma çamuru oluşturmaktadır. Bu çalışmada, anaerobik arıtım üzerine sıcaklık (X_1), pH (X_2) ve arıtma çamurunun hacımsal yüzdesinin (X_3) etkisi incelenmiştir. Deneyler, Box-Wilson deneysel tasarım yöntemine göre tasarlanmıştır. Deneysel sonuçlar “Design Expert 7.0.3 Trial” paket programı ile istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçların değerlendirilmesi sonucunda, KOİ (Kimyasal oksijen ihtiyacı)’ndaki azalma yüzdesi (Y_1) yukarıdaki parametrelerin bir fonksiyonu olarak; $Y_1 = 37,13 + 2,80 \cdot X_1 + 1,87 \cdot X_3 + 1,17 \cdot X_1 X_2 + 1,88 \cdot X_1 X_3 - 1,51 \cdot X_2 X_3 - 2,41 \cdot X_1^2 - 3,49 \cdot X_2^2 - 2,15 \cdot X_3^2$ model eşitliği ile ifade edilmiştir. R^2 değeri ise; 0,9596 olarak bulunmuştur.

Kullanılan modelde KOİ’ndaki en yüksek azalma yüzdesi, 37.8°C sıcaklık, 7.19 pH ve 14.20 arıtma çamuru hacımsal yüzdesinde %39,17 olarak bulunmuştur.

KOİ'deki azalma yüzdesi üzerine en etkin parametrenin sıcaklık olduğu, sıcaklıktan sonra etkin olan parametrenin çamur hacim oranı olduğu belirlenmiştir. Bir diğer bağımsız değişken olan pH'ın ise KOİ'deki azalma yüzdesi üzerine birinci dereceden etkisinin ihmal edilebilir olduğu ancak; diğer parametrelerle ikili etkileşimlerinin önemli olduğu belirlenmiştir.

Bilim Kodu : 903.1.066
Anahtar Kelimeler : Anaerobik arıtım, peyniraltı suyu, arıtma çamuru
istatistiksel analiz, KOİ giderimi
Sayfa Adedi : 113
Tez Yöneticisi : Doç. Dr. İrfan AR
Yrd. Doç. Dr. S. Ferda MUTLU

DETERMINATION OF OPTIMUM CONDITIONS OF CHEESE WHEY TREATMENT IN AN ANAEROBIC TREATMENT SLUDGE REACTOR

(M.Sc. Thesis)

Esra ÖZTÜRK

GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF NATURAL SCIENCES

February 2007

ABSTRACT

In this study, optimum conditions for the treatment of cheese whey in an anaerobic sludge reactor were determined by using a batch system. Twenty glass reactors each having 250 mL volume were used. Reactor temperature and pH can be controlled, and different design conditions can be provided simultaneously. Gases produced as a result of the activities of microorganisms during the anaerobic digestion were collected in graduated burettes. Reaction mixture consists of the cheese whey and inoculation microorganisms containing treatment sludge that was taken from an anaerobic digester. In this study, effects of temperature (X_1), pH (X_2) and volumetric ratio of treatment sludge on anaerobic treatment were investigated. Experiments were designed by using Box-Wilson experimental design method. Statistical analysis of experimental results were made by using “Design Expert 7.03” package program. After evaluation of the experimental results, percent reduction of COD (Chemical oxygen demand) (Y_1) had been expressed with $Y_1 = 37,13 + 2,80 \cdot X_1 + 1,87 \cdot X_3 + 1,17 \cdot X_1 X_2 + 1,88 \cdot X_1 X_3 - 1,51 \cdot X_2 X_3 - 2,41 \cdot X_1^2 - 3,49 \cdot X_2^2 - 2,15 \cdot X_3^2$ model equation as a function of given parameters above. R^2 value had been estimated as 0.9596 .

The highest percent reduction of COD was found as 39.17 % at 37.8⁰C, pH value of 7.19 and volumetric percent of treatment sludge of 14.20.

It was determined that the most effective parameter on COD reduction percent is temperature and volumetric percentage of treatment sludge was found as the second effective parameter. Also it was found that, first order effect of another independent parameter pH on COD reduction percent is negligible where as its binary interactions with other parameters was important.

Science Code : 903.1.066

**Key Words : Anaerobic digestion, cheese whey, treatment sludge,
statistical analysis, COD reduction**

Page Number: 113

**Adviser : Assoc. Prof. Dr. İrfan AR
Asisst. Prof. S. Ferda MUTLU**

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca, üstün bilgi veengin deneyimlerinden yararlandığım, çok değerli danışman hocalarım Sayın Doç.Dr. İrfan AR ve Sayın Yrd.Doç.Dr. S. Ferda MUTLU'ya; laboratuvarıda ve model çalışmasında çözüm yöntemindeki katkılarından dolayı çok değerli arkadaşım Aydın KARATAŞ'a, gerekli hammadde temini ve cihaz desteklerinden dolayı ASKİ Tatlar Merkezi Atıksu Arıtma Tesisi laboratuvarlarında çalışan Figen YILDIZ ve diğer personele, manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan, kimi zaman benimle laboratuvarıda sabahlayan aileme sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xiv
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xvi
RESİMLERİN LİSTESİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xviii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER	4
2.1. Peyniraltı Suyu (PAS) ve Özellikleri	4
2.2. Peyniraltı Suyunun Değerlendirilmesi	5
2.3. Kirletici Olarak PAS ve PAS'ın Atık Özellikleri	6
2.4. Arıtma Çamuru Tanımı	7
2.5. Çamur Kaynakları	8
2.5.1. Birincil arıtım (Ön arıtma)	8
2.5.2. İkincil arıtım	9
2.5.3. Üçüncül arıtım (fiziksel – kimyasal arıtım)	11
2.6. Arıtma Çamurunun Oluşum Yerlerine Göre Özellikleri	11
2.6.1. Deneylerde kullanılan arıtma çamurunun gördüğü arıtma süreci	13
2.7. Arıtma Çamurunun Değerlendirilmesi	15
2.8. Anaerobik Arıtım	16

Sayfa

2.9. Anaerobik Arıtım Temelleri.....	17
2.9.1. Hidroliz	17
2.9.2. Asit oluşumu (Asetojenesis)	18
2.9.3. Metan oluşumu (Metanojenesis).....	18
2.10. Anaerobik Arıtım Mikrobiyolojisi	19
2.11. Anaerobik Arıtım Biyokimyası	24
2.12. Çevre Koşullarının Anaerobik Süreçlere Etkisi.....	26
2.12.1. pH ve alkalinite	26
2.12.2. Besin gereksinimi	27
2.12.3. Sıcaklık.....	28
2.12.4. Zehirlilik.....	30
2.12.5. Kükürt.....	32
2.12.6. Oksijen	32
2.12.7. Amonyak	33
2.12.8. Uçucu asitler.....	33
2.12.9. C/N oranı	33
2.12.10. Alıkoyulma süresi	34
2.13. Anaerobik Biyoteknolojinin Üstünlükleri.....	35
2.14. Anaerobik Biyoteknolojinin Sakıncaları.....	37
2.15. Anaerobik Çamur Çürütme İşlemi	38
2.15.1. Gaz oluşumu, toplanması ve kullanımı	41
2.15.2. Anaerobik çürütücülerin karıştırılması	42
2.15.3. Anaerobik çürütücülerin ısıtılması	43

	Sayfa
2.15.4. Anaerobik çürütücülerin verimi	44
2.16. Anaerobik Süreç Türleri	44
2.16.1. Yukarı akışlı anaerobik çamur yatağı reaktörleri	45
2.16.2. Karıştırılmalı reaktörler	45
2.16.3. Anaerobik kontak (temas) prosesler.....	45
2.16.4. Akışkanlaştırılmış ve genişletilmiş yataklar	46
2.16.5. Asit fazlı biyoreaktörler	46
2.16.6. Akışkan yataklı anaerobik reaktörler	46
2.16.7. Anaerobik filtreler	47
2.16.8. Anaerobik perdeli (şaşırtılmalı) reaktörler (ABR)	47
2.16.9. Aşağı akışlı sabit yataklı dolgulu film reaktör (DSFF).....	47
2.17. Biyogaz	48
2.18. Biyogazın Özellikleri	49
2.19. Biyogaz Kullanım Alanları	51
2.20. Biyogaz Üretimde Kullanılan Sistemler	52
2.20.1. Kesikli (Batch) fermentasyon.....	52
2.20.2. Beslemeli-kesikli fermentasyon	52
2.20.3. Sürekli fermentasyon.....	52
2.21. Biyogaz Üretiminin Yararı.....	53
2.22. Deneylerin Çok Faktörlü Planlanması (Box-Wilson Yöntemi)	53
3. KAYNAK ARAŞTIRMASI	61
4. MATERYAL VE YÖNTEM	67

Sayfa

4.1. Deneylerde Kullanılan Peyniraltı Suyu ve Özümleyici Çamurunun Bileşimi ve Özellikleri	67
4.2. Deney Düzenegi	69
4.2.1. Reaktör	69
4.2.2. Bağlantı elemanları	70
4.2.3. Gaz toplama sistemi	71
4.3. Deneysel Parametrelerin Belirlenmesi	72
4.3.1. Sıcaklık	72
4.3.2. pH	72
4.3.3. Özümleyici çamurunun hacmi	73
4.3.4. Bekleme süresi	73
4.3.5. Karıştırma	73
4.4. Analiz Yöntemleri	74
4.4.1. Toplam katıların tayini	74
4.4.2. Toplam uçucu katı (Organik madde içeriği) tayini	75
4.4.3. Toplam sabit katı (İnorganik madde içeriği) tayini	75
4.4.4. Toplam organik karbon içeriği	76
4.4.5. pH	76
4.4.6. Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ)	76
4.4.7. Gaz hacmi	79
4.5. Box – Wilson Deneysel Tasarım Yöntemi ile Oluşturulan Modelde Design Expert Paket Programı ile Anaerobik Arıtım İçin Optimum Koşulların Bulunması	79
5. DENEYSEL SONUÇLAR	81

Sayfa

5.1. Başlangıç Analiz Sonuçları	81
5.2. Deney Sonuçları	81
5.2.1. KOİ analiz sonuçları	81
6. DESIGN EXPERT 7.0.3 TRIAL PAKET PROGRAMI İLE OPTİMUM KOŞULLARIN BELİRLENMESİ	82
6.1. KOİ’ deki (%) Azalma Miktarı için Elde Edilen Sonuçlar	83
6.1.1. KOİ’ deki (%) azalma miktarları kullanılarak model denkleminin kurulması	83
6.1.2. 24. saat sonundaki KOİ’ deki (%) azalma miktarı için ANOVA testi sonuçları	86
6.1.3. 24. saat sonunda deneysel ve modelden belirlenen KOİ (%) azalma miktarlarının karşılaştırılması	87
6.1.4. 24. saat sonundaki KOİ’ daki (%) azalma miktarı için optimum koşulların belirlenmesi	89
6.1.5. 24. saat sonunda KOİ’ deki (%) azalma miktarı için cevap yüzey eğrilerinin çizilmesi	90
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	98
KAYNAKLAR	102
EKLER	107
EK-1 KOİ kalibrasyon eğrisi	108
EK-2 KOİ hesaplamalarına dair örnek	110
EK-3 KOİ’deki azalma yüzdesi için design expert paket programında bulunan değerler	111
ÖZGEÇMİŞ	113

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Taze peyniraltı suyunun bileşimi	4
Çizelge 2.2. Süt ve süt ürünleri işletmelerinin coğrafik dağılımı	7
Çizelge 2.3. Bazı maddelerin anaerobik işlemi durdurucu derişimleri.....	32
Çizelge 2.4. Anaerobik süreçler için optimum çevre şartları.....	35
Çizelge 2.5. Anaerobik arıtma sistemlerinin aerobik arıtma sistemlerine göre üstünlük ve sakıncaları.....	38
Çizelge 2.6. Biyolojik olarak giderilebilir endüstriyel bir atıksuyun, aerobik ve anaerobik arıtımının işletim özellikleri bazında karşılaştırılması	38
Çizelge 2.7. Biyogazın bileşimi	49
Çizelge 2.8. Bazı atıkların metan gazı yüzdeleri.....	50
Çizelge 2.9. Bazı yakıt türlerinin biyogaz ile karşılaştırılması	50
Çizelge 2.10. Üç değişken için eksen, etken ve merkez noktaları	57
Çizelge 2.11. Üç faktörlü ikinci dereceden plan matrisi	58
Çizelge 2.12. Farklı sayıdaki değişkenler için no ve α değerleri	59
Çizelge 2.13. ANOVA testinde kullanılan değerler.....	60
Çizelge 3.1. Peyniraltı suyunun atık özellikleri	66
Çizelge 4.1. Peyniraltı suyu ve özümleyici çamurunun özellikleri.....	68
Çizelge 4.2. Deneysel tasarım değişkenleri, seviye ve aralıkları.....	79
Çizelge 4.3. Deneysel tasarım matrisinin kodlanmış ve doğal değerleri ile 2^3 faktöriyel merkezi bileşim değerleri	80
Çizelge 5.1. Peyniraltı suyunun özellikleri	81

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.2. 24. saatte alınan örneklerdeki KOİ deney sonuçları ve KOİ (%) azalma değerleri	81
Çizelge 6.1. Deneysel tasarım yönteminde kullanılan bağımsız değişkenler	82
Çizelge 6.2. Deneysel tasarım yönteminde kullanılan bağımlı değişken	82
Çizelge 6.3. Sıcaklık, pH ve çamur hacmi değerleri ile 24. saat sonunda elde edilen KOİ yüzde azalma miktarları	83
Çizelge 6.4. KOİ azalma yüzdesi için parametreler arasında ihmal yapılmadan bulunan katsayılar ve istatistiksel hesaplamalar	84
Çizelge 6.5. 24 saat sonundaki KOİ' deki azalma yüzdesi için ANOVA testi sonuçları	86
Çizelge 6.6. KOİ'deki azalma yüzdesi için parametreler arasında ihmal yapıldıktan sonra bulunan katsayılar ve istatistiksel hesaplamalar	87
Çizelge 6.7. KOİ' deki azalma yüzdesi için deneysel olarak bulunan ve modelden hesaplanan Y değerleri ve % hata değerleri	88
Çizelge 6.8. KOİ' daki azalma yüzdesini optimum yapan parametre değerleri	90

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Ön arıtma sistemine örnek akım şeması	9
Şekil 2.2. Biyolojik arıtma işlemi olarak aktif çamur sisteminin kullanıldığı ikincil arıtma tesisi.....	10
Şekil 2.3. Biyolojik arıtma işlemi olarak damlatmalı filtre sisteminin kullanıldığı ikincil arıtma tesisi	10
Şekil 2.4. Anaerobik atıksu işleminde kompleks organiklerin metana dönüştürülmesinin basitleştirilmiş iki adımlı yöntemi	21
Şekil 2.5. Anaerobik çamur çürütücüler (a)Standart hızlı çürütücüler (b) Yüksek hızlı çürütücüler (c) İki kademeli çürütücüler.....	40
Şekil 2.6. Anaerobik proses türleri.....	48
Şekil 4.1. Gaz toplama düzeneği.....	71
Şekil 6.1. Deneysel olarak bulunan ve modelden hesaplanan KOİ' deki (%) azalma miktarlarının karşılaştırılması.....	89
Şekil 6.2. Sabit çamur hacmi yüzdesinde (14,20), sıcaklık ve pH'ın KOİ' deki azalma yüzdesi üzerine etkisi.....	91
Şekil 6.3. Sabit çamur hacmi yüzdesinde (14,20), sıcaklık ve pH'ın KOİ' deki azalma yüzdesi üzerine etkisi için contour plot.....	92
Şekil 6.4. Sabit pH'da (7,19), sıcaklık ve çamurun hacimsel yüzdesinin KOİ' deki azalma yüzdesi üzerine etkisi	93
Şekil 6.5. Sabit pH'da (7,19), sıcaklık ve çamurun hacimsel yüzdesinin KOİ' deki azalma yüzdesi üzerine etkisi için contour plot.....	94
Şekil 6.6. Sabit sıcaklıkta (37,9), pH ve çamurun hacimsel yüzdesinin KOİ' deki azalma yüzdesi üzerine etkisi	95
Şekil 6.7. Sabit sıcaklıkta (37,9), pH ve çamurun hacimsel yüzdesinin KOİ' deki azalma yüzdesi üzerine etkisi için contour plot.....	96

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Deney düzeneği.....	69
Resim 4.2. KOİ analizinde kullanılan ısıtıcı	78

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 KOİ'deki azalma yüzdesi
X_1	Sıcaklık, $^{\circ}C$
X_2	pH
X_3	Çamur hacmi oranı
X_{i0}	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**

ABR	Anaerobik perdeli reaktör
AKM	Askıda katı madde
ANOVA	Analysis of Variance
BOİ	Biyokimyasal oksijen ihtiyacı
Contour plot	Eş KOİ'deki %Azalma Eğrileri
CSTR	Sürekli karıştırmalı tank reaktör
DAS	Demir 2 Amonyum Sülfat
DSFF	Aşağı akışlı sabit yataklı dolgulu film reaktör
HAS	Uzun katı alıkonma süresi
KHP	Potasyum Hidrojen Fitalat
HKO	Hata karelerinin oranı
HKT	Hata kareler toplamı
HRT	Hidrolik alıkonma süresi
KM	Kuru madde
KOİ	Kimyasal oksijen ihtiyacı
MKO	Model karelerinin oranı
MKT	Model karelerinin toplamı
OKM	Organik kuru madde
PAS	Peynir altı suyu
SRT	Uçucu madde alıkonma süresi
SBR	Ardışık kesikli reaktör
THKT	Toplam hata kareler toplamı
TKM	Toplam katı madde
TUA	Toplam uçucu asit
UAKM	Uçucu askıda katı madde
UASB	Yukarı akışlı anaerobik çamur yatağı reaktörü
UKM	Uçucu katı madde
VFA (UYA)	Uçucu yağ asidi

1. GİRİŞ

Gelişmekte olan diğer ülkelerde olduğu gibi ülkemizde de sanayileşme ve teknolojik gelişim beraberinde, atık üretim miktarındaki artış problemini getirmektedir. Bu problemin çözümündeki en etkin yöntem olabildiğince az atık üretimi ve üretilen bu atıkların kaynağında ayrıştırılıp, bunlar içerisinde geri kazanımı mümkün olanların tekrar değerlendirilmesi, geri kalan kısmının ise uygun arıtım şekilleriyle zararsız hale getirilmeleridir. Düşük reaktör hacmi, düşük atık çamur üretimi, düşük atık biyokütle üretimi, enerji tasarrufu ve değerli yan ürünler, atık gaz arıtımı gereksiniminin ortadan kalkması, düşük köpüklenme problemleri, aerobik olarak giderilemeyen bazı maddelerin giderimi, düşük klorlu organik toksisite düzeyleri , mevsimsel arıtım olanağı, düşük ekipman gereksinimi, yüksek hacimsel yükleme olanakları, düşük azot ve fosfor gibi besin elementi gereksinimi gibi üstünlüklerinden dolayı anerobik arıtım aerobik arıtmaya göre daha çok tercih edilir bir arıtma yöntemidir.

Çevre kirliliğinin en önemli nedenlerinden biri de tartışmasız sanayi kuruluşlarıdır. Sanayi bir yandan doğal kaynakları kullanarak ürün verirken bir yandan da çevre kirliliğine neden olmaktadır. Sanayileşme sürecine giren sanayileşmesini tamamlayan toplumlar, doğal kaynakların azaldığını, doğanın kendini yenileme gücünün sınırlı olduğu ve doğal dengelerin bozulmaya başladığını farkettileri zaman, hem sanayileşmeyi sürdürmek, hem de çevreyi koruyabilmek için köklü önlemler aramaya başlamışlardır. Bugün kabul gören en yaygın görüş çevrenin de bir kaynak olduğu, zamanla kirlenerek tükenebileceği ve bu kaynak kullanımının da bir maliyetinin olabileceği yönündedir.

Almanya, Avusturya ve A.B.D. başta olmak üzere dünyanın pek çok yerinde yenilenebilir enerji kaynaklarına dair araştırmalar yapılmakta ve uygulanmaktadır. Bu enerji kaynakları arasında evsel, kentsel, tarımsal ve hayvansal atıklar enerjiye dönüştürülebildikleri için dikkat çekmektedir. Aynı zamanda atık birikiminin dolayısıyla da bu atıkların çevre üzerine zararlı etkilerinin de önüne geçilmiş olur. Arıtma çamurları ve peyniraltı suyu da bu atıklar kapsamındadır.

İşlenmemiş atıksu arıtma çamurlarının katı kısmının %5'ten fazla organik madde içermesi nedeniyle 2005 yılından itibaren bazı Avrupa ülkelerinde, örneğin Almanya'da deponi alanlarına bırakılması yasaklanmıştır. İçerisinde bulundurduğu toprak için değerli besleyiciler, organik kısmının ısı olarak değerlendirilme imkanı ve gazlaştırılma seçenekleri ile atıksu arıtma çamurlarının önümüzdeki yıllarda Türkiye'de de önemli bir hammadde olarak gündeme gelmesi kaçınılmazdır.

Çevre sorunlarının çok büyük boyutlara ulaştığı günümüzde yatırım ve işletim maliyetlerinde sağladığı büyük üstünlüklerinden dolayı, dünyanın birçok bölgesinde anaerobik biyoteknolojinin katı-sıvı bütün organik maddelerin gideriminde kullanımı giderek artmaktadır. Yoksul ülkelerde yerel olanaklarla yapılan ilkel üretim girişimlerinin yanı sıra, zengin ülkelerde biyogaz teknolojisi endüstriyel anlamda da uygulanmaktadır.

Tesis ve üretim teknolojisinin basitliği, enerji potansiyelinin büyüklüğü, uygulama alanlarının genişliği, kullanım kolaylığı gibi nedenlerle anaerobik parçalanma sonucu elde edilebilen biyogaz, çok önemli ve üzerinde ısrarla durulması gereken bir seçenek enerji kaynağıdır. Bu seçenek enerjinin bir diğer önemi de, hayvancılık ve çiftçilik sektörlerinin ülkemizde çok yaygın oluşudur.

Süt ve süt ürünleri işletmelerinde kış ve yaz mevsimlerinde süt miktarına bağlı olarak ürün miktarında dolayısıyla atıksu miktarlarında değişiklik olmaktadır. Yapılan inceleme ve araştırmalar sonucunda süt ve süt ürünleri işletmelerinde 1 ton süttan 0,1 ton kaşar peyniri ve 0,9 m³ atıksu, ayrıca 1 ton süttan 0,23 ton beyaz peynir ve 0,77 m³ atıksu oluştuğu saptanmıştır [1].

40-60 g KOİ/Lgün değerleriyle, peynir altı suları (PAS) yüksek organik madde içerirler. Bu atıksular 1-5 g/L gibi düşük askıda katı madde ve yüksek ayrılabilirlikte karbonhidratlara sahiptirler. Yüksek organik içerikten dolayı, anaerobik çürütme gerekli olan bir arıtma sistemidir [2]. Bu sistem mandıra atıksularının arıtımında tercih edilir ve dünyada da sürekli karıştırılmalı bu sistem birçok yerde kullanılmaktadır [3].

Mandıra atıksuları (çalışmamızda kullanılan peyniraltı suyu) çoğu yerde arıtılmadan, kimi zaman aslında uygun olmayan bir alıcı ortama, kimi zaman da şehir kanalizasyon şebekesine verilmektedir. Bu atıksuların yüksek kirlilik değerleri, alıcı ortam boşaltım standartlarına uygun hale getirilmeden üretildikleri yerden uzaklaştırılmaya çalışılması yasal olmayıp, sürdürülebilir çevre bilincine de aykırıdır. Halbuki bu atıklar, sahip oldukları yüksek enerji eşdeğerleri nedeniyle, anaerobik arıtım ile, insanlık yararına kullanılabilecek önemli bir enerji potansiyeli olarak değerlendirilebilirler.

Tüm bu gerçeklerin ışığında; çalışmanın amacı peyniraltı suyunun, arıtma çamurunun içerdiği mikroorganizmalar yardımıyla anaerobik olarak arıtımının incelenmesi, en yüksek arıtım verimi için gerekli olan optimum sıcaklık, pH ve arıtma çamuru hacmi değerlerinin, Box-Wilson deneysel tasarım yöntemi ile tasarlanan deneylerin, Design Expert 7.0.3. Trial paket programı yardımı ile optimizasyonunun yapılması suretiyle belirlenmesi; ve bu şekilde elde edilen sonuçlarla, bu konu ile ilgili çalışmalara katkıda bulunmaktır.

Bununla birlikte amaç, peyniraltı suyu gibi yüksek kirlilik içeren atıkların çevreye olabilecek zararlı etkilerini en düşük düzeye indirmenin gerekliliğini gündeme getirmek ve bu konuda anaerobik arıtım ile en yüksek kirlilik giderimi için, optimum koşulların belirlenmesidir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Peyniraltı Suyu (PAS) ve Özellikleri

Peyniraltı suyu, sütün peynire işlenişi sırasında arta kalan yeşilimsi, sarı renkli sıvı olarak tanımlanabilir. Rengini içerdiği laktoflavinden alır. Bileşimi, peynir yapımında uygulanan yöntem ve özellikle de sütün pıhtılaştırılmasında kullanılan maddenin asit veya maya enzimi oluşuna göre değişir. Genellikle ekşi peynir suyu ve tatlı peynir suyu olmak üzere iki çeşit peynir altı suyu vardır. Sütün laktik asit bakteri kültürleri yardımıyla asitleştirilmesi veya süte organik madde katılması yöntemiyle peynir yapımında ortaya çıkan peynir altı suyu; ekşi peynir suyu veya asit peynir suyu olarak adlandırılır. Buna karşın, peynir üretiminde pıhtılaştırıcı olarak peynir mayası enzimi (rennet) kullanılması durumunda ortaya çıkan peynir altı suyu ise, tatlı peynir suyu veya maya peynir suyu olarak tanımlanır. Bunların gerek bileşimleri gerekse özellikleri birbirlerinden oldukça farklıdır. Aralarındaki en önemli fark, içerdikleri laktoz ve laktik asit miktarlarından kaynaklanır [4].

Çizelge 2.1. Taze peyniraltı suyunun bileşimi [4]

Bileşenler	Tatlı Peynir Suyu (Maya Peynir Suyu)	Ekşi Peynir Suyu (Asit Peynir Suyu)
Su	% 93-94	% 94-95
Kuru madde	% 6-7	% 5-6
Yağ	% 0,3-0,4	% 0,1
Laktoz	% 4,5-4,7	% 3,8-4,2
Kazein (peynir kırıntısı)	% 0,05-0,1	% 0,05-0,1
Serum proteinleri	% 0,8-1,0	% 6
Mineral maddeler	% 0,5-0,7	% 0,7-0,8
Kalsiyum	0,06g-100g	0,1g-100g
Laktik asit	% 0,1-0,2	% 0,5 (0.7)
Sitrik asit	% 0,1	% 0,1
pH değeri	6,4-6,0	4,8-4,4

Peynir yapımında, pıhtı oluşumunu sağlamak için kullanılan maya ve asitten dolayı peyniraltı suyunun pH değeri 4,4-6,4 arasında değişebilir [4].

Bir litre peynir suyunun doğrudan atıksulara karışmasıyla oluşan kirlilik miktarı, yaklaşık bir kişinin bir günde ürettiği kirliliğe eşdeğerdir. Örneğin, peynir üretmek amacıyla günde 10 ton süt işleyen ve artakalan yaklaşık 8 ton peynir altı suyunu değerlendirmeden döken bir işletme, 8000 nüfuslu bir kentin yol açtığı düzeyde çevre kirlenmesine neden olmaktadır. Bu da gösteriyor ki peynir altı suyu değişik şekillerde değerlendirmesi gereken bir atıksudur [4].

2.2. Peyniraltı Suyunun Değerlendirilmesi

Peyniraltı suyu içeriğinde bulunan değerli maddeler nedeni ile değişik şekillerde kullanılabilir. Başlıca kullanım alanları [5].

1. Sıvı olarak fabrika yemlerine katılarak bazı hayvanların beslenmesinde kullanılabilir.
2. Koyulaştırılarak veya toz haline dönüştürülerek,
 - Hayvan yemlerine katılarak
 - Ekmek, bisküvi, dondurmaların hazırlanmasında
 - Eritme peyniri yapımında kullanılabilir.
3. 95 °C'ye kadar ısıtılarak
 - Proteinlerin pıhtılaştırılması suretiyle, lor ve benzeri ürünlerin yapımında
 - Pıhtılaşan proteinlerden, kurutularak hayvan beslenmesinde yararlanılarak
 - Eczacılıkta, penisilin endüstrisinde yararlanılmaktadır.
4. B₁₂ vitamini elde edilmesinde yararlanılmaktadır.
5. Peynir suyuna laktik asit bakterileri aşlamak suretiyle laktik asit, maya aşlamak suretiyle alkol elde edilmektedir [5].

Herhangi bir işlem uygulanmamış peynir altı suyundan anaerobik fermentasyon yoluyla biyogaz üretimi yapılabilir. Örneğin 1 litre peynir altı suyundan

yaklaşık % 50 metan içeren 37 litre biyogaz üretilmekte ve litre başına 960 kj enerji elde edilebilmektedir [4].

2.3. Kirletici Olarak PAS ve PAS'ın Atık Özellikleri

Her yıl tonlarca PAS üretilmekte ve bu atık, kanallara ve toprağa arıtmaksızın boşaltılmaktadır. Yüksek organik yüke sahip PAS nehirlerle, atık su arıtma tesislerine, diğer su havzalarına ve toprağa verilmektedir. Laktozdan kaynaklanan yüksek BOİ ve KOİ değerlerinden dolayı, PAS boşaltıldığı biyolojik arıtma tesislerine zarar vermektedir. 3870 L/gün PAS belediye kanalizasyonuna boşaltıldığında 1800 insanın neden olduğu yüke eşdeğer kirliliğe neden olmaktadır. PAS'daki azot suda çözündüğünden yer altı sularına karışabilmekte ve böylece insan ve hayvan sağlığını tehdit edebilmektedir. Sürekli araziye boşaltım, toprağın fiziksel ve kimyasal yapısını bozmakta, ürün verimliliğini düşürmekte ve önemli su kirliliği sorunlarına neden olmaktadır [6].

Tarım ve Köy İşleri Bakanlığı'na yapılan Gıda Sanayi Envanteri çalışmasında yılda 1000 tonun üzerinde üretim yapan süt işletmesi sayısı 1300 adettir. Bu işletmelerin bölgelere göre dağılımı Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Süt ve süt ürünleri işletmelerinin coğrafik dağılımı

Bölgeler	Toplam İşletme Sayısı (adet)	Toplam Kapasite (ton/yıl)
I. Bölge (Orta Kuzey)	106	583,878
II. Bölge (Ege)	505	2 050,651
III. Bölge (Marmara)	344	1 750,115
IV. Bölge (Akdeniz)	82	371,273
V. Bölge (Kuzeydoğu)	34	242,583
VI. Bölge (Güneydoğu)	19	109,938
VII. Bölge (Karadeniz)	68	395,420
VIII. Bölge (Orta Doğu)	17	109,274
IX. Bölge (Orta Güney)	125	550,643
Toplam	1 300	6 153,175

Çizelge 2.2'ye göre süt işletmelerinin coğrafik dağılımına bakıldığında, Ege bölgesi (% 38,8) birinci sırayı, Marmara Bölgesi (% 26,5) ikinci sırayı almakta ve VIII. Bölge yani Orta-Doğu Anadolu Bölgesi 17 tesis ile en az tesise sahip bölge olmaktadır.

Süt ürünleri işletmecileri çevre kirliliği açısından oldukça önemli olan peyniraltı suyunun arıtılmasını, arıtma tesisinin ilk yatırım miktarının ve işletme giderlerinin az olmasını istemektedirler [7]

2.4. Arıtma Çamuru Tanımı

Atık su arıtımında, fiziksel ve kimyasal arıtma süreçlerinde atık su içinden yüzdürülerek veya çökeltilerek uzaklaştırılan maddeler ile, biyolojik arıtma sonunda çözünmüş haldeki maddelerin (kirliliklerin) mikroorganizma bünyesine geçirilmesiyle, mikroorganizmaların sistemden yüzdürülerek veya çökeltilerek

alınması sonucu ortaya çıkan % 95-99,5 oranında su içeren akışkan özellikteki atıklar “arıtma çamuru” olarak isimlendirilir [8].

Atık su arıtımı sonucu oluşan sıvı ya da yarı katı halde, kokulu; uygulanan arıtma işlemine bağlı olarak ağırlıkça % 0,25-12 katı madde içeren atıklar “ham arıtma çamuru” veya kısaca “ham çamur” olarak isimlendirilir. Ham çamurlar stabilize edilerek ekolojik yönden kullanıma uygun hale getirildikten sonra “işlenmiş arıtma çamuru” veya kısaca “arıtma çamuru” olarak tanımlanır. Başta Amerika olmak üzere İngiltere ve bazı Avrupa Birliği ülkelerinde “biyokatı” “işlenmiş arıtma çamuru” ile eş anlamlı olarak kullanılmaktadır [9].

Arıtma tipine ve amacına göre arıtma çamurlarının cinsleri farklılık gösterir. Çökebilen katı maddelerin oluşturduğu ön çökeltme çamurları, kimyasal arıtma ve pıhtılaştırma sonucu oluşan kimyasal çamurlar, biyolojik arıtma işlemleri sonucu oluşan biyolojik çamurlar ve içme suyu arıtma işlemleri sonucu oluşan çamurlar gibi.

2.5. Çamur Kaynakları

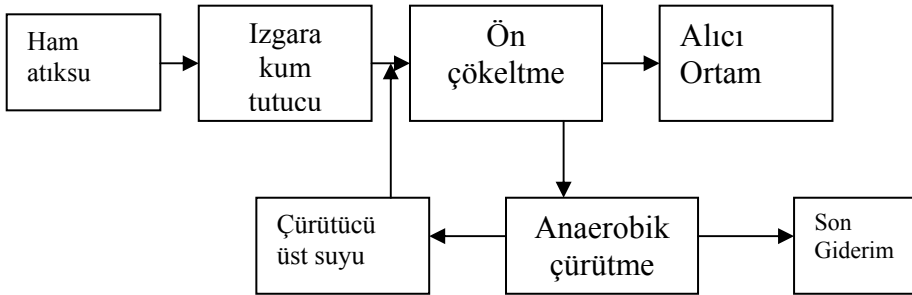
Atık su arıtma tesisleri, evsel ve endüstriyel nitelikli atık suların alıcı ortamlara doğrudan boşaltılması durumunda doğal çevrede oluşabilecek olumsuz etkileri azaltmak için tasarımlanır. Farklı atık su özelliklerinden dolayı, her atık suyun arıtımı için uygulanan arıtma işlemleri de farklı olacaktır. Genel olarak kentsel atık su arıtımında üç temel arıtma sistemi uygulanmaktadır [9].

2.5.1. Birincil arıtım (Ön arıtma)

Bu yöntem daha çok fiziksel arıtım yöntemlerini içerir ve özellikle büyük şehirlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ön arıtım tesisine örnek akım şeması Şekil 2.1’de verilmektedir. Ön arıtmanın temel ilkesi çökebilir haldeki katı maddelerin atık sudan uzaklaştırılmasıdır. Ön arıtma sistemleri ile oksijen gereksinimi olan materyalin giderilmesi esas değildir, ancak BOİ’nin bir kısmı çökebilen katı maddeler ile birlikte giderilir. Kendiliğinden çökebilir nitelikli ve esas olarak inorganik özellikteki

katı maddeler kum tutucularda tutulurlar. Ön çökeltim havuzu kendiliğinden çökebilecek katı maddeleri tabanda, yüzebilen maddelerin ise yüzeyde toplanmasını sağlar [9].

Anaerobik çürütme ile uçucu katı maddelerin % 50'si giderilir, koku azaltılır ve önemli oranda patojen giderimi sağlanır. Çürümüş çamur doğrudan araziye verilebilir, kurutma yataklarında suyu alınabilir veya mekanik olarak suyu alındıktan sonra son giderim yapılır.

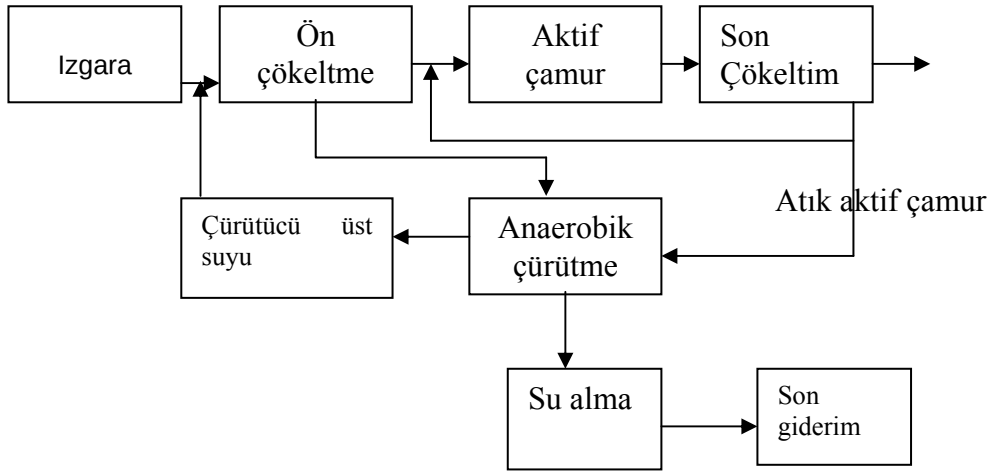


Şekil 2.1. Ön arıtma sistemine örnek akım şeması [9]

2.5.2. İkincil arıtım

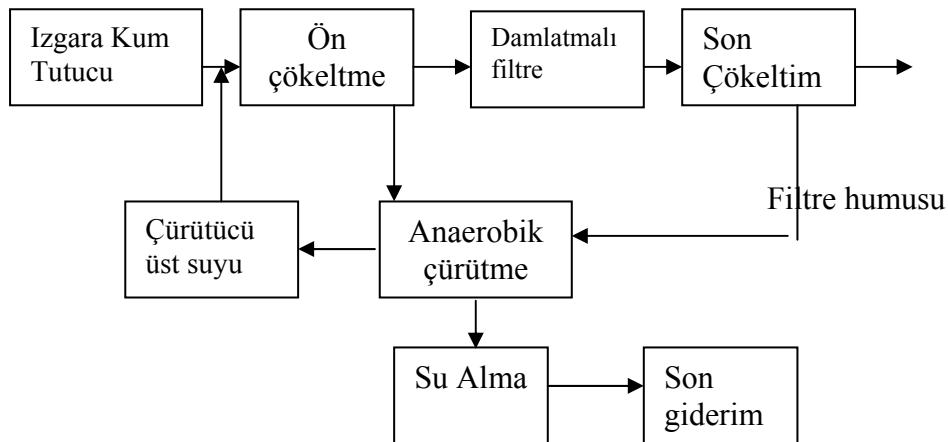
İkincil arıtmada esas, çözünebilir nitelikteki organik maddelerin biyokimyasal oksidasyonu yani BOI giderimidir. BOI, biyokimyasal yollarla giderilir; fakat fiziksel ve kimyasal arıtma işlemleri de bu amaç için kullanılabilir. En yaygın şekilde kullanılan ikincil arıtım sistemleri aktif çamur ve damlatmalı filtrelerdir [9].

Aktif çamur sistemi: Bu sistem genellikle büyük şehirlerde atık suların arıtımında kullanılmaktadır. Biyolojik arıtma işlemi olarak aktif çamur sisteminin kullanıldığı ikincil arıtma tesisi akım şeması Şekil 2.2’de verilmektedir.



Şekil 2.2. Biyolojik arıtma işlemi olarak aktif çamur sisteminin kullanıldığı ikincil arıtma tesisi [9]

Damlatmalı filtre sistemi: Bu sistem küçük yerleşim yerlerine ait atık suların ve biyolojik olarak ayrışabilen sanayi sularının arıtılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır [10]. Bu sistemdeki biyolojik süreçler gerçek anlamda mekanik bir filtre olarak çalışmazlar. Bu nedenle, filtrelerin biyolojik reaksiyon yatakları olarak isimlendirilmesi daha doğru bir yaklaşımdır. Biyolojik arıtma işlemi olarak damlatmalı filtre sisteminin kullanıldığı ikincil arıtma tesisinin akım şeması Şekil 2.3’de verilmektedir [9].



Şekil 2.3. Biyolojik arıtma işlemi olarak damlatmalı filtre sisteminin kullanıldığı ikincil arıtma tesisi [9]

Filtre yataklarından kopan katı parçacıklar son çökeltim havuzunda arıtılmış sudan ayrılır. Bu çamur “filtre humusu” olarak bilinir ve miktarı azdır. Filtre humusu ve atık aktif çamur genellikle ham ön çökeltim çamuru ile karıştırılır ve anaerobik çürütücülerde çürütülür. Sonuç materyal *karışık çürük çamur* olarak isimlendirilir ve son giderimden önce suyunu almak gereklidir.

2.5.3. Üçüncül arıtım (fiziksel – kimyasal arıtım)

İkincil arıtmadan daha yüksek nitelikte arıtım sağlamak üzere uygulanan ileri arıtım kademesidir [11]. Oksijen tüketen materyalin giderilmesi önemli olduğu kadar azot ve fosfor giderimi de önemlidir. Bu noktada fiziksel – kimyasal arıtma işlemleri önem kazanır. Ön çökeltim havuzuna demir ve alüminyum tuzları eklenmesi sonucu ikincil arıtmadaki biyolojik çamurlara benzer özelliklere sahip çamurlar oluşur [9]. İkincil arıtma çıkış suyuna kimyasal madde eklenmesi ile içme suyu arıtma tesislerindeki benzer özellikte çamurlar oluşur. Her iki durumda da bu çamurların suyunun alınması ve işlenmesi zordur.

2.6. Arıtma Çamurunun Oluşum Yerlerine Göre Özellikleri

Arıtma çamurlarının işlenmesi ve giderilmesinde en önemli konu arıtma işlemleri sonucunda oluşan çamur ve katı maddelerin özelliklerinin bilinmesidir. Çamurun özellikleri, çamur ve katı maddenin kaynağına ve uygulanan arıtma işlemine bağlı olarak değişir. Su ve atıksu arıtma tesislerinde oluşan arıtma çamurlarının bazı özellikleri şu şekildedir.

Izgara atıkları: Izgara çubukları arasında tutulabilecek büyüklükteki bütün organik ve inorganik maddeleri kapsar [12].

Kum tutucu atıkları Yüksek hızlarda çökebilen inorganik katı maddelerden oluşur [11].

Köpük, yağ ve gres: Köpük, ön ve son çökeltim havuzu yüzeyinden sıyrılan yüzebilir nitelikli maddelerden oluşur. Gres, bitkisel ve mineral yağlar, hayvansal yağlar, sabun, yiyecek atıkları, meyve ve sebze atıkları, saç, kağıt, paçavra içerebilir [12].

Ön çökeltim çamuru: Ön çökeltim çamurları genellikle gri-kahve renkli, kötü kokuludur. Uygun işletme koşullarında kolayca çürütülebilir [9].

Kimyasal çökeltim çamurları: Metal tuzlarının kimyasal çökmesi sonucu oluşan çamurlar genellikle koyu renklidir, hatta çok miktarda demir içeriyorsa yüzeyi kırmızımsıdır. Kireç çamurları gri-kahve rengidir. Kimyasal çamurların hissedilebilir bir kokusu olmakla birlikte ön çökeltim çamuru kötü değildir [9].

Aktif çamur: Aktif çamur genellikle kahverengi, floklu görünümündedir. Rengi koyuysa septik koşullar başlamış demektir. Renk açıksa yeterince havalanmamış olabilir. İyi koşullardaki çamur, toprak kokusundadır [9].

Damlatmalı filtre çamuru: Damlatmalı filtre humusu, floklu yapıda, taze olduğu zaman kokusuzdur. % 0,5-1,5 arasında katı madde içerir, rengi sarıdan siyaha değişir. Genellikle diğer çamurlara göre daha yavaş bozunur. Filtre humusunda kurtçuklar fazla ise çabucak zararsız hale gelir. Damlatmalı filtre çamuru kolayca çürür [9].

Karışık çürük çamur: Ön çökeltim çamuru ve atık aktif çamur karışımı olan karışık çürük çamur açık kahve renkli ve kokusuzdur. Düşük katı madde derişimine sahiptir ve yüksek biyolojik aktivitesinden dolayı suyunu almak, dolayısıyla son giderim zordur [9].

Aerobik çürümüş çamur: Rengi açık kahverengiden koyu kahveye doğru değişir ve floklu görünümündedir. Aerobik çürümüş çamurun kokusu rahatsız edici değildir, küf kokusu ile tanınır. İyi çürümüş aerobik çamur kurutma yataklarında kolayca suyunu verir[9].

Anaerobik çürümüş çamur: Anaerobik çürümüş çamurun rengi koyu kahverengiden siyaha doğrudur ve önemli miktarda gaz içerir. Tümü çürüdüğünde rahatsız edici değildir, kokusu belirsizdir, yanık lastik ve sıcak katran kokusu hissedilir. Kurutma yataklarında suyunu almak daha kolaydır, mekanik olarak suyunu gidermek zordur. [9].

Kompostlanmış çamur: Kompostlanmış çamurun rengi koyu kahve rengi ile siyah arasındadır, fakat kompostlaştırma işlemi sırasında eski kompost ve odun talaşı kullanılmışsa, rengi değişebilir. İyi kompostlanmış çamurun kokusu rahatsız edici değildir, bahçe tipi toprak koşullandırıcısı olarak ticari amaçlı kullanılabilir [9].

Septik tank çamur: Septik tank çamurları siyah renklidir. Çamur uzun depolamaya rağmen iyi çürümemiş ise hidrojen sülfür ve diğer gaz çıkışlarından dolayı kokusu rahatsız edicidir [9].

Atık alum çamuru: İçme suyu arıtımından kaynaklanan atık alum çamurunun sudan giderilen materyalin tipine bağlı olarak rengi de farklılık gösterir. Genellikle gri-sarı renkte ve kokusuzdur. Kurutma yataklarında suyunu almak zordur [9].

2.6.1. Deneylerde kullanılan arıtma çamurunun gördüğü arıtma süreci

Bu çalışmada kullanılan arıtma çamuru, Ankara Merkezi Atıksu Arıtma Tesisi'nden alınmıştır. Özümleyicinin giriş kısmından alınan özümleyici çamuruna, bu aşamaya gelene kadar bir dizi arıtma işlemi uygulanmaktadır.

Arıtma Süreci

Ankara Merkezi Atıksu Arıtma Tesisi'nde arıtma için kullanılan süreç, anaerobik çamur kararlaştırıcılı aktif çamur tekniği ve bant filtre presli mekanik çamur suyu alma tekniğidir.

Ön arıtma birimi suyun arıtım için uygun hale getirildiği bölümdür. Ön arıtma giriş yapısı için zararlı olabilecek veya işlemi etkileyecek maddelerin uzaklaştırılmasını kapsar. Bu maddeleri tutmak için kullanılan yöntem ızgaradan geçirme ve kum tutucu havuzlarında kumun, yağ ve gresin uzaklaştırılması yöntemidir.. Havuzlar belirli zaman aralıklarında temizlenmektedir. Ön arıtma biriminde bir de Demir Sülfat Dozlama Birimi bulunmaktadır. Buradan giriş suyuna Demir sülfat ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) çözeltisi dozlanarak özümleme tanklarında açığa çıkan biyogaz içerisindeki Hidrojen sülfür (H_2S) oranının düşürülerek, biyogaz motorlarında ve tesisatta oluşabilecek korozyona karşı önlem alınmaktadır.

Kum tutuculardan çıkan su dağıtım odası yardımı ile ön çökeltme tankına gönderilir. Bu bölümde ön arıtma sisteminde çöktürülemeyen, askıda kalan ve yüzebilen maddeler uzaklaştırılır. Ön çökeltme tankında dairesel hareketli köprüye bağlı sıyrıcılar yardımı ile dibe çöken bu maddeler toplanarak eğim ile ham çamur yoğunlaştırıcılarına gönderilir. İyi bir ön çökeltme tankı giren sudaki askıda katı madde miktarının %60-70, BOI_5 miktarının %25-30'unu arıtabilir. Ön çökeltme tankından savaklanan su, aktif çamur ile karıştırılarak biyolojik arıtma için havalandırma tanklarına gönderilir.

Ön çökeltmeden çıkan atıksu havalandırma tanklarına giriş yapar. Bu bölümde çözünmüş olan organik maddeler mikroorganizmalar için besin kaynağıdır. Bu besinin kullanılmasıyla aktif mikroorganizma kütlesinin üremesi ve atığın aerobik olarak kararlılaştırılması sağlanır. Aerobik mikroorganizmaların yaşayabilmesi için yüzeysel havalandırıcılar yardımı ile suya oksijen aktarımı sağlanır. Bu havalandırıcılar aynı zamanda karıştırma işlemini de yapmaktadırlar.

Havalandırma tanklarından çıkan aktif çamurlu su son çökeltme tanklarına giriş yapar. Havalandırma tanklarında kararlılaştırılmış olan atık, son çökeltme tanklarında çamur olarak çöktürülür. Çöken bu çamur eğimle geri dönüş pompalama istasyonu deposuna gelir. Gerekli miktarı geri döndürülür, fazla miktarı da ham çamur yoğunlaştırıcılarına gönderilir.

Ham çamur yoğunlaştırma tanklarında, ön çökeltme tanklarından gelen ham çamur ve son çökeltme tanklarından gelen fazla çamurun karıştırılarak yoğunlaşması sağlanır. Çamur, havuzlarda yaklaşık iki gün bekletilerek, yerçekimi ile iyice çöktürülür. Böylelikle çamurun kuru madde oranı yükseltilir.

Ham çamur tanklarından alınan yoğunlaşmış çamur, pompa yardımı ile ısı değiştiriciden geçirilerek ısıtılır ve özümleme tanklarına pompalanır. Özümleme, çürüyen veya bozunabilen organik maddelerin biyolojik olarak parçalanmasıdır. Özümleme süreci anaerobik koşullarda uygun pH değeri olan 7,0-7,5 arasında 35 °C’de iki üç hafta sürer. Bu işlemde son ürün olarak çürümeyen ve bozunmayan katı maddeler kalmaktadır. Üstten alınan gaz filtrelerden geçirilerek gaz depolama tanklarına gönderilir. Açığa çıkan gaz karışımı yaklaşık olarak %65 oranında metan, %31 oranında karbondioksit ve %4 oranında diğer gazları içerir. Açığa çıkan bu biyogaz, elektrik üretiminde, sıcak su gereksiniminin karşılanmasında ve özümleme tanklarında karıştırma işleminde kullanılır [13].

2.7. Arıtma Çamurunun Değerlendirilmesi

Arıtma çamurlarının içermiş olduğu organik maddelerin bir ısı değeri oluşu, veya bu çamurun tarım arazilerinde kullanılabilir oluşu nedeniyle arıtma çamurlarının çevreye vermiş olduğu zararların da önüne geçebilmek için değişik giderme yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler kısaca şöyle sıralanabilir;

Açık alanda değerlendirme olanakları

- Tarımsal alanda değerlendirme
- Orman alanlarında değerlendirme
- Bozulmuş alanlarda (kömür ve maden yatakları, taş ocakları) değerlendirme
- Park, bahçe ve eğlence alanlarında değerlendirme

Kurutulmuş çamurun değerlendirilmesi

- Tarımsal gübre ve toprak iyileştiricisi olarak
 - Yakma
- a) Isı ve elektrik elde etmek için
- b) Çimento üretiminde ek yakıt olarak
- c) Kömürlü santralde ek yakıt olarak

Gazlaştırma (piroliz, diğer çöpler ile beraber)

Arıtma çamurlarının değerlendirilmesi için bir diğer yöntem de diğer çöpler ile beraber gazlaştırma işlemidir.

Çamurdan biyogaz eldesi (ileri aşamada biyogazdan metanol eldesi)

Çamurdan biyogaz eldesi, oldukça etkin bir yöntemdir. Oluşan çamurun bu şekilde değerlendirilmesi, bu yöntemi kullanan tesis için ilk yatırım maliyeti aşıldıktan sonra, ekonomik açıdan yardımcı olabilecek bir işlemdir.

Seçenek yöntemler

- Yaş oksidasyon
- Hidroliz
- Hidrotermal oksidasyon
- Mikrodalga-yüksek basınç işlemi [14].

2.8. Anaerobik Arıtım

Anaerobik işlem, biyolojik olarak dönüştürülebilen büyük ve karmaşık yapıları organik moleküllerin anaerobik, yani oksijen içermeyen bir ortamda, birden fazla mikroorganizma grubunun ortak ve birbirine bağımlı bir dizi etkinliği sonucu CH_4 ve CO_2 gibi başka ürünlere dönüştürülmesidir. Bu dönüşüm süreci hidroliz, asit

oluşumu (asetojenesis) ve metan oluşumu (gazlaştırma, metanojenesis) aşamalarından oluşan biyokimyasal bir işlemdir [15,16]. Her mikroorganizma grubu kendilerinden önceki grupların ürettikleri maddeleri besin maddesi olarak kullanmakta ve ardından bir başka grup bakterilerin besin maddelerine çevirmektedir. Hiçbir mikroorganizma, basit yapılı maddeler dahi olsa bir organik maddeyi, tek başına metana dönüştürememektedir [16].

Bir anaerobik işlemde karmaşık yapılı organik maddelerin tümüyle metana dönüşebilmesi için ortamda bulunması gereken ve birbirine bağımlı olarak çalışan mikroorganizma grupları hidroliz bakterileri, asit oluşturan bakteriler ve metan üreten bakterilerdir [16]. Birinci basamak hidroliz basamağıdır. Bu basamakta hidrolaz enzimleri yardımıyla yüksek karbon içerikli maddeler, örneğin yağlar, yağ asitlerine; polisakkaritler monosakkaritlere; proteinler aminoasitlere dönüştürülürler. İkinci safha organik maddelerin asitleştirilme safhasıdır. Bu kademede yağ asitleri, monosakkaritler, aminoasitler ve bazı aromatikler; propiyonatlara, laktatlara ve etonollere dönüştürülürler. Bu reaksiyonlarda asidofilik anaerob bakteriler görev almaktadır. Gazlaştırma olan üçüncü safhada, tüm organik maddeler metan ve karbondioksite dönüştürülürler [17].

2.9. Anaerobik Arıtım Temelleri

Anaerobik İşlem, temelde 3 ana aşamada gerçekleşmektedir.

- Hidroliz Aşaması
- Asit Oluşum Aşaması
- Metan Oluşum Aşaması

2.9.1. Hidroliz

Karmaşık yapılı organik maddeler, mikroorganizmaların hücre dışı enzimleri ile daha küçük ve daha basit yapılı çözülmüş organik bileşiklere dönüşmektedir. Bu aşamada selüloz, lignin ve hemiselüloz gibi karbonhidratlar glikoz, pentoz ve heksoza;

proteinler, polipeptid ve aminoasitlere; ve yağlar ise alkoller, asitler ve hidrojene dönüşmektedir. Arıtılan atık suyun özelliklerine göre her anaerobik arıtım işleminde hidroliz aşaması olmayabilir. Ancak bazı atıksular için (örneğin; atık biyokütle, kağıt endüstrisi atıksuları, bazı yiyecek ve ilaç endüstrisi atıkları) hidroliz, anaerobik arıtmanın önemli bir parçasıdır [15]. Kimi koşullarda, hidroliz tüm anaerobik arıtma işleminin hızını belirleyebilir [18]. Yağların hidrolizi çok yavaş gerçekleştiğinden, hidroliz aşaması anaerobik işlemlerde biyolojik parçalanma hızını belirleyen aşamadır [16, 19].

2.9.2. Asit oluşumu (Asetojenesis)

Çözünmüş organik maddelerin valerik asit, bütirik asit, propiyonik asit ve asetik asit gibi organik asitlere, ve metanola dönüştürüldüğü aşamadır ve asit üreticiler olarak adlandırılan mikroorganizmalar tarafından gerçekleştirilir. Bu aşamada çözünmüş karbonhidratlar etanol, H_2 ve CO_2 'e, amino asitler, süksinik asit ve H_2 'e, yağ asitleri ise asetat ve H_2 'e dönüşmektedir. Asit oluşumu aşaması geniş bir sıcaklık ve pH aralığında gerçekleşebilir [16, 19, 20].

2.9.3. Metan oluşumu (Metanojenesis)

Metan oluşum aşamasında ise, asit oluşum aşamasında oluşan organik asitler, H_2 ve asetat, metan oluşturan mikroorganizmalar tarafından kullanılmakta ve metan (CH_4), karbondioksit (CO_2), hidrojen sülfür (H_2S), hidrojen (H_2) ve amonyak (NH_3) gazlarının karışımından oluşan ve “Biyogaz” olarak adlandırılan gaz karışımına dönüştürülmektedir. Birçok organik atık için, metan ve karbondioksit asetik asidin anaerobik olarak parçalanmasından oluşmaktadır. Ancak metan, propiyonik asit ve diğer uçucu asitlerin parçalanmasından da oluşabilir [15].

Bu aşamada oluşan metanın % 70'i asetatın dekarboksilasyonu, geriye kalanı ise hidrojen kullanan metan bakterileri tarafından CO_2 'in indirgenme reaksiyonları ile oluştuğu belirtilmektedir [16, 19].

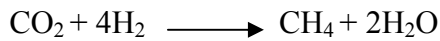
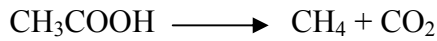
2.10. Anaerobik Arıtım Mikrobiyolojisi

Yüksek moleküllü organik maddeler, anaerobik mikroorganizmalar tarafından karbon kaynağı olarak kullanılabilmesi için daha düşük moleküllü karbon bileşikleri haline getirilirler. Hidroliz olayını mikroorganizmalar, enzimatik etkilerini kullanarak, 25-30 °C sıcaklık altında gerçekleştirirler. Bu aşamada, protein ve yağların hidrolizi anaerobik bakteriler, mayalar ve küfler tarafından sağlanır. Karbonhidratlı maddelerin hidrolizi (nişastanın hidrolizi gibi) ise, Clostridia, Bacillus, küfler ve mayalar tarafından sağlanır. Selülozik maddelerin hidrolizi ise, Clostridia küfler, Tricoderma türü mikroorganizmalar tarafından gerçekleştirilir [17].

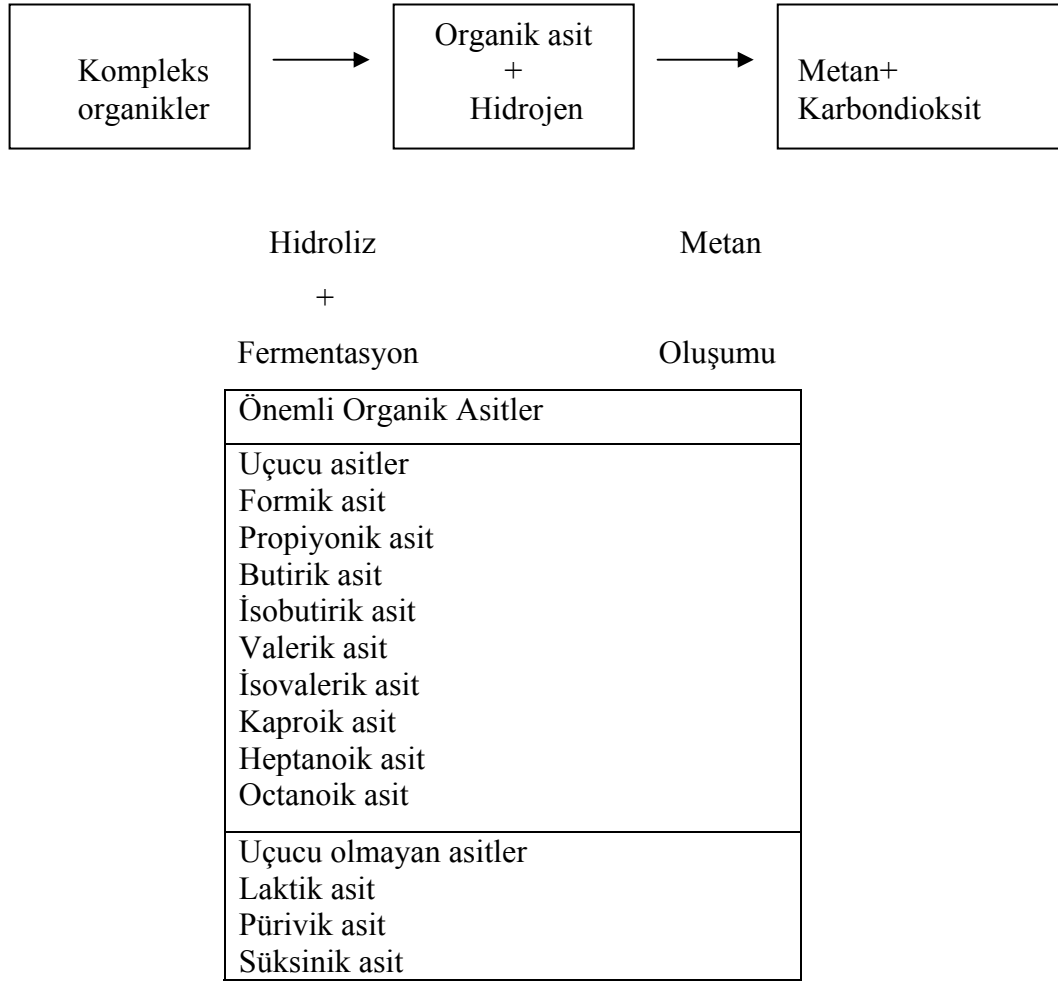
Kompleks organik maddenin metana dönüşmesinde ortaya çıkan mikroorganizmaların bir araya gelişi, organik maddeyi hidroliz eden bakteriler ile başlar. Örneğin karbonhidratlar, proteinler ve yağların basit karbonhidratlara, yağ asitleri ve aminoasitlere dönüşmesi. Basit karbonhidratlar ve asitler daha sonra bakterilerin fermente olmaları ile oluşan gelişim için gereken enerjiyi elde etmek için kullanılır ve sonuçta dominant ürün olarak organik asitler ve hidrojen üretilir. Organik asitler de kısmen fermente eden bakteriler ile okside olur. Hidrojen ve asetik asit metanojenler tarafından kullanılan başlıca alt tabakalardır. Hidrojen (H_2) bir elektron vericisi olarak kullanılır, karbondioksit metan oluşturmak için elektron alıcısı ve asetat (asetik asit) bir fermentasyon reaksiyonu oluşan karboksilden alınan metil grubu ve karbondioksitten metan oluşturmak için ayrılır [21].

Anaerobik kirliliklerin birinci derecede hidrolizlerini asit kullanarak yapmak da mümkündür. Ancak, mikrobiyal hidrolize nazaran daha az zamanda gerçekleşmesi ve maliyetlerinin daha düşük olmasına rağmen, asitlerin biyolojik aktivite üzerine olumsuz etkileri nedeniyle tercih edilmemektedir. Buna rağmen arıtılabilirlik çalışmalarında asitleştirme kademesinin tayininde bu yöntemi kullanmak en gerçekçi yoldur.

Anaerobik ortamda asitleştirmeyi oluşturan bakterilerin bazıları; *Clastridium* SPP, *E.Coli*, *Peptococcus*, *Anaerobus*, *Bifidobacterium* SPP'dir. Asitleştirmeyi sağlayan organizmalarca kullanılan enzimler de; Proteolitik, Lipolitik, Üreolitik, Cellalitik şeklinde sayılabilir. Anaerobik ortamda asitleştirme kademesinden sonra, metan ve karbondioksiti oluşturan bakteriler; *Methanosarcina*, *Methanobacillus*, *Methanococcus* bakterileridir. Metan oluşturan bakterilerin en önemlileri, hidrojen ve asetik asit kullanan bakterilerdir. Bu bakterilerin reaksiyon hızı diğer kademelere nazaran daha yavaştır. Bu nedenle anaerobik parçalanma olaylarını sınırlayan bakterilerin reaksiyon hızı, hidrojen ve asetik asitleri tüketen mikroorganizmaların reaksiyon hızlarının yavaş olması, tüm anaerobik bozunmayı sınırlayan bir mekanizmadır. Çünkü organik maddeler anaerobik koşullarda metan ve karbondioksite dönüştürülemezlerse parçalanma işlemi tamamlanmamış olur. Bu nedenle anaerobik parçalanma hızı, hidrojen ve asetik asit oluşturan mikroorganizmaların reaksiyon hızına bağlıdır. Anaerobik arıtma süreçlerinde metan oluşum reaksiyonlarını aşağıdaki gibi ifade etmek mümkündür [17].



Anaerobik arıtma işleminde kompleks organikleri metana dönüştürme işlemi iki basit adım altında toplanabilir; (1) Kompleks organik maddenin basit organik asitlere ve hidrojene hidrolizi ve fermentasyonu (2) organik asitlerin ve hidrojenin metana çevrilmesi.



Şekil 2.4. Anaerobik atıksu işleminde kompleks organiklerin metana dönüştürülmesinin basitleştirilmiş iki adımlı yöntemi [22]

Anaerobik işlemlerde görev yapan temel bakteriler, dönüştürdükleri maddelere göre gruplandırılmıştır [16, 19]. Bunlar;

- Proteinleri, amino asit ve şekerlere dönüştüren bakteriler: *Clostridium*, *Proteus vulgaris*, *Bacteriodes*, *Peptococcus*, *Bacillus*, *Vibrio*,
- Karbonhidratları basit şekerlere dönüştüren bakteriler: *Clostridium*, *Bacteriodes*, *Staphylococcus*, *Acetovibrio cellulities*,
- Yağları yağ asitleri, amino asitler ve alkollere dönüştüren bakteriler: *Clostridium*, *Staphylococcus*, *Micrococcus*,

- Amino asit ve şekerleri, yağ asitleri, ve alkollere dönüştüren bakteriler: *Zymomonas mobilis*,
- Amino asitleri doğrudan asetata dönüştüren bakteriler: *Lactobacillus*, *Escherichia*, *Staphylococcus*, *Micrococcus*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Desulfovibrio*, *Selenomonas*, *Sarcina*, *Streptococcus*, *Desulfobacter*, *Desulfuromonas*,
- Amino asitleri ara ürünlere dönüştüren bakteriler: *Clostridium*, *Streptococcus*, *Eubacterium*,
- Yağ asitleri ve alkolleri ara ürünlere dönüştüren bakteriler: *Clostridium*, *Syntrophomonas wolfei*,
- Ara ürünleri asetat ve H₂'e dönüştüren bakteriler: *Syntrophomonas wolfei*, *Syntrophobacter wolinii*,
- Asetatı H₂'e dönüştüren bakteriler; *Clostridium aceticum*,
- Asetatı metana dönüştüren bakteriler: *Methanothrix*, *Methanosarcina*, *Methanosprillum* ve
- H₂'i metana dönüştüren bakteriler: *Methanobacterium*, *Methanobrevibacterium*, *Methanoplanus*' tır.

Gruplarda görüldüğü gibi farklı mikroorganizmalar farklı yollarla büyük moleküllerin parçalanmasına yol açmaktadırlar.

Metan Bakterileri

Metan bakterilerinin metabolizmaları için en uygun etkinlik alanı sıcaklık parametresi açısından 20-40 °C'dir. 2-3 °C gibi bir sıcaklık sapması metabolizmalarını olumsuz etkilemektedir.

Metan bakterileri asit oluşturucularla birlikte simbiyoz halinde yaşarlar. Asit oluşturucular ortamın oksijensiz olmasını sağlar ve metan bakterileri için uçucu yağ asitleri, alkol, aldehit vb gibi kendileri için temel olan besin maddelerinin oluşmasını sağlarlar [22].

Asit oluşturucuların salgıladıkları enzimler protein ve amino asitlerin amonyum tuzlarının, diğeri bir deyişle metan bakterilerine azot kaynağının oluşmasını sağlarlar. Buna karşılık metan bakterileri de, asit oluşturuculara toksik etki yapabilecek metabolizmalarının atığını besin maddesi olarak kullanıp gazlaştırarak giderir ve zararsızlaştırmış olurlar.

Metan bakterileri için uygun yaşam koşulları

- Bakteriler için yeterli miktarda tutunma yüzeyinin bulunması gerekir.
- Yeni hücrelerin oluşturulması ve inşası için yeterli miktarda azotun bulunması gerekir.
- Reaktördeki pH değerinin 7,0-7,6 arasında olması gerekmektedir.
- Metan bakterileri için substrat (S) asetik asit cinsinden organik asit olarak derişimi 500-1500 mg/l dolayında olmalıdır.
- Ortamda oksijen kesinlikle bulunmamalıdır.
- Minimum su miktarı %50 olmalıdır.
- Asitleştirme ve metanlaştırma fazının içiçe olması ve pH'nin asitlik basamağına kaymaması gerekir.
- Kükürt > 200 mg/l olmalıdır.
- Çürüme kademesinde elde edilen parçalanma ve metabolizma ürünlerinin derişimi metan bakterileri için yeterli düzeyde olmalıdır [22].

Karbonun yanı sıra azot da mikroorganizmaların en önemli yapı taşları olduğu için; organik maddelerin parçalanması substratta yeterli miktarda alınabilir azotun bulunmasına bağlıdır.

N/P oranı 7:1 olmalıdır. N/C oranı, küçük olursa o zaman N eksikliğinden dolayı mikroorganizmaların gelişmesi engellenir.

N/C oranı büyük olursa karbonlu maddelerin parçalanması, enerji üretimi az olacağından engellenir. Azotun fazla bulunması, amonyak oluşmasına ve ortamın

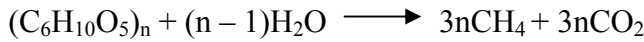
pH'nin artmasına neden olur. Azot en azından 7 mg N/g organik madde olarak bulunmalıdır.

Besin maddesinin fazla bulunması erişilebilecek son bakteri sayısına hızlı bir şekilde ulaşmayı sağlar. Besin maddesi eksikliği ise, bakterilerin gelişmesini engeller [22].

2.11. Anaerobik Arıtım Biyokimyası

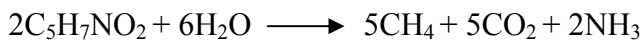
Anaerobik reaktörlerde arıtılan ve çoğunlukla organik kökenli olan maddelerin en önemlileri polisakkaritler, lignin, proteinler, azotlu bileşikler ve lipitlerdir.

Polisakkaritler; selüloz, hemiselüloz ve pektin içerirler. Polisakkaritlerin hidroliz yoluyla monosakkaritlere parçalanması sırasında şekerler enerji kaynağı olarak kullanılır. Polisakkaritlerin hidroliz yoluyla tam anaerobik fermentasyonu,

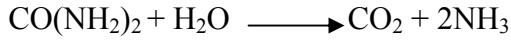


reaksiyonu ile verilir. Bu şekilde üretilen gazların %50 oranında metan içermesi beklenirse de, CO₂'nin çözünürlüğü göz önüne alınırsa CH₄'ün CO₂'ye oranı daha da yüksek olabilir. Genel formülü C_nH_{2n}O_n olan bir karbonhidratın, polimerleri için gaz verimini hesapladığımızda, standart koşullarda giderilen uçucu katı maddenin kilogramı başına 0,75 m³ gaz üretilbileceği görülür [20].

Proteinler yaklaşık 20 kadar doğal aminoasitin polimeridir. Anaerobik fermentasyonda asitleşme ile proteinlerin bünyesindeki azot; amonyağa dönüşürken bu sırada asetat, propiyonat ve bütirat gibi fermentasyon için gerekli asitler oluşur. Aşağıdaki denklemden de görülebileceği gibi anaerobik reaktörlerde proteinler mikroorganizmalarca gazlara ve amonyağa dönüştürülürler. Burada gaz fazındaki metan yüzdesi %50'den daha fazla olabilir [20].



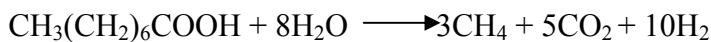
Hayvansal bir organik atık olan üre; $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ formülü ile ifade edilir. Üre anaerob bakteriler tarafından amonyak ve CO_2 'ye parçalanır.



Üre, suda çözündüğü için, anaerobik reaktörlerin çıkış suyunda önemli oranda azot bulunabilir. Azotlu bileşiklerin fermentasyonu sonucunda; formik, asetik, propiyonik ve laktik asit gibi yağ asitleri ile CO_2 ve H_2 gibi gazlar oluşmaktadır.

Yağlar, suda çözünmeyen fakat organik çözücülerde çözünebilen heterojen organik bileşiklerdir. Yağların lanolin ve benzeri türleri anaerobik arıtma süreci ile parçalanamamaktadır. Yağ asitlerinin genel formülleri $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{COOH}$ olup; asitin $-\text{COOH}$ kökünden asetil grupları ardışık olarak koparılarak asetik asit ve H_2 'ye dönüştürülür. Uzun zincirli yağ asitlerinin anaerobik süreçlerle asetata dönüştürülmesi sistemin gaz üretimi ve KOİ giderimi bakımından sınırlayıcı faktördür.

Yağ asitlerinin tam anaerobik ayrışması sonucu yüksek verimli biyogaz üretilebilir. Aşağıdaki denklemde stearik asidin tam anaerobik ayrılması görülmektedir.



Açığa çıkan gazın %72'si metan olup gaz üretim verimi ise $1,42 \text{ m}^3/\text{kgUAKM}$ ' dir.

Anaerobik reaktörlerdeki mikroorganizmalarca kullanılan organik maddeler hücre sentezi için karbon ve enerji kaynağıdır. Anaerobik ayrışma süresi sonucu açığa çıkan CH_4 ve CO_2 çeşitli bakteri gruplarının rol aldığı karmaşık biyokimyasal tepkimeler sonucunda elde edilir. Açığa çıkan ürünler bir üst kademe için besi maddesidir. Sistemin başarılı olması farklı mikroorganizma topluluklarının organize ve işbirliği içinde çalışmalarına bağlıdır. Eğer asit üretimi basamağında gereken hızda asetik asit üretilmemişse bu, metan üretim kademesine hemen yansır.

Böylelikle asetat kullanan metan bakterilerinin CH_4 üretimi yavaşlatılmış olur [20, 22].

2.12. Çevre Koşullarının Anaerobik Süreçlere Etkisi

Her mikrobiyal etkinlik gibi anaerobik dönüşüm işlemi de çevre koşullarına bağlı olarak işler. Özellikle anaerobik dönüşüm işlemi gibi birden fazla farklı mikroorganizma grubunun ortak ve birbirine bağımlı etkinliği sonucu gerçekleşen biyolojik süreçler için çevre koşullarının önemi daha da artmaktadır. Optimal mikrobiyal etkinliğe ulaşabilmesi için optimal çevre koşullarının yaratılması gereği de göz önüne alındığında, yukarıda özetlenen üç aşamalı dönüşüm işlemi gerçekleştiren anaerobik mikroorganizmaları etkileyen başlıca çevresel koşullar ana hatlarıyla aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

2.12.1. pH ve alkalinite

Metan bakterileri için optimum pH aralığı 6,5-8,2'dır. Buna karşılık anaerobik sistemlerde baskın grup olan asit bakterileri 5,5-6,5 pH aralığında yaşamaktadırlar. Bundan dolayı, anaerobik sistemlerde pH her iki grubun yaşayabileceği optimum aralık olan 6,5-7,5 aralığında tutulmaktadır [19].

Anaerobik süreçler için uygun pH aralığı, bu süreçlerde etkili olan mikroorganizmalara göre değişir [21]. pH, mikroorganizmaların yaşaması ve substratın suda çözünürlüğü üzerinde etkilidir. Ancak anaerobik sistemlerde birbirine bağlı, farklı türlerden mikroorganizmaların bulunmasından dolayı sistemi optimum bir pH aralığında tutmak gerekmektedir [19]. Sistemin iki kademeli olması halinde her kademenin uygun pH'da işletilmesi verimi artırır. Metan bakterileri pH'nın düşmesinden daha çok etkilenirler ve metan üretim hızı azalır. Eğer sistemde birçok yükleme olursa pH'nın çok iyi izlenmesi ve kontrolü gereklidir. pH'nın 6,2'nin altına düşmesi metan üretimini büyük ölçüde düşürmektedir [20]. Reaktördeki bikarbonat alkalinite düzeyi 500 mg/L'nin altına düşerse ve üretilen gazın yaklaşık olarak %38'i

CO₂'den oluşuyorsa, sistemin pH'sı 6'nın altına düşer ve metanojenik bakteriler, dolayısıyla tüm sistem, toksik etki altında kalır [20].

Anaerobik sistemlerde, sistemin başlangıç pH'ı alıkonma süresinin beşinci gününe kadar değişmemekte, beşinci günden sonra sistemde oluşan organik asitlerden dolayı hızlı bir düşüş göstermektedir. Fermantasyonun beşinci ile on yedinci günleri arasında pH'da küçük dalgalanmalar görülmektedir. Bunun nedeni, fermantasyonun on yedinci günden sonra organik asitlerin metana dönüşmesiyle pH'ın yükselmesi ve asit oluşumu ile pH'ın düşüşüdür. Sistemde metan üretiminin başlamasıyla, oluşan organik asitler sistemde beklemeden metana dönüşmekte ve pH bundan sonraki aşamada başlangıç pH'ına yaklaşmakta ve küçük dalgalanmalarla belirli pH aralığında sabit kalmaktadır [16].

Arıtma çamurunun kararlı hale getirilmesi için uygulanan anaerobik işlemde, pH ve nem içeriğinin etkilerinin araştırıldığı çalışmada metan üretim veriminin (mL/g_{kurumadde}. d), tüm nem içeriklerinde ve pH 7 de maksimum olduğu rapor edilmektedir [23].

2.12.2. Besin gereksinimi

Bütün biyolojik sistemlerde mikroorganizmaların üreme ve yaşamaları için gerekli temel besin elementleri (C, N, P, K) ve diğer iz elementlerin bulunması gerekmektedir [24].

Anaerobik mikroorganizmaların azot ve fosfor gibi makro nütrientlerin yanında demir, nikel, kobalt gibi mikro nütrientlere de ihtiyaç duyduğu bilinmektedir [21]. Genellikle COD:N:P ya da COD:N besin ihtiyacının belirlenmesinde kullanılır. N:P oranı literatürde 7 olarak verilmiştir [14]. Teorik minimum COD:N oranı 350:7, yüksek yüklü sistemlerde ise 400:7 olarak bulunmuştur. Asetik asiti metan ve karbondioksit'e dönüştüren bakterilerin büyüme için demire ihtiyacı vardır. Kalsiyum, sodyum, potasyum, magnezyumun ise düşük derişimlerde sisteme yararlı olduğu da bilinmektedir [14].

Hayvansal atıklarda, besin maddeleri yeterli derişim ve uygun besin maddesi oranlarında bulunmaktadır. Ancak bazı tarımsal atıklarda (saman, ot, vb.) bu elementlerden bazıları yeterli miktarlarda bulunmamaktadır. Bundan dolayı anaerobik sistemlerde, besin element derişimleri kullanılan hammaddeye göre ayarlanmalıdır [24].

2.12.3. Sıcaklık

Sıcaklık; biyolojik sistemlerde, mikroorganizmaların büyüme hızına, mikroorganizma üretim hızına ve substrat tüketim hızına etkili olduğundan anaerobik sistemlerde en önemli parametrelerden biridir [25].

Çalışmalardan ve verilerden de anlaşılacağı gibi anaerobik sistemlerle çalışılırken, maksimum biyogaz ve metan üretim verimi için sistemdeki mikroorganizmaların yaşaması için gerekli optimum sıcaklığın ayarlanması gerekmektedir [26]. Anaerobik süreçler mezofilik ve termofilik olarak çalıştırılmakta ise de genellikle mezofilik olarak işletilmektedir [18]. Bu optimum sıcaklık aralıkları ise mezofilik mikroorganizmalar için 30-40 °C, termofilik mikroorganizmalar için 55-60 °C'dir [26].

Artan sıcaklıkla beraber anaerobik mikroorganizmaların substrat giderim ve içsel solunum hızları da artar ve bu nedenle termofilik anaerob mikroorganizmaların substrat giderim hızı ve hücre büyüme hızı mezofilik mikroorganizmalara göre daha yüksektir. Ancak net mikroorganizma sentez oranının daha düşük olması nedeniyle termofilik sistemlerin işleme alınması çok daha yavaştır. Ayrıca termofilik sistemler, organik yükteki ve substrat içeriğindeki değişimlere ve çevresel parametrelerdeki değişikliklere karşı çok daha duyarlıdırlar. Sıcaklığın 20 °C'nin altına düşmesi ile anaerobik mikroorganizmalar etkinliklerini önemli ölçüde yitirirler [18]. Ekonomik açıdan, bu sıcaklıkların seçimi atığın organik yükü ve böylece de arıtmada üretilen metanın miktarına bağlıdır. Termofilik sıcaklıklarda (50-60 °C) yüksek hacimsel yüklemeler uygulanabilmesinin yanında (20 kg COD/m³d kadar) daha kararlı ve hijyenik bir son ürün ortaya çıkar. Metan gazı üretimi sıcaklık

arttıkça artar; Henze ve Harremoes'a göre 50-60 °C'de üretilen metan gazı miktarı 35 °C'den % 25 ile % 50 daha fazla olmaktadır [14]. Bunun yanında 54 °C'de uygulanan organik yük miktarının, 38 °C'de işletilen bir sisteme göre 2-4 katı fazla olduğu gözlenmiştir. Ancak reaksiyon hızının termofilik sistemlerde daha fazla olması her zaman bu sistemleri üstün duruma getirmez. Çünkü yüksek sıcaklığı sağlamak için kullanılan ekstra enerji giderlerini dengeleyemez. Bu nedenle termofilik sistemler çoğu zaman ekonomik değildir. Bu sistemlerin kullanılması, 55 °C' nin üstünde bir sıcaklıkla gelen atıksular dışında doğru değildir [27].

Anaerobik işlemlerde sistem sıcaklığı, kullanılacak hammadde ile yapılan deneylerden elde edilecek optimum koşullar göz önünde bulundurularak belirlenmeli, sistem bu koşullara göre oluşturulmalı ve sistemin söz konusu sıcaklığı ısı yalıtımı veya ısıtma ile korunmalıdır [19].

Sıcaklığın ve alıkoyulma süresinin organik maddelerin anaerobik fermentasyonuna etkisinin araştırıldığı çalışmada, uygulanan tüm alıkonma sürelerinde, 40 ve 60 °C sıcaklıklarda biyogaz üretim verimi ve KOİ giderim verimlerinin maksimum olduğu rapor edilmiştir. Ancak 60 °C'de yapılacak çalışmaların ısıtma gereksiniminden dolayı ve 40 °C'den yüksek sıcaklıklarda üretilen biyogazdaki metan içeriğinin azalmasından dolayı, anaerobik işlemin 30-40 °C arasındaki sıcaklıklarda yapılmasının uygun olacağı belirtilmiştir [28].

Sıcaklığın asetatın metana dönüşümüne etkisinin araştırıldığı çalışmada 15-45 °C arasında değişik sıcaklıklarda yapılan deneylerde, alışma (log) fazı sonunda maksimum biyokütle derişiminin (100 mg/L), maksimum asetat dönüşüm hızının (0.08mmol asetat/mg_{kurukütle}.d) ve dönüşen asetat kütlesi başına üretilen maksimum kuru mikroorganizma kütlesinin (1,0-1,1 mg_{biyokütle}/mol_{asetat}), 35 °C'de gerçekleştiği rapor edilmiştir [25].

Kağıt hamuru üretiminden çıkan atıksuyun anaerobik işleminde, sıcaklık değişimlerinin metan üretimine etkileri, birisi termofilik (55 °C), diğeri mezofilik (35 °C) iki adet UFAF reaktörde 488 günlük alıkonma süresinde araştırılmıştır.

Reaktörler; 1,95 kgKOİ/m³.d organik besleme hızında ve sıcaklık değişimlerinin reaktör performansına etkilerinin anlaşılabilmesi için 448. günden sonra, mezofilik reaktörün sıcaklığı 448-458 günler arası oda sıcaklığına (18-24 °C) daha sonra 15 gün 35 °C’de, 476. günden sonra 5 gün 45 °C’de, 5 gün 55 °C’de ve son 12 gün tekrar 35 °C’de, termofilik reaktör ise 448-458 günler arası 45 °C’de, daha sonra 5 gün 35 °C’de, 5 gün 55 °C’de, 476-486 günler arası 65 °C’de, ve son 12 gün tekrar 55 °C’de çalıştırılmıştır. Çalışma sonucunda, reaktörlerde sıcaklık düşüşlerinde biyogaz üretim miktarlarında azalma, düşük KOİ giderimi, çıkışta yüksek AKM ve reaktörlerde UYA birikimi gözlenmiştir. Reaktörlerin sıcaklıkları optimum sıcaklığa getirildiğinde ise mikroorganizmaların birkaç günde tekrar ortama alıştıkları, termofilik mikroorganizmaların sıcaklık değişimlerine, mezofilik mikroorganizmalardan daha çabuk uyum sağladıkları belirtilmiştir.

Biyogaz üretim miktarının ise sıcaklık artış ve azalmalarında azaldığı, sıcaklığın tekrar optimum sıcaklıklara getirilmesi ile maksimuma ulaştığı belirtilmiştir [29].

2.12.4. Zehirlilik

Atıksularda organik ve inorganik zararlı maddelerin belirli derişimlerin üzerinde bulunması mikroorganizmaların etkinliklerinin yavaşlamasına veya durmasına neden olmaktadır. Anaerobik bakteriler birçok zehirli maddeye alışıp dayanabilmekte hatta parçalayabilmektedir. Anaerobik sistemlerde arıtımı mümkün olmayan bazı bileşiklerin belirli bir alıştırma devresinden sonra anaerobik süreçlerde giderilmesi mümkün olabilmektedir [20]. Tüm anaerobik mikroorganizmalar arasında metanojenler zehirliliğe karşı en duyarlı gruptur. Ancak metanojenlerin birçok toksik maddeyi belli düzeylere kadar dayanabildiği ve bu maddelere alışabildiği bilinmektedir. Ayrıca birçok zehirli maddenin, belirli derişimlerin altında, anaerobik olarak arıtılabilir olması, zehirli etkileri de azaltmaktadır. Düşük derişimlerde anaerobik sistemlere olumlu etkileri olan birçok katyon (sodyum, potasyum, kalsiyum, magnezyum, amonyum) yüksek derişimlerde zehirli etkiye sahiptir [18].

Domuz gübresinin anaerobik fermentasyonunda fosfinin inhibisyon etkilerinin araştırıldığı çalışmada, logaritmik derişim-etki korelasyonunda 150 ppm fosfinin biyogaz üretimini % 50 azalttığı, asetat ve yeast extract ile yapılan çalışmalarda ise 1000 ppm'e kadar fosfin derişiminde biyolojik aktivitede düşüş olmadığı belirlenmiş ve gaz fosfinin özellikle hayvan gübrelerindeki maddelerin parçalanmasına yol açan mikroorganizmalar üzerine etkili olduğu belirlenmiştir [30].

Peyniraltı suyunun anaerobik sabit yataklı reaktörde anaerobik arıtımında bakır(II) klorür (CuCl_2), çinko klorür (ZnCl_2) ve nikel klorürün (NiCl_2) toksik etkilerinin araştırıldığı çalışmada 10 mg CuCl_2 /L, 40 mg ZnCl_2 /L ve 60 mg NiCl_2 /L derişimlerde bu metal iyonlarının bulunması durumunda metan üretim veriminin % 50 azaldığı belirlenmiştir. Çalışmada, ayrıca, metal tuzları ile birlikte eşmolar sülfür eklenmesiyle metal katyonlarının metal sülfürler halinde çökmesi sonucu metal katyonlarının toksisitesini engellediği, sülfür iyonlarının ortamda bulunması halinde, 60 mg NiCl_2 /L'ye kadar NiCl_2 derişiminin toksik etki göstermediği belirlenmiştir [31].

Tabakhane atıksularının (1,5 ile 16,5 gKOİ/L) yukarı akışlı anaerobik kontak filtre reaktörde anaerobik arıtımında tanin, sülfür ve krom(III)'ün reaktör performansı, KOİ giderimi ve biyogaz üretim verimine etkileri araştırılmıştır. Çalışma, 36, 48 ve 60 saatlik hidrolik alıkonma sürelerinde yürütülmüş ve çalışma sonunda taninin 914 mg/L ve üzerindeki derişimlerde reaktörde biyokimyasal olayları durdurduğu ve kütlece % 70 ve üzeri tanin derişiminin anaerobik mikrobiyal üremeyi durdurduğu belirlenmiştir. Sülfür ve krom(III)'ün ise sırasıyla 180 mg/L ve 140 mg/L derişimlerinin üzerinde toksik etki yaptığı belirlenmiştir [32].

Çizelge 2.3. Bazı maddelerin anaerobik işlemi durdurucu derişimleri [33]

Madde	Toksisite Derişimleri (mg/L)
NH_4^+ , NH_3	1 500-2 000
H_2S , HS^- , S^{2-}	100-150
Na^+	3 500-6 000
K^+	2 500-5 000
Ca^+	2 500-5 000
CN^-	0,5-1
Alkil benzen sülfonat	500-700
Mg^{2+}	1 000-1 500
Cr^{3+}	150-400
Cr^{6+}	3
Zn^{2+}	1
Ni^{2+}	2
Cu^{2+}	0.5
S^{2-}	200

2.12.5. Kükürt

Birçok sanayi atıksuları yüksek derişimlerde SO_4^{-2} ve SO_3^{-2} içermektedir. Anaerobik koşullarda sülfat, sülfat gideren bakteriler tarafından biyokimyasal tepkimeler sonucunda H_2S 'e dönüşürler. Metan bakterileri ile sülfat bakterileri aynı enerji kaynaklarını (asetik asit ve hidrojen) kullanırlar. Sülfat gideren bakteriler enerjetik olarak daha avantajlı olduklarından, elektron akışını sülfat giderimine çevirerek metan üretiminin düşmesine neden olurlar. Sülfatın en önemli etkilerinden birisi de oluşan H_2S 'in yüksek derişimlerde anaerobik arıtımı inhibe etmesidir [20].

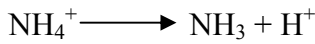
2.12.6. Oksijen

Anaerobik arıtmada sistemin kararlılığının sağlanması için ortamda kesinlikle serbest oksijenin bulunmaması gerekir. Bu nedenle oksijen NO_3 , H_2O_2 , SO_4^{-2} vb. gibi

maddelerde olduğu gibi bağlı olsa bile anaerobik arıtım sistemlerinin verimlerine olumsuz etki yapmaktadır [20].

2.12.7. Amonyak

Protein ve amino asit gibi maddelerin anaerobik ayrışması sonucu NH_4^+ da açığa çıkar. Azotça zengin sanayi atıksularında problem oluşturur. Anaerobik reaksiyonlar sonucu organik maddenin yapısındaki organik azot, amonyağa dönüşmektedir. Amonyak, sistemde ortamın pH' na bağlı olarak NH_4^+ iyonu şeklinde veya iyonlaşmış yapıda bulunabilir.



Bu denge düşük H^+ iyonu derişimlerinde NH_3 lehinde değişmektedir. İyonlaşmamış NH_3 anaerobik mikroorganizmalar için zehirli etkiye sahiptir. Kritik derişim 100-200 mg/l'dir [20].

2.12.8. Uçucu Asitler

Asit üretimi basamağında oluşan uçucu asitlerin derişimlerinin yükselmesi sistemde inhibasyona neden olur. Toplam uçucu asit derişimi (TUA) değeri 1000-1500 mg/l 'yi aşmamalıdır. Güvenli bir işletme için sistemin yüklemesi TUA/Alkalinite oranı 0,1'i geçmemelidir. İyi işleyen bir sistemde uçucu yağ asitlerinin derişimi 500 mg/l'yi aşmamalı ve normalde 250 mg/l'den daha az olmalıdır. Propiyonik asit derişiminin artması asetik asit üreten bakterilerin etkilendiğinin işaretidir [27].

2.12.9. C/N oranı

Biyogaz üretiminde kullanılacak hammaddedeki C/N oranı en önemli faktörlerden biridir. Organik maddede karbon; karbonhidrat şeklinde, azot da; protein, nitrat veya amonyak şeklindedir. Anaerobik bakteriler karbonu enerji kaynağı olarak, azotu ise yeni hücrelerin oluşumunda yapı malzemesi olarak kullanırlar. C/N oranının 30/1

olması istenir. Karbon azota oranla 25-30 kat daha fazla kullanılır. Madde bu orana sahip değilse diğer organik maddelerle karıştırılarak istenen C/N oranı sağlanır. Organik madde azot bakımından zengin ise (C/N oranı 10/1 veya daha az) arıtım sırasında NH_3 oluşur. Bundan dolayı da özellikle yüksek pH' larda toksik etkiye yol açar. Azotun çok az olması halinde ise (C/N oranı 50/1 veya daha yüksek) azot eksikliği ve yetersiz tampon kapasitesi oluşur [34].

2.12.10. Alıkoyulma süresi

Maddenin alıkoyulma süresi, anaerobik sistemlerde uçucu organik maddelerin reaktörde kaldığı süredir. Uçucu madde alıkoyulma süresi ve hidrolik alıkonma süresi olmak üzere iki türlü kullanımı vardır. Uçucu madde alıkoyulma süresi (SRT) sistemdeki mikroorganizmaların uçucu maddeyi dönüştürmek için kullandıkları süredir ve sistemdeki uçucu madde kütlesinin, sistemden çıkan uçucu maddenin kütleli hızına oranıdır. SRT, anaerobik sistemlerde 2-6 gün arasında değişmektedir.

Hidrolik alıkoyulma süresi (HRT) ise reaktör hacminin sisteme verilen maddenin hacimsel hızına oranıdır. Anaerobik sistemlerde geri dönüşüm olmadığında ve genellikle organik maddeler sulu çözeltiye yada sulu karışımlar halinde beslendiğinden SRT, HRT ye eşittir. Hem SRT hem de HRT organik maddelerin yeteri kadar parçalanması ve optimum gaz üretim veriminin sağlanmasına, bu da sıcaklığa bağlıdır. HRT, anaerobik sistemlerde sıcaklığa da bağlı olarak 10-31 gün arasında değişmektedir [24].

Çizelge 2.4. Anaerobik süreçler için optimum çevre koşulları [27]

Parametre	Optimum koşullar
Arıtılan atığın bileşimi	Karbon, temel (N,P) ve iz elementler bakımından dengeli olmalı, O ₂ , NO ₃ , H ₂ O ₂ , SO ₄ gibi oksitleyici maddeler, toksik ve inhibitör elementler içermemeli.
KOI/N/P	300/5/1
pH	6,5-8,2
Sıcaklık	25-40 (35-37) °C~ 50-60 (55) °C
Alkalinite	1000/4000 (2000) mg/l CaCO ₃
TUA	<1000-1500 mg/l Asetik asit
TUA/Alkalinite	<0,1

2.13. Anaerobik Biyoteknolojinin Üstünlükleri

İşletim Kararlılığı

Anaerobik sistemler yeterli miktarda biyokütleyi tutabilecek biçimde ve doğru bir güvenlik katsayısı ile tasarlanıp, işletildiği koşullarda yüksek bir işletim kararlılığına (değişken çevresel koşullar altında istenilen kirletici gideriminin sağlanabilme kapasitesi) sahiptir. Bu kararlılık biyokütlenin granül yada biyofilm biçiminde olduğu reaktörlerde daha da artmaktadır.

Atık Biyokütle Miktarları ve Reaktör Hacimlerinde Azalma

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. Sonuçta atık biyokütle arıtım maliyeti aerobik sistemlere göre %10 düzeyindedir. Buna ek olarak, anaerobik sistemlerin azot ve fosfor gereksinimi de aerobik sistemlere göre düşüktür.

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

Enerji Tasarufu ve Üretimi

Aerobik olarak 1 kg kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) dengi organik maddenin arıtılması için gereken $1,5-6 \text{ kWsaat}$ 'lik oksijen sağlama gideri, anaerobik sistemlerde ortadan kalkmaktadır. Ayrıca, 1 kg KOİ dengi organik maddenin anaerobik arıtımı sonucu yaklaşık $3,6 \text{ kWsaat}$ eşdeğeri metan gazı ortaya çıkmaktadır. Bu gaz, elektrik üretimi, ısıtma, vb. amaçlar için kullanılabilir. Dolayısıyla, organik içeriği yüksek atıkların anaerobik olarak arıtılması sonucu elde edilecek enerji, anaerobik reaktörün ısıtma gereksiniminin yanında, önemli bir ek enerji üretimi de sağlayacaktır.

Atıkgaz Sorunu

Uçucu özellikler sahip birçok organik kirletici (örneğin akrilik asit ve klorlu çözücüler), aerobik arıtım sırasında biyolojik olarak parçalanmadan atık gaza dönüşerek atmosfere karışabilmektedir. Aerobik arıtımın önemli sakıncalarından olan bu sorun, atmosfere kapalı olarak gerçekleştirilen anaerobik arıtmada ortadan kalkmaktadır.

Köpüklenme Sorunu

Aerobik sistemlerde, özellikle çözücü maddeler içeren atıksularda görülen, havalandırma kaynaklı yüksek türbülans ve kabarcıkların yol açtığı köpüklenme sorunu, anaerobik sistemlerde büyük ölçüde azalmaktadır. 2000 mg/l Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı'na (BOİ) sahip bir atıksuyun aerobik olarak arıtımı için sisteme atıksu hacminin 70 katı gaz (hava) vermek gerekirken, aynı atıksuyun anaerobik

olarak arıtımı sonucu atıksu hacminin 1,6 katı gaz (metan + CO₂) oluşmaktadır [15, 35].

Aerobik Olarak Arıtılamayan Kirleticilerin Arıtımı

Aerobik olarak arıtılamayan bazı kirleticiler (klorlu organikler) ve atıksular (kağıt, ilaç, alkol ve bira üretimi kaynaklı atıksular) anaerobik olarak arıtılabilmektedir.

Mevsimsel Arıtım

Anaerobik sistemler, şarap ve şeker üretimi gibi yılda sadece 2-4 ay atıksu üreten işletmeler için çok uygundur. Anaerobik mikroorganizmalar, beslenmedikleri durumda bile canlılıklarını aylarca koruyabilmektedirler.

2.14. Anaerobik Biyoteknolojinin Sakıncaları

Anaerobik arıtma sistemleri için en önemli sakınca optimum işletme için gerekli olan yüksek sıcaklık değeridir. (Termofilik mikroorganizma grubu için 45-70 °C) sistemin ısıtılması için gerekli metan üretiminin yetersiz olduğu seyreltik atıklarda ısıtma önemli, bir problem oluşturmaktadır. Bu durumda daha düşük sıcaklıklarda çalışabilen anaerobik sistemler (mezofilik sistemler 20-40 °C) kullanılır [20].

Düşük sıcaklıktaki ve seyreltik atıksuların arıtımının güçlüğü, işleme alışı uzun zaman gerektirebilmesi, kimi atıksuların yüksek alkalinite gereksinimi, anaerobik arıtım sonucu ortaya çıkan metan gazının bazı atıksular için reaktörü ısıtmaya yetmemesi nedeni ile ek enerji gereksinimi ve çok düşük çıkış BOİ/KOİ düzeylerine ulaşamaması, anaerobik biyoteknolojinin başlıca sakıncalarını oluşturmaktadır [15].

Çizelge 2.5. Anaerobik arıtma sistemlerinin aerobik arıtma sistemlerine göre üstünlük ve sakıncaları [15, 16]

Üstünlükler	Sakıncalar
Düşük atık biyokütle üretimi	Biyokütle büyümesi için uzun süre gereksinimi
Düşük azot ve fosfor gibi besin elementi gereksinimi	Bazı atıksular için; Yoğun alkalinite gereksinimi, yetersiz çıkış kalitesi, yetersiz metan üretimi kaynaklı ısıtma gereksinimi
Düşük reaktör hacmi	Koku problemi
Enerji tasarrufu ve değerli yan ürünler	Düşük sıcaklıkta düşük kinetik hızlar
Atıkgaz arıtımı gereksiniminin ortadan kalkması	Metan bakterilerinin çevresel koşullara hassasiyeti
Düşük köpüklenme problemleri	Isıtma gereksinimi
Aerobik olarak giderilemeyen bazı maddelerin giderimi	
Düşük klorlu organik toksisite düzeyleri	
Mevsimsel arıtım olanağı	
Düşük ekipman gereksinimi	
Yüksek hacimsel yükleme olanakları	
Düşük atık çamur üretimi	

Çizelge 2.6. Biyolojik olarak giderilebilir endüstriyel bir atıksuyun, aerobik ve anaerobik arıtımının işletim özellikleri bazında karşılaştırılması [15]

Anaerobik sistemler aerobik sistemlere göre
5-10 kat daha yüksek hacimsel yükleme hızına sahiptir.
%80-95 daha düşük biyokütle sentezleme hızına sahiptir.
%80-95 daha az besine gereksinim duyar.
Beslenmeden aylarca canlılığını sürdürür.
Havalandırmaya gerek duymaz, bu da anaerobik olarak arıtılan her kg KOİ eşdeğeri organik kirlilik için 0,5-2,0 kWsaat enerji tasarrufuna denk düşer.
Arıtılan her kg KOİ eşdeğeri organik kirlilik için yaklaşık 3,6 kWsaat eşdeğeri metan gazı üretir.

2.15. Anaerobik Çamur Çürütme İşlemi

- Standart Hızlı Çürütücüler
- Yüksek Hızlı Çürütücüler
- İki Basamaklı (Yüksek ve Standart Hızlı) Çürütücüler

Standart hızlı çürütücülerde, çürütücü içeriği ısıtılmaz ve karıştırılmaz. Çürüme işlemi, çamur yoğunlaşma ve çürütücü sıvısının ayrılması işlemleri bir arada gerçekleşir. Reaktör içinde alıkonma zamanı 30-60 gün arasında değişir. Klasik çürütücüler yüzen veya sabit kapaklı geniş tanklardır. Çamur tankın ortasına pompalanır, stabilize çamur tankın tabanından alınır. Çamur karıştırılmadığından köpük, sıvı kısım, aktif ve stabilize haldeki katı maddeler tabakalar halinde ayrılır; gaz üst kısımdan toplanır. Bu tür çürütücülerde çamur stabilize olmasına rağmen, gerekli bekleme zamanı çok uzundur, bu nedenle süreç verimi düşüktür. Bu nedenlerden dolayı standart hızlı çürütücüler ilke olarak küçük tesislerde uygulanır.

Standart hızlı tek kademeli çürütücülerde, taze çamurun en az günde bir kere tanka beslenmesi gerekmektedir. Eğer çamur az miktarlarda ve daha sık aralıklarla verilirse, tankta eş dağılımlı gaz oluşumu gözlenir. Çürümüş çamur ise haftada bir veya daha sık aralıklarla çekilmelidir. Çürük çamur üst sıvısı katı madde içeriği en yüksek düzeylerde olduğu zamanlarda boşaltılmalıdır [9].

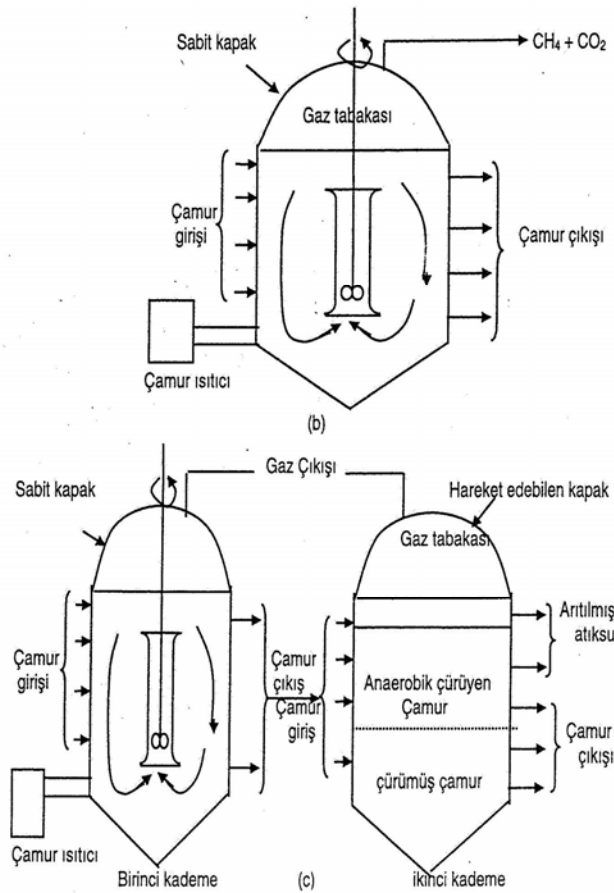
Bu tip çamur çürütme birimlerinde organik yükleme hızı $0,5-1,5 \text{ kg UAKM/m}^3\text{-gün}$ arasında değişmektedir. Bu tip çürütücülerin düşük kapasiteli tesislerde kullanılmasının bir diğer nedeni ise; hacim gereksinimlerinin çok fazla olmasıdır [17].

Yüksek hızlı çürütücülerde ise, çürütücü içeriği ısıtılır ve sürekli olarak karıştırılır. Modern çürütücüler veya yüksek hızlı çürütücüler sıkıştırılmış çürütücü gazının tank içinde sirkülasyonu ile veya mekanik olarak karıştırılır. Karıştırma işlemi geniş bir aktif bozunma bölgesi oluşturur ve stabilizasyon reaksiyonları önemli ölçüde hızlanır. Reaktörde gerekli alıkonma zamanı 15 gün veya daha kısadır.

Bu iki temel sürecin birleştirilmesi, iki kademeli süreç olarak bilinir. Yüksek hızlı iki kademeli çürütücülerde ikinci kademenin temel fonksiyonu, çürümüş katı maddelerin ve gazın çürütücü sıvısından ayrılmasıdır. İkinci tank depolama, çürük çamurun yoğunlaşması ve daha temiz bir çürütücü üst sıvısı oluşumu sağlamak üzere

kullanılır. İkinci kademede katı madde ve gaz ayrımının yanı sıra, ek bozunma ve gaz üretimi de oluşabilir.

İkinci tank üstü açık, ısıtmasız bir tank veya bir çamur lagünü olabilir. Tanklar sabit kapaklı veya yüzer kapaklı olarak yapılabilir.



Şekil 2.5. Anaerobik çamur çürütücüler (a)Standart hızlı çürütücüler
(b) Yüksek hızlı çürütücüler (c) İki kademeli çürütücüler [17]

2.15.1. Gaz oluşumu, toplanması ve kullanımı

Anaerobik çürütücülerde oluşan gaz, hacimsel olarak %65-70 CH₄, %25-30 CO₂ ve küçük miktarlarda N₂, H₂, H₂S, su buharı ve diğer gazlardan oluşmaktadır. Çürütücü gazının özgül ağırlığı havaya göre yaklaşık olarak 0,86'dır. Toplam gaz oluşumu

genellikle uçucu katı madde giderme yüzdesinden tahmin edilir. Tipik değerler 0,75 ile 1,12 m³ gaz/kg giderilen uçucu katı madde olarak verilmektedir.

Gaz oluşumu, çamurun uçucu katı madde içeriğine ve çürütücüdeki biyolojik aktiviteye bağlı olarak geniş bir aralıkta salınır. Özellikle çürütücülerin işletmeye alınma safhasında aşırı gaz oluşur, köpüklenmeye neden olabilir ve çürütücünün yüzer kapaklarının kenarlarından köpük ve gaz kaçakları olabilir. Kararlı işletme koşullarına geçildiğinde bu durum ortadan kalkar, sonuçta iyi çürütülmüş çamur elde edilebilir.

Gaz oluşumu aynı zamanda nüfus esasına göre de tahmin edilebilir. Evsel nitelikli atıksuyun arıtıldığı ön arıtma tesislerinde 15-22 m³/10³ kişi arasında gaz oluşur. İkincil arıtma tesislerinde gaz oluşumu 28 m³/10³ kişi değerine kadar yükselebilir.

Çürütücü gazı, çürütücünün tavanı altında toplanır. Bu amaçla yüzer ve sabit tavanlar kullanılmaktadır. Yüzer tavanlar çürütücünün hemen üst kısmında yer alırlar; çürütücünün içine hava girişini engelleyecek ve çürütücünün hacim değişimlerini karşılayabilecek kapasitede düzenlenirler [9, 17].

Çürütücü gazı ile havanın karışmasına izin verilmemelidir, aksi takdirde patlayıcı bir karışım oluşur. Yüzer kapaklar aynı zamanda küçük miktarlarda gazı basınç altında depolayabilecek bir depo görevi görürler. Yüzer kapaklar tek kademeli çürütücülerde veya iki kademeli çürütücülerin ikinci kademesinde kullanılabilirler.

Sabit kapaklar sıvı yüzeyi ile çürütücünün tavanı arasında belli bir hacmin korunmasını sağlar. Gaz, düşük basınç altında çürütücü dışında bulunan yüzer kapaklı gaz depolarında veya gaz kompresörleri kullanılıyor ise yüksek basınç altında basınçlı kaplarda depolanabilir. Gaz, bacada yakılarak kullanılmamalı; gaz oluşumunu ve kullanılan veya atılan gaz miktarını ölçmek için gazmetreler kullanılmalıdır.

Metan gazının standart sıcaklık ve basınç altında net ısı değeri 35800 kJ/m^3 'dür. Çürütücü gazı yaklaşık olarak %65 oranında metan içerdiğinden, çürütücü gazın ısı değeri bu değerden daha düşüktür. (yaklaşık olarak $22\ 400 \text{ kJ/m}^3$ 'dür.) Büyük tesislerde çürütücü gazı, kazanlar ve içten yanmalı motorlar için yakıt olarak kullanılabilir. Atıksu pompajında, blowerların işletilmesi ve elektrik üretiminde de kullanılmaktadır. Çürütücü gazı hidrojen sülfür, partikül maddeler ve su buharı içerdiğinden kullanılmadan önce yağ veya kuru yöntemlerle temizlenmelidir.

2.15.2. Anaerobik çürütücülerin karıştırılması

Anaerobik çürütücülerin karıştırılması optimum işletme verimi elde etmek için en önemli konulardan biridir [9]. Mikroorganizmalar ve onların alt tabakaları arasındaki kütle aktarımını arttırmak ve su düzeyinde alg tabakası ve aşağı düzeyde tortu oluşumunu engellemek için, yüksek hızlı özümleyiciler karıştırılırlar [21]. En yaygın olarak kullanılan karıştırma sistemleri

1. Gaz Enjeksiyonu
2. Mekanik Karıştırma
3. Pompalama ile Sirkülasyondur.

Gaz enjeksiyon sistemleri, sınırlandırılmış ve sınırlandırılmamış sistemler olarak ikiye ayrılmaktadır. Sınırlandırılmamış gaz sistemleri, gazı çürütücünün üst kısmında toplayacak şekilde tasarlanırlar; gaz sıkıştırılır ve sonradan taban difüzörlerine veya üst tarafa radyal olarak yerleştirilmiş ağızlara gönderilir. Bu sistemlerde açığa çıkan ve yüzeye doğru gönderilen gaz kabarcıkları yardımıyla çürütücü muhtevası karıştırılır. Bu sistemler; sabit, yüzer veya gaz depolamalı tavanları olan çürütücüler için uygundur. Sınırlandırılmış gaz sistemlerinde, gaz, çürütücünün üst kısmında toplanır, sıkıştırılır ve tüpler içine gönderilir. Sınırlandırılmış sistem, gaz yükseltme ve gaz piston tüpleri olmak üzere ikiye ayrılır. Gaz yükseltici sistem batık olarak yerleştirilmiş gaz borularından oluşur. Sıkıştırılmış gaz, borulardan çıkar, gaz kabarcıkları yükselir. Gaz piston sistemde, gaz kabarcıkları bir silindirik tüp veya pistonun tabanından açığa çıkar. Gaz kabarcıkları yükselirken bir piston etki

yaratarak, çamuru yüzeye doğru iter. Bu sistemler de sabit, yüzer veya gaz depolamalı tavanları olan çürütücüler için uygundur.

Mekanik karıştırmalı sistemlerde genellikle düşük hızlı türbünler veya karıştırıcılar kullanılmaktadır. Her iki sistemde de dönen karıştırıcı kanatlar yardımı çamur yer değiştirir, çürütücü içeriği karışır. Düşük hızlı türbin sistemler, genellikle çürütücü tavanına monte edilmiş bir motor ve çürütücünün farklı derinliklerine yerleştirilmiş iki adet türbin karıştırıcıdan oluşmaktadır. Düşük hızlı karıştırıcı sistem ise genellikle çürütücü tavanına monte edilmiş bir adet karıştırıcıdan ibarettir. Mekanik karıştırmalı sistemler sabit ve yüzer kapaklı çürütücülerde kullanılmaktadır.

Pompalama ve sirkülasyon sistemleri, çürütücü tankın iç kısmına veya dışına monte edilen tüpler veya aksiyal akışlı ve santrifüj pompalarla borulama sisteminden oluşmaktadır. Karıştırma işlemi çamur sirkülasyonu ile sağlanmaktadır. Mekanik pompalama sistemleri sabit kapaklı çürütücüler için uygundur.

2.15.3. Anaerobik çürütücülerin ısıtılması

- a) gelen çamur sıcaklığını çürütücü sıcaklığına ulaştırmak
- b) çürütücü duvarları, tavan ve tabanından olacak ısı kayıplarını önlemek
- c) tank ve ısı kaynağı arasındaki borulama sistemindeki ısı kayıplarını önlemek için ısıya gereksinimi vardır [9].

Ayrıca, yüksek hızlı özümleyiciler, gelen atık çamur ısısı içindeki sürtünmelere karşı özümleyici sıcaklığını sabit tutmanın yanı sıra, hidrolizi ve metan oluşumu oranlarını arttırmak için ısıtılırlar. Gereken enerjinin miktarı gelen çamurdaki sıcaklık diferansiyeline, özümleyici yüzeyi boyunca oluşan ısı kayıplarına ve atıksu içindeki ısıнын elde edilme derecesine bağlıdır.

Özümleyici içerikleri üç şekilde ısıtılabilir:

1. Çamur dış ısı trampalarına doğru pompalanır ve özümleyiciye sıcak olarak geri döner. Bu yöntem sıvı sirkülasyonunun karıştırma yapmak için kullanıldığı durumlarda uygundur.
2. Isı trampaları özümleyici içine yerleştirilir.
3. İçeri buhar enjekte edilir. Bu yaklaşım karıştırma için gaz sirkülasyonunun kullanıldığı durumlarda daha iyi sonuç verir [21].

2.15.4. Anaerobik çürütücülerin verimi

Anaerobik atık çamur özümleyicisinin verimi, hedeflenen iki amaca karşı değerlendirilebilir: Çözünebilir katıları yok etmek ve BOİ' yi metana stabilize etmek. Katı parçalanması (yok edilmesi) için normal performans ölçüsü uçucu katı imha yüzdesidir. Değerler büyük farklılık gösterebilir ve bu değerler, giren çamur niteliğine ve alıkonma zamanına bağlıdır [21].

2.16. Anaerobik Süreç Türleri

- Yukarı akışlı anaerobik çamur yatağı reaktörleri
- Karıştırmalı reaktörler
- Anaerobik kontak süreçler
- Akışkanlaştırılmış ve genişletilmiş yataklar
- Asit fazlı biyoreaktörler
- Akışkan yataklı anaerobik reaktörler
- Anaerobik filtreler
- Anaerobik Perdeli (şaşırtmalı) Reaktörler
- Aşağı Akışlı Sabit Yataklı Dolgulu Film Reaktör

2.16.1. Yukarı akışlı anaerobik çamur yatağı reaktörleri

Bu süreçlerde mikroorganizmaların özel bir enzim yardımıyla birbirlerine yapışmaları sonucu oluşan granüller reaktör içerisinde çamur yatağı adı verilen yoğun bir mikroorganizma kümesi oluşturur. Biyokütlenin sistemden kaçmasını önlemek için atıksuyun yukarı akış hızı, granül haldeki mikroorganizma gruplarının çökme hızından büyük olmalıdır [18]. Yukarı akışlı anaerobik çamur yataklı reaktörlerde sulu çözelti reaktöre alttan verilir. Sulu çözelti reaktör içerisinde yukarıya hareket ederken, sulu çözeltideki organik maddeler mikroorganizmalar tarafından parçalanır. Reaktörde oluşan biyogaz ise gaz-sıvı ayırıcılarla ayrılarak, gaz ve arıtılmış atıksu sistemden alınır [36].

2.16.2. 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 [37].

2.16.3. Anaerobik kontak (temas) süreçler

Bu sistem ilk kez 1955 yılında Schroepfer tarafından geliştirilmiş ve tarif edilmiştir. Sistem genellikle sulandırılmış ev atıklarının, 1,300 mg/l COD, işlenmesi içindir [4]. Bakteriyel biyokütle, biyoreaktörde alıkoyularak korunduğu için gaz verimi artar. Termofilik ve mezofilik aralıklarda kullanılabilir. Seyrelmiş veya yoğun atıklarla,

özellikle 1000-2000 mg/L KOİ aralığındaki orta kuvvetli atıklarla, çalışmaya uygundurlar [37]. Bu süreçler mikroorganizmaların askıda olduğu ve aktif çamur sistemindeki gibi biyokütlenin bir çökeltme tankı ile uzaklaştırıldığı bir sistemdir. Bu sürecin etkin denetimi çöktürme havuzunun performansına ve dolayısıyla biyokütle çevrimine bağlıdır [18].

2. 16.4. Akışkanlaştırılmış ve genişletilmiş yataklar

Akışkanlaştırılmış yataklı anaerobik reaktör ilk olarak biyolojik denitrifikasyon ile atıksudan nitrata çıkarmak için geliştirilen kendine özgü bir sistemdir. Ancak bu, aynı zamanda atıksuların metanojenik işlenmesine de oldukça iyi uyum sağlamaktadır [21].

2.16.5. 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 parçalanmış atıkların diğer bir tanktaki metan üreten organizmaların işini kolaylaştırdığı için verimlidir. Kanalizasyon ve şehir sularının işlenmesinde kullanılmışlardır [37].

2.16.6. Akışkan yataklı anaerobik reaktörler

Bu sistemler yukarı akışlı olarak çalıştırılmakta, çıkış suyu yüksek bir hızla geri devredilmekte ve sistemde mikroorganizmaların üzerinde büyüebileceği inert madde (genellikle kum) bulunmaktadır. Sistemdeki giriş suyu hızı dolgu malzemesi ve mikroorganizmaları askıda tutabilecek şekilde ayarlanır [18]. Bu reaktörler farklı özelliklerde atıksuların arıtımında verimli bir biçimde kullanılmaktadır. Son yıllarda reaktör dolgu maddesi olarak daha hafif iyon değiştirici reçineler, kaolin ve sepiolit

gibi fırınlanmış kil ve delikli (gözenekli) poliüretan gibi malzemelerde kullanılmaktadır [30].

2.16.7. Anaerobik filtreler

Bu sistem, biyokatıların tutulması için mükemmel bir yöntemdir ve oldukça geniş bir uygulaması vardır. Yukarı akışlı anaerobik filtreler taş, dayanıklı ahşap, plastik ya da benzeri malzemeden yapılan dolgu malzemesi içerir. Atıksu içerisindeki organik maddeler filtre malzemesi üzerinde sabit bir film biçiminde büyüyen veya malzeme arasındaki boşlukta askıda halde bulunan anaerobik mikroorganizmalar tarafından dönüştürülür. Bu sisteme ait başlıca olumsuzluk biyokatıların, atık katıların ve çöken minerallerin tıkanmalara neden oluşudur. Tıkanan bölümleri açmak için sisteme basınçlı gaz vermek üzere bir birim yerleştirilir [21, 18].

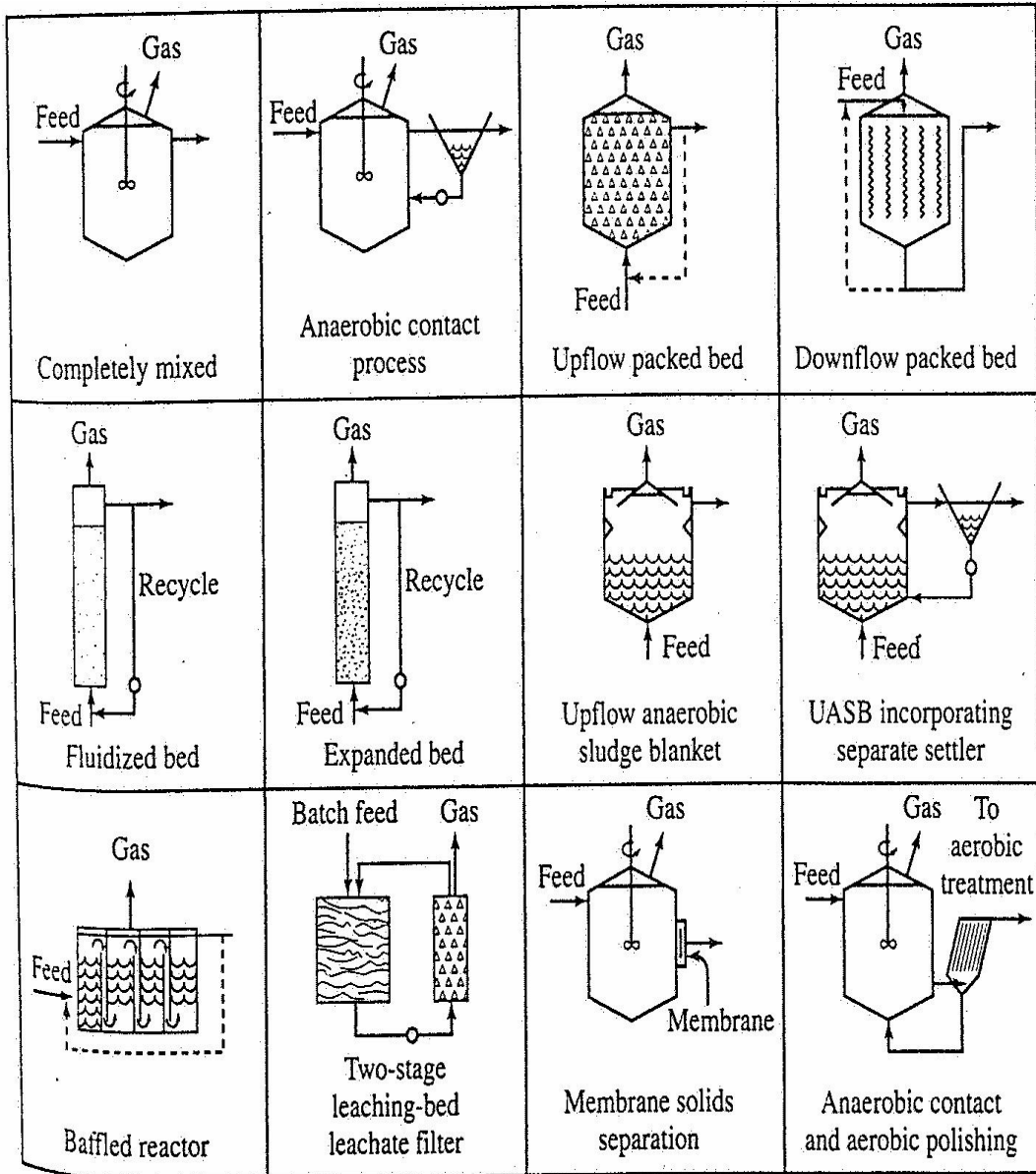
2.16.8. Anaerobik perdeli (şaşırtmalı) reaktörler (ABR)

Anaerobik şaşırtmalı reaktörlerde, reaktör içerisine yerleştirilen perdeler yardımıyla reaktöre verilen atıksuyun sistemde kalma süresi artmakta, böylece yüksek besleme hızlarında çalışma olanağı sağlanarak gerekli reaktör hacmi azaltılmaktadır.

Bu tip reaktörlerde, ayrıca, atıksuyun doğal karışımı da sağlanarak, mekanik karıştırma gereksinimi ortadan kaldırılmaktadır. ABR, özellikle atıksu arıtımında verimli bir biçimde kullanılmaktadır [38].

2.16.9. Aşağı akışlı sabit yataklı dolgulu film reaktör (DSFF)

Bu reaktörlerde de sabit yataklı dolgulu reaktörlerde olduğu gibi reaktöre mikroorganizmaların tutunabileceği çeşitli dolgu malzemeleri yerleştirilmektedir. Ancak bu reaktörlerin sabit yataklı reaktörlerden farkı, DSFF reaktörlerde reaktör boyunca yerleştirilmiş düşey kanallardan oluşan ve sabit olarak yerleştirilen destek malzemeleri kullanılmasıdır. Atıksu reaktöre üstten ve bir dağıtıcı yardımıyla verilmekte arıtılmış su ise reaktörün altından alınmaktadır [39].



Şekil 2.6. Anaerobik süreç türleri [21]

2.17. Biyogaz

Biyogaz çok amaçlı olarak kullanılabilen, temiz bir enerji kaynağıdır. Başlıca hayvan dışkıları olmak üzere özel olarak yetiştirilen bazı bitkilerden, tarımsal atıklardan ve her türlü organik atıktan uygun bakteriler ile anaerobik arıtım sonunda elde edilen ve bileşiminde metan ve karbondioksit bulunan yanıcı bir gaz karışımıdır. Atık içindeki organik madde; metan, karbondioksit, hidrojen sülfür, azot, hidrojen ve amonyaka dönüşür. [11, 40].

2.18. Biyogazın Özellikleri

Biyogaz; organik bazlı atıkların oksijensiz ortamda fermentasyonu sonucu ortaya çıkan renksiz- kokusuz, havadan hafif, parlak mavi bir alevle yanan ve bileşiminde organik maddelerin bileşimine bağlı olarak yaklaşık; %40-70 metan, %30-60 karbondioksit, %0-3 hidrojen sülfür ile çok az miktarda azot ve hidrojen bulunan bir gaz karışımıdır [14]. Yoğunluğu 0,83 g/L, oktan sayısı yaklaşık olarak 110, yanma sıcaklığı 700 °C, alev sıcaklığı 870 °C olan bir gazdır. Biyogazın bileşimi, elde edildiği organik maddenin cinsine ve fermentasyon şekline bağlı olarak değişir [40]. Buna göre, tipik bir biyogazın bileşimi Çizelge 2.7’ deki gibidir [41].

Çizelge 2.7. Biyogazın bileşimi [41]

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 en önemli bileşeni olan metan gazının ısı değeri ortalama 8900 kcal/m³, tür. Bileşimindeki metan oranına bağlı olarak biyogazın ısı değeri ise yaklaşık olarak 4700-5700 kcal/m³ arasında değişmektedir. Biyogaz bileşiminde %50’den daha az metan olması verimli bir yanma için uygun olamamaktadır. Ayrıca, düşük fermentasyon sıcaklığı biyogaz içindeki metan oranının yüksek olmasını sağlar fakat biyogaz çıkış miktarını azaltır. Bunun tersi biyogaz çıkış miktarını artırsa da yanma veriminin düşük olmasına neden olur. Bazı atıkların metan gazı yüzdeleri Çizelge 2.8’de verilmiştir [37].

Çizelge 2.8. Bazı atıkların metan gazı yüzdeleri [37]

Atıklar	Metan gazı miktarı (%)
Çimen	70
Domuz gübresi	67
Sığır gübresi	65
Deniz yosunu	63
Tavuk gübresi	60
Saman	59
Yaprak	58
Su sazi	52
Yemek atığı	50

Üretimi en yaygın olarak, konutlardan ve hayvan üretme çiftliklerinden kaynaklanan organik atıklardan yapılmaktadır. Aslında mikroorganizmalar tarafından parçalanabilen her türlü organik maddeden elde edilebilir. Bu organik hammadde; canlı hayvan atıkları, ekin fazlalıkları veya bitkisel yağ kalıntılarından, konutlardaki organik asit toplama bidonlarına kadar çok değişik kaynaklardan sağlanabilir. Nitekim yakın geçmiş yıllarda Avrupa’da birkaç yüz biyogaz santrali işletmeye alınmış olup, bu santrallerde sanayi ve konut atıkları sindirilmektedir. Fosil yakıt bağımlılığının yol açtığı çevre ve insan sağlığı hasarlarıyla ilgili tartışmalarla birlikte seçenek arayışları da yoğunlaşmaktadır. Bilinen maddeler dışında sindirim yöntemlerindeki ilerlemeler sonucu, ot dahi sindirilebilir hale gelmiş durumdadır. Fakat hammaddesi ne olursa olsun, eldesi aynı ve anaerobik fermentasyon sürecine dayalıdır [11]. Bazı yakıt türlerinin biyogaz ile karşılaştırılması Çizelge 2.9’da verilmiştir [37].

Çizelge 2.9. Bazı yakıt türlerinin biyogaz ile karşılaştırılması [37]

Yakıt Türü	Birimi	Enerji Değeri (MJ)	Yanma Verimi (%)	Kullanılabilir Enerji (MJ)	Biyogaz Eşdeğeri	Enerji
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.	
Bütan	Kg	46	60	27.3	0.43 kg	
Kömür	Kg	29	28	8.1	1.46 kg	

2.19. Biyogazın Kullanım Alanları

Biyogaz genellikle;

- Doğrudan yanma ile
- Alkole dönüştürülerek
- Metan gazına dönüştürülerek kullanılır[40].

Biyogaz, donanımda yapılacak ufak tefek uygulamalarla; Likit Petrol Gazı (LPG), propan veya doğalgazın kullanıldığı tüm işlerde kullanılabilir. Ancak, içerdiği hidrojen sülfür yanma sırasında kükürtdioksit, bu da daha sonra su buharlarının varlığında sülfürik aside dönüşür. Sülfürik asitse korozif özelliği nedeniyle motorları ve kazanları çürütebilir. Dolayısıyla biyogazın her türlü kullanım donanımı, korozyonu önlemek amacıyla fermentörden ayrı bir odaya yerleştirilmelidir. Gücünü biyogazdan alan donanımın sürekli çalışma halinde olması, su yoğunlaşması ve sülfürik asit oluşumunu engelleyecek kadar yüksek sıcaklıkta kalmalarını sağlar. Bu da korozyonu geciktirir. 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, hem doğrudan yanma ile hem de elektrik enerjisine çevrilerek kullanılabilir. Biyogazın doğrudan aydınlatmada kullanımında sıvılaştırılmış petrol gazları ile çalışan lambalardan yararlanılmaktadır.

Biyogaz, benzinle çalışan motorlarda hiçbir katkı maddesine gerek kalmadan doğrudan kullanılabilirdiği gibi içerisindeki metan gazı saflaştırılarak da kullanılabilir [11, 37].

İnsan emeği ile elde edilen biyogazın büyük bir ekonomik değeri vardır. Bu gaz, köylerde yemek pişirmek, aydınlanmak, elektrik enerjisi elde etmek ve makineler

çalıştırmak için ucuz bir enerji kaynağı olup, ülkenin kömür, elektrik ve petrolden büyük çapta tasarruf etmesine ve endüstriyel gelişmesine katkıda bulunur. Ayrıca gübrenin etkinliğini artırır, gübre kaynağını genişletir, tarımsal üretimi artırır ve zararlıların yumurtasını yok etmesi bakımından da çevre sağlığını iyileştirir [15].

2.20. Biyogaz Üretiminde Kullanılan Sistemler

2.20.1. Kesikli (Batch) fermentasyon

Tesisin üretim tankı hayvansal veya bitkisel atıkla doldurulmakta ve alıkoyma süresi kadar bekletilerek biyogazın oluşumu tamamlanmaktadır. Kullanılan organik maddeye ve sistem sıcaklığına bağlı olarak bekleme süresi değişmektedir. Bu süre sonunda tesisin fermentörü (reaktörü) tamamen boşaltılmakta ve yeniden doldurulmaktadır.

2.20.2. Beslemeli- kesikli fermentasyon

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

2.20.3. Sürekli fermentasyon

Bu fermentasyon biçiminde fermentörden gaz çıkışı başladığında günlük olarak besleme yapılır. Sisteme aktarılan karışım kadar gazı alınmış çökelti sistemden dışarıya alınır. Organik madde fermentöre her gün belirli miktarlarda verilmekte, alıkoyma süresi kadar bekletilmekte ve aynı oranlarda fermente olmuş materyal günlük olarak fermentörden alınmaktadır. Böylece günlük beslemelerle sürekli biyogaz üretimi sağlanmaktadır [37].

2.21. Biyogaz Üretiminin Yararı

Hayvansal ve bitkisel organik atık/artık maddeler, çoğunlukla ya doğrudan doğruya yakılmakta veya tarım topraklarına gübre olarak verilmektedir. Bu tür atıkların özellikle yakılarak ısı üretiminde kullanılması daha yaygın olarak görülmektedir. Bu şekilde istenilen özellikte ısı üretilmediği gibi, ısı üretiminden sonra atıkların gübre olarak kullanılması da mümkün olmamaktadır. Biyogaz teknolojisi ise organik kökenli atık/artık maddelerden hem enerji eldesine hem de atıkların toprağa kazandırılmasına imkan vermektedir.

Yaptığımız çalışmada, kesikli sistemde çalıştırdığımız ve 24 saatlik bekleme süresini seçtiğimizden dolayı, anaerobik parçalanma sonucunda oluşan gaz, biyogaz tesislerinde de faaliyete yeni başladıklarında açığa çıkan, CO₂ oranı yüksek, CH₄ oranı düşük olan atık gazdır. Bu çalışmada olduğu gibi, 24 saatlik bekleme süresinde, besin eklenmesi olmadan, çok küçük hacimde reaktör içeriği ile biyogaz elde edilememektedir. Ancak bu çalışma sonunda elde edilen optimum koşullarda ve sürekli sistemde çalışıldığı takdirde biyogaz eldesi mümkün olacaktır.

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

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

Analitik yöntem, sürekli fonksiyonların uç noktalarını içeren matematiksel teoriye dayanır. Bu yöntemde, süreç parametresiyle bağımlı fonksiyonun türevi sıfıra eşitlenir. Çıkan sistemin eşitlikleri çözülür. Çözüm, bağımlı fonksiyonun uç noktalarını gösterir. Bu noktalar; maksimum minimum ve dönüm noktası olabilir.

Sayısal yöntem, doğrusal olmayan programlama tekniklerine dayanır ve bilgisayarla çözülebilecek algoritmaları içerir.

Dinamik programlamada, karmaşık problemler daha basit problemlere indirgenir. Bu yöntem genellikle çok basamaklı süreçler için kullanılır.

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 [42].

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 etkin ve son yıllarda daha çok geliştirilmekte olan deneylerin çok faktörlü optimal planlama 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 modellenmesi 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 [42, 43].

Deneysel tasarım yöntemlerinde, belirlenmesi gereken aşamalar şunlardır;

1. Problem tanımlanır,
2. Faktörler, seviye ve aralık seçilir,
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 arttırmak üzere tasarlanacak olursa;

$$Y = f(X_1, X_2) + \epsilon \quad (2.1)$$

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 RSM (Response Surface Methodology) probleminde bağımsız değişkenler ile bağımlı değişkenler arasındaki ilişki bilinmez. Bunun için öncelikle bağımsız değişkenlerle bağımlı değişken 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 değişkenlerce doğrusal fonksiyonla 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 (doğrusal olmayan) modelle tanımlanır.

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

Burada;

Y : bağımlı değişken,

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

i, j : 1 den değişken sayısına kadar değişir

β_0 : kayma

β_i : doğrusal modelin katsayıları

β_{ij} : karesel modelin katsayıları

Böylece üç değişkenli bir problem için cevap fonksiyonu şöyle olacaktır.

$$Y = f(x) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_1^2 + \beta_5 X_2^2 + \beta_6 X_3^2 + \beta_7 X_1 X_2 + \beta_8 X_1 X_3 + \beta_9 X_2 X_3 \quad (2.5)$$

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 [20].

Doğrusal ve doğrusal olmayan modellerin değişkenlerinin belirlenmesi, optimal plan matrislerinin 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.

Tasarımdaki deney sayısı (N_d) aşağıdaki eşitlikle tanımlanır.

$$N_d = 2^K + 2K + N_0 \quad , K < 5 \quad (2.7)$$

$$N_d = 2^{K-1} + 2K + N_0 \quad , K \geq 5 [40]$$

K : parametre sayısı

N_0 : merkez noktada yapılan deney sayısı

Parametrelerin kodlanmış değerleri (+1), (-1) ve (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 işlenmesini sağlar ve aynı zamanda hesaplamayı kolaylaştırır. Plan matrisleri oluşturulurken önce her bir parametre için değişim aralığı ve merkez değeri belirlenir [43].

Çizelge 2.10. Üç değişken için eksen, etken ve merkez noktaları [34]

Etken Noktaları			Eksen Noktaları			Merkez (Orta) Nokta		
U_1	U_2	U_3	U_1	U_2	U_3	U_1	U_2	U_3
+1	+1	+1	$+\alpha$	0	0	0	0	0
+1	+1	-1	$-\alpha$	0	0			
+1	-1	+1	0	$+\alpha$	0			
+1	-1	-1	0	$-\alpha$	0			
-1	+1	+1	0	0	$+\alpha$			
-1	+1	-1	0	0	$-\alpha$			
-1	-1	+1						
-1	-1	-1						

Plan matrisinin kurulması Çizelge 2.10’ daki ardışıklıkla yapılır. Araştırma bölgesi ve merkez plan seçilir. Koordinat başlangıcı oraya yerleştirilir. Daha sonra her bir faktör için değişim aralığı seçilir. Planın merkezinin ve aralığının seçilmesi ancak deney yapanın deneyiminden ve süreçleri iyi tanımlamasından ileri gelir. Tasarım kuralı üç çeşit kombinasyonu içerir. Bunlar; Eksen Noktaları, Etken Noktaları ve Merkez (Orta) Noktalarıdır. Eksen noktalarında, diğerleri merkez (orta) nokta düzeyinde iken her bir değişkenin uç noktalarını içerir (alt ve üst sınır değerleri). Etken noktaları, merkezden yaklaşık eşit uzaklıktaki düzeyler için yapılan deneylerdir. Deneysel hatayı azaltmak amacıyla merkez (orta) noktalarda deneyler genellikle üç veya beş kez tekrar edilir. Üç faktörlü doğrusal olmayan plan matrisi Çizelge 2.11’ de gösterilmiştir [34].

Çizelge 2.11. Üç faktörlü ikinci dereceden plan matrisi [34]

Deney No	U_1	U_2	U_3	Gözlenen Değer
1	+1	+1	+1	Y_1
2	+1	+1	-1	Y_2
3	+1	-1	+1	Y_3
4	+1	-1	-1	Y_4
5	-1	+1	+1	Y_5
6	-1	+1	-1	Y_6
7	-1	-1	+1	Y_7
8	-1	-1	-1	Y_8
9	$+\alpha$	0	0	Y_9
10	$-\alpha$	0	0	Y_{10}
11	0	$+\alpha$	0	Y_{11}
12	0	$-\alpha$	0	Y_{12}
13	0	0	$+\alpha$	Y_{13}
14	0	0	$-\alpha$	Y_{14}
15	0	0	0	Y_{15}
16	0	0	0	Y_{16}
17	0	0	0	Y_{17}
18	0	0	0	Y_{18}
19	0	0	0	Y_{19}
20	0	0	0	Y_{20}

İkinci derece eksen üzerinde değişebilir tasarımda α değeri Eş. 2.8 ile tanımlanmaktadır.

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

Farklı sayıdaki değişkenler için no ve α 'nın değerleri Çizelge 2.12' de verilmektedir.

Çizelge 2.12. Farklı sayıdaki değişkenler için no ve α değerleri [34]

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	333	2.83
no	5	6	6	10	6	15	9	21	14

Model katsayılarını (β_i , β_{ii} , β_{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 ile hesaplanan fonksiyon değerleri arasındaki farkın minimum olması gerekir (Eş. 2.10).

$$L = \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2 = \min \quad (2.10)$$

Gerçekleştirilen tasarım yönteminde kullanılan model, ANOVA (Analysis of Variance) testi ile istatistiksel olarak değerlendirilir. Bu test, sistem için önerilen model ve hatanın serbestlik derecesi, karelerin toplamı ve karelerin oranını içerir. Çizelge 2.13' de ANOVA testinde kullanılan değerler verilmiştir [20, 34, 43].

Çizelge 2.13. ANOVA testinde kullanılan değerler [20]

Kaynak	Serbestlik derecesi (df)	Karelerin toplamı (KT)	Karelerin 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 karelerinin toplamı
 MKT : Model karelerinin toplamı
 THKT : Toplam hata karelerinin toplamı
 MKO : Model karelerinin oranı
 HKO : Hata karelerinin oranı

$$\text{Regresyon katsayısı; } R^2 = (MKT) / (THKT) \quad (2.11)$$

olarak ifade edilir. R^2 değerinin büyük olması (1'e yakın), modelin sistemi iyi ifade ettiğini gösterir [43].

3. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Endüstriyel ölçekte kompleks mandıra atıksularının arıtımında anaerobik filtre reaktörünün performansı incelenmiştir. Süt ürünleri üreten fabrika atıksularına göre, süt kalite kontrol laboratuvarı atıksularının içerdikleri sodyum azide ve klorompenikal gibi kimyasallar nedeniyle arıtımı daha zor olan atıksular olduğu belirlenmiştir. Bu atıksuların arıtımı 28 m³'lük ardışık kesikli reaktör ve 12 m³'lük anaerobik filtre bulunan bir tesiste yapılmıştır. 2 yıldan uzun işletme süresinin sonunda, atıksuyun arıtımı başarılı bir şekilde ve anaerobik filtreden önce yağ giderimine gerek olmadan yapılmıştır. %90 'dan fazla KOİ giderimi ile, anaerobik filtreye yapılan organik yükleme hızı 5–6 kg KOİ/Lgün'dür. Sistemden biyokütle kaçıışı görülmemiştir ve yağ içeren atıksular başarılı şekilde ayrılmıştır. Ortamın tamponlama kapasitesi için alkalinite eklenmesi (pH kontrolü için) çok önemlidir. Anaerobik filtreden çıkan atıksular SBR'de arıtılarak, çıkış değeri KOİ için 200 mg/L'nin altına, toplam azot değeri ise 10 mg/L'nin altına indirilmiştir [44].

Anaerobik asidifikasyon reaktörünün işletilmesi ölçütleri, laboratuvar ölçeğinde iki fazlı anaerobik çürüme sistemleri kullanılan mandıra atıksularının arıtımında incelenmiştir. 9 aylık işletim sürecinde, 5 kg KOİ/m³gün ve 2 gün hidrolik bekleme sürelerinde %90 KOİ ve %95 BOİ giderimi sağlanmıştır. Asidojenik tank 0,5 gün bekleme süresi ile 23 kg KOİ/m³ gün yükle çalıştırılmıştır. Ön asitleştirme tankında, 12 kg KOİ/m³ gün yükle KOİ'nin %60'ı uçucu organik asitlere çevrilmiştir. Asit ve metan fazlarının iyi olarak ayrıştırılması üretilen metan miktarının artmasını sağlamıştır [45].

pH 5,5 ve 37 °C'de mandıra atıksularının (30-82 g KOİ/L) asidifikasyona etkisi kesikli ve sürekli sistem deneylerine göre incelenmiştir. Kesikli deneylerde, protein ve yağlara göre karbonhidratların daha kolay asidifiye olduğu görülmüştür. Karbonhidratların asidifiye olmasıyla hidrojen ve uçucu yağ asitleri (VFA) (temel olarak asetat, propiyonat, bütrat) oluşurken, proteinlerin asidifiye olmasıyla yüksek moleküler ağırlığa sahip VFA'lar üretilmiştir. Kuvvetli atıksuların arıtılmasında, sistemin çalışmasının sonundan önce pik değerlere ulaşıldıktan sonra H₂'nin kısmi

basıncı, asetat ve bütirat azalmıştır. Sürekli işletilen 12 saat hidrolik bekleme süresine sahip sistemde, artan KOİ değerleriyle verimin 2 g KOİ/L için %57,8'den 30 g KOİ/L için %28,8'e düştüğü gözlenmiştir. Mandıra atıksularındaki bileşenlerden karbonhidratların %82-99'u, proteinlerin %59-85'i ve yağların %12-42'sinin asidifiye olduğu ve biyokütle miktarının ise 0,228 g VSS/g KOİ olduğu saptanmıştır. Kesikli sistemde, sistem; 2-4-8-12-20 ve 30 g KOİ/L değerlerinde ve 37 °C'de çalıştırılmıştır. Biyogaz içindeki H₂, CH₄, CO₂, N₂ gaz kromatograf ile ölçülmüştür. Sistemdeki karbonhidrat ve protein derişimini düzenli aralıklarla ölçölüp izlenirken, yağlar sadece son aşamada izlenmiştir. Orta kuvvetli atıksuların arıtımında karbonhidratların 2 gün içinde hızla azalıp tükendiğı gözlenmiştir. Proteinler daha yavaş ayrıışmışlar, ilk 2 gün hemen hemen hiç değışmemişlerdir. Bunu da ortamda karbonhidratların bulunmasına bağlamışlardır. Alkollerin üretiminin VFA'ların üretiminden daha yavaş olduğu, H₂'nin kısmi basıncının başlangıçta 0,17 atm iken, karbonhidratlar bitince 0,55 atm'e ulaştığı gözlenmiştir. Kuvvetli atıksuların arıtımında ise, orta kuvvetteki atıksuların tersine, asetat ve bütirat oluşumu pik yaptıktan sonra 4 gün boyunca azaldığı ve bu dönemde de protein ayrışmasının başladığı belirlenmiştir. Sonuç olarak kesikli sistemlerde karbonhidratlar bitmeden proteinlerin ayrışması ve bu ayrışmayla oluşacak ürünlerin gözükmediğı saptanmıştır. Sürekli sistemlerde de gelen KOİ yükünün artmasıyla verimin düştüğü gözlenmiştir [46].

Yukarı akışlı anaerobik çamur yatağı reaktörleri (UASB) ile mandıra atıksularının arıtımı incelenmiştir. 40-60 g KOİ/Lgün değerleriyle, peynir altı suları (PAS) yüksek organik madde içerirler. Bu atıksular 1-5 g/L gibi düşük askıda katı madde ve yüksek ayrılabilirlikte karbonhidratlara sahiptirler. Yüksek organik içerikten dolayı, anaerobik çürütme gerekli olan bir arıtma sistemidir. Bu çalışmanın amacı, mandıra atıksuları arıtımında UASB reaktörü ile çalışmaktır. 10 L hacminde bir UASB reaktörü glikoz eklenen çürütücülerle ve mandıra atıksuları ile doldurulmuştur. Çözünmüş KOİ, pH, biyogaz üretimi ve bileşenleri izlenerek çürütücünün, atıksuyu farklı organik yükleme hızlarında çalıştırma verimi ve performansı incelenmiştir. Çalıştırma yükü 6,2 g KOİ/Lgün olarak bulunmuş ve 7,5 g KOİ/Lgün'e kadar

arttırılabilmektedir. 42 g KOİ/Lgün'den büyük değerler için UASB'nin çalışma verimi konusunda soru işaretleri oluşmaktadır [47].

Mandıra atıksularının arıtımında floklu çamurların mezofilik UASB'nin çalışmasında, döngü (işletim) süresinin etkisi araştırılmıştır. 24 – 144 saat arasında bulunan (24-48-72-96-144) 5 işletim uzunluğunda, 2,5 – 29 g KOİ/Lgün yüklerde substratın metana çevriminde besleme olmayan dönem ile besleme olan dönemdeki önemi gösterilmektedir. Uzun süreli çalışmalarda daha yüksek yükler uygulanmıştır. En yüksek KOİ giderimi ile metan üretimi 96 saat işletimde (48 saat beslemeli + 48 saat beslemesiz) elde edilmiştir. Bu zaman optimum olarak belirlenmiştir. Literatürde 3 – 6 g KOİ/Lgün olarak verilen değerlerden daha büyük bir değer olan 22 g KOİ/Lgün sonuçlarına ulaşılmıştır. 96 saatte KOİ'nin metana çevrimi %59'dan %85'e yükselmiştir. Bu da beslemenin olmadığı süreçteki metan üretiminden kaynaklanmıştır [48].

Tek ve çoklu beslemeli yukarı akışlı anaerobik filtrede peynir atıksuyunun arıtımı 20 g KOİ/Lgün'den büyük organik yükleme hızlarında işletilerek yapılmıştır. Biyoreaktörlerdeki, farklı yüksekliklerdeki çamurun hidroliz, asidojenik ve metanojenik aktiviteleri ölçülmüştür. Çoklu beslemeli sistemde biyokütle miktarı az iken; tek beslemeli sistemde homojen olarak tüm sistemde dağılmışlardır. Farklı grupların etkinliklerinin çoklu beslemeli sistemlerde daha fazla olduğu, çoklu beslemeli sistemdeki metanojenik kapasitenin tek beslemeliye göre daha yüksek ve bu yüksek organik yükleme hızlarında daha esnek çalıştırılmayı sağladığı belirlenmiştir. Tek beslemeli sistemde floklar oluşurken, çoklu sistemde granülleşme görülmüştür. Bununla birlikte oluşan gaz çoklu beslemeli sistemde daha kolay ortaya çıkmış ve toplanmıştır. Böylece reaktör de ölü bölgeler oluşumu, tıkanıklık gibi verimliliği etkileyen faktörlerden etkilenmemiştir [49].

Anaerobik sürekli karıştırılan tanklarda biyofilm sistemlerinin mandıra atıksularından enerji kazanımının etkileri incelenmiştir. Bu çalışmada metan üretimi ve atıksu arıtımı hızını oldukça arttıracak kolay ve ucuz biyofilm destek sistemi bulunmaya çalışılmıştır. Klasik delikli malzemeden tam karışimli tank reaktörüne

eklenerek, oluşan metanın %20'den fazla olması sağlanmıştır. Bu yolla mandıra atıksularının arıtımında tam karışımli anaerobik çürütücünün performansı, biyofilm destek sistemi ile arttırılabildiği belirlenmiştir. Bu sistemler ucuz ve kolay sağlanabilirler ve kolayca da uygulanabilirler [50].

İki fazlı anaerobik çürütme sistemlerinde bakteriyal topluluğun oluşumundaki değişimler incelenmiştir. 34 hafta süreyle incelenen mikrobiyal populasyonun değişim sürecinde, auto florasanlı metanojenler ve metanojenik olmayan bakterilerin sayısı başlangıçta hemen azalmış, fakat çalışmanın sonuna kadar sayılarında bir değişim görülmemiştir[51].

Jet döngü membran biyoreaktörünün PAS arıtım kapasitesi incelenmiştir. Karbonlu, azotlu ve fosforlu bileşiklerden oluşan PAS'ın yer aldığı sistem; 3,5-33,5 kg KOİ/m³gün KOİ yüklerinde, 1,1-2,8 gün çamur yaşında 3 ay çalıştırılmıştır. 22,2 kg KOİ/m³gün KOİ yükü ve 1,6 gün çamur yaşında %97 arıtım verimine ulaşılmıştır [52].

Evsel atıksuyun (3 000 mgKOİ/L), 21,5 L'lik UASB reaktörde, 11 kgKOİ/m³.d organik besleme hızı ve 4,7 saat HRT'de 178 gün süreyle anaerobik işlemi araştırılmıştır. Reaktör, 178 günlük fermentasyon süresince, 57 gün 25 °C'de, 36 gün 22 °C'de, 31 gün 19 °C'de, 29 gün 16°C'de ve son 25 gün 13 °C'de çalıştırılmıştır. Çalışma sonucunda sıcaklığın düşürülmesi ile KOİ gideriminin % 70'den % 64'e, biyogazın metan içeriğinin ise % 60'dan % 35'e düştüğü bulunmuştur. Üretilen metanın, giderilen KOİ' ye oranı ise 25 °C' de 0,26 LCH₄/gKOİ iken 13 °C' de 0,16 L CH₄/gKOİ'ye düşmüştür. Çalışmada, evsel atıksuyun düşük sıcaklıklarda anaerobik arıtımının biyogaz üretim verimi açısından verimli olmadığı belirtilmiştir [53].

Peynir üretim tesisi, tavuk üretim çiftliği ve zeytin yağı üretim tesislerinden çıkan atıksular 50 L'lik serum şişelerinde, 35 °C'de ve 14 gün SRT' de sırasıyla 70, 70 ve 45 gün süreyle kesikli anaerobik arıtımı ve biyokimyasal metan potansiyeli araştırılmıştır. Çalışma sonucunda peynir üretim tesisi atık suyundan 23,4

$LCH_4/L_{atıksu}$, tavuk üretim çiftliği atık suyundan 33,5 $LCH_4/L_{atıksu}$ ve zeytin yağı üretim tesisi atık suyunun metan üretim veriminin 57,5 $LCH_4/L_{atıksu}$ olduğu saptanmıştır. Çalışmada ayrıca atıksulardan üretilen biyogazın metan içerikleri de sırasıyla % 77, % 78 ve % 77 olarak belirlenmiş ve Türkiye’de tarımsal endüstrilerin atıksularının anaerobik işlem ile üretilecek metandan önemli ölçüde enerji sağlanabileceği belirtilmiştir [54].

İnek gübresine, % 20-50 arasındaki oranlarda meyve-sebze atıkları ile tavuk gübresi karıştırılarak, anaerobik işlem ile metan üretim hızı, uçucu madde giderimi ve metan üretim verimleri incelenerek en uygun karışımın belirlenmesi araştırılmıştır. Deneyler 18 L’lik CSTR reaktörde, 21 günlük alıkoyulma süresinde ve 35 °C’de yapılmıştır. Çalışmalar her karışım için 3,19-5,01 $kgUKM/m^3.d$ arasında değişen organik yükleme hızlarında yürütülmüştür. Çalışmada; inek gübresine meyve-sebze atıklarının karıştırılmasının, metan üretiminde tavuk gübresi karıştırılmasından daha verimli olduğu, inek gübresine eklenen meyve-sebze atıklarının oranının artırılması ile metan üretim veriminin 0,23 $m^3CH_4/kgUKM_{eklenen}$ ’den 0,45 $m^3CH_4/kgUKM_{eklenen}$ ’e yükseldiği belirtilmiştir. İnek gübresine tavuk gübresinin karıştırılması ile reaktördeki serbest amonyak derişiminin artmasıyla bakteriyel faaliyetin durduğu, metan üretim verimi ve uçucu madde giderim veriminin düştüğü belirlenmiştir [55].

Ghally tarafından 1996 yılında yapılan çalışmada, iki kademe, iki faz bir reaktör sistemi kullanılmıştır. Sisteme sıcaklık (25 ve 35 °C) ve hidrolik alıkoyulma süresi (10, 15 ve 20 gün) parametrelerinin ve metan oluşumu safhasında pH denetiminin etkileri incelenmiştir. pH denetimi yapılmadığı koşullarda metan üretiminin düştüğü, sıcaklık arttıkça ve hidrolik alıkoyulma süresi azaldıkça biyogaz üretiminin arttığı, sıcaklık ve hidrolik alıkoyulma süresi arttıkça KOI’deki azalmanın arttığı gözlenmiştir. Ghally’nin yaptığı çalışmada kullandığı PAS’ın atık bileşimi Çizelge 3.1’de verilmiştir [56].

Çizelge 3.1. Peyniraltı suyunun atık özellikleri [56]

Ölçülen Özellikler	Ölçülen Değer
Toplam katılar (mg/L)	65 930
Uçucu katılar (mg/L)	47 280
Uçucu katılar (%)	71,7
Sabit katılar (mg/L)	18 650
Sabit katılar (%)	28,3
Toplam KOİ (mg/L)	72 220
Çözünebilen KOİ (mg/L)	69 640
Çözünebilen KOİ (%)	96,4
Toplam Kjeldahl azotu (mg/L)	11 450
Amonyak azotu (mg/L)	260
Amonyak azotu (%)	17,9
pH	4,5

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Deneylerde Kullanılan Peyniraltı Suyu ve Özümleyici Çamurunun Bileşimi ve Özellikleri

Çalışmada kullanılan hammadde, peyniraltı suyu ve atıksu arıtma tesisi çamurudur. Peyniraltı suyu, Atatürk Orman Çiftliği Süt Fabrikası'ndan alınmıştır. Alınan PAS örneği, örnek şişesinin üstünde hiç boşluk kalmayacak şekilde doldurulmuş ve vakit kaybedilmeden laboratuvara ulaştırılıp, deneylerin başlatılması için gerekli koşullar hazırlanana kadar geçen sürede bozulmaması için buzdolabında 4 °C'de korunmuştur.

Özümleyici çamuru ise, Ankara Merkezi Atıksu Arıtma Tesisi'nde bulunan her biri 11 250 m³ hacminde, çapı 25 m, yüksekliği 35 m olan ortalama %3' lük katı madde oranına sahip çamurun bulunduğu özümleyicilerden alınmıştır. Ham çamur yoğunlaştırma tanklarından alınan yoğunlaşmış çamur; pompa yardımı ile ısı değiştiriciden geçirilerek ısıtılır ve burada özümleyici içinden çekilen özümleyici çamuru ile karıştırılarak özümleme tanklarına pompalanır. Çalışmamızda aşı çamuru olarak kullandığımız hammadde tam olarak, eşanjör çıkışı-özümleyici girişi olan bu noktadan alınmıştır. Alınan özümleyici çamuru örneği, ortalama 35 °C sıcaklıktadır ve bu sıcaklık değeri, çamur içindeki mikroorganizmaların etkinliklerini sürdürebilmeleri için gerekli olan sıcaklıktır. Arıtma tesisinin şehir merkezine 45 km uzaklıkta olması, ve alınan örneğin deneyleri yapacağımız laboratuvara gelene kadar geçecek sürede etkinliklerini yitirme olasılığından dolayı; bu riski ortadan kaldırmak için, özümleyici çamuru 2 litrelik termos içine alınmış, termosun ağzı sıkıca kapatılmış, bu koşullar altında laboratuvara ulaştırılmıştır. Deneyleri başlatmak için gerekli koşullar hazırlanana kadar geçen sürede ise yine 35 °C'ye ayarlanmış etüv içinde bekletilmiştir.

Örneklerin özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan deneysel çalışmalar ve sonuçları Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Peyniraltı suyu ve özümleyici çamurunun özellikleri

Ölçülen parametreler	Peynir altı suyu	Özümleyici Çamuru
Katı madde içeriği, %		2,42
Organik madde içeriği, %		54,4
Toplam organik karbon içeriği, %		23,60
KOİ, mg O ₂ /L katı	59 600	5603,137
Kalsiyum karbonat miktarı, mg/L		3910
Asetik asit miktarı, mg/g katı		423,2
pH	6,18	7,33

Deneylerde Kullanılan Aletler

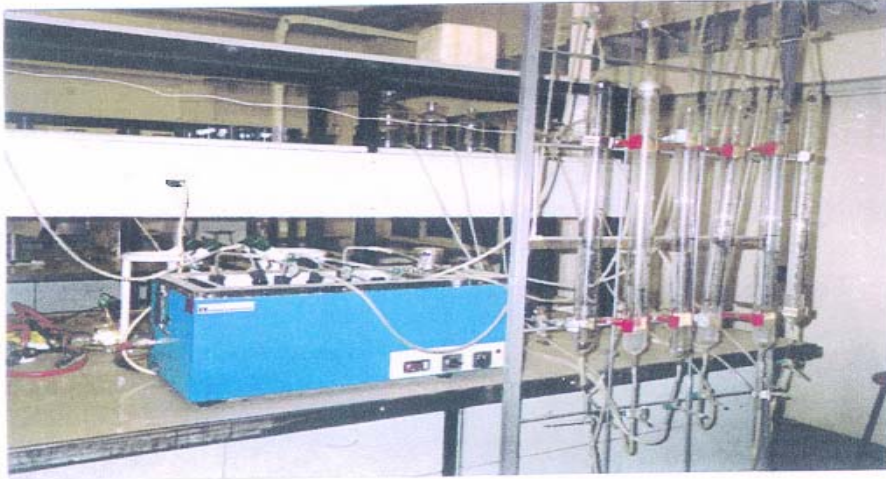
- Sıcaklık denetimi ve karıştırma; çalkalamalı su banyoları
- pH ölçümü; pH metre (Hanna Instruments markalı pH HI 8314 model)
- Gaz analizi; (Autofim markalı, Gas monitoring flame ionization monitor type 47720, Telegan)
- KOİ ölçümü; Nanocolor R-2T marka ısıtıcı, Nanocolor COD(KOİ) tüpü ve spektrofotometre

Çalışmada PAS'ın başlangıç KOİ'si (68 417 mg/L), literatürdeki diğer çalışmalarda da görüldüğü gibi, belli bir seyreltmeden sonra, kirlilik eşdeğeri biraz düşürülerek deneylere başlanmıştır. Yapılan seyreltme ile başlangıç KOİ'si 60 000 mg/L'de sabitlenmeye çalışılmıştır.

4.2. Deney Düzenegi

4.2.1. Reaktör

Deneylerde reaktör olarak 250 ml hacimli 20 adet erlen kullanılarak kesikli sistemde çalışılmıştır (Resim 4.1).



Resim 4.1. Deney düzenegi

Işık uzun dönemde yosun oluşumuna neden olmakta; oluşan yosunlar da fotosentez yaparak, O_2 üremesine ve buna bağlı olarak da anaerobik sistemlerin olumsuz etkilenmesine neden olmaktadır. Bu nedenle erlenlerin dış yüzeyi siyah cam boyasıyla boyanmış ve boyanan erlenler 3 saat $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki etüvde tutularak boyanın daha dayanıklı olması sağlanmıştır.

Her bir reaktöre toplam 100 mL hacminde hammadde koyulmuştur. Ancak tüm reaktörlerin hammadde bileşimleri oranı aynı değildir, çünkü; özümleyici çamuru hacmi çalışmamızda bağımsız değişken olarak seçilmiştir. Bu nedenle de reaktörlerde bulunma hacmi farklıdır. Peyniraltı suyu ve özümleyici çamuru örnekleri reaktörlere yerleştirilirken, her bir reaktöre yerleştirme işleminden önce, her iki hammaddenin de bulundukları örnek kapları, kap içindeki çökmeyi önlemek amacıyla iyice çalkalanmıştır. Aynı zamanda reaktör içindeki eş dağılımı sağlamak için de;

hammadeler reaktörlere koyulup, reaktörler iyice çalkalandıktan sonra deneyler başlatılmıştır.

Anaerobik koşulların sağlanması için, peynir altı suyu ve arıtma çamuru erlenlere yerleştirildikten sonra erlenlerin ağzı, sisteme hava girişini ve sistemde oluşan gazın dışarı çıkışını engellemek için kauçuk mantarlarla sıkıca kapatılmıştır. Çünkü sisteme girecek olan oksijen, anaerobik koşullarda çalışıldığı için zehirlilik etkisi yaratarak metan bakterilerinin ölmelerine neden olacaktır.

4.2.2. Bağlantı elemanları

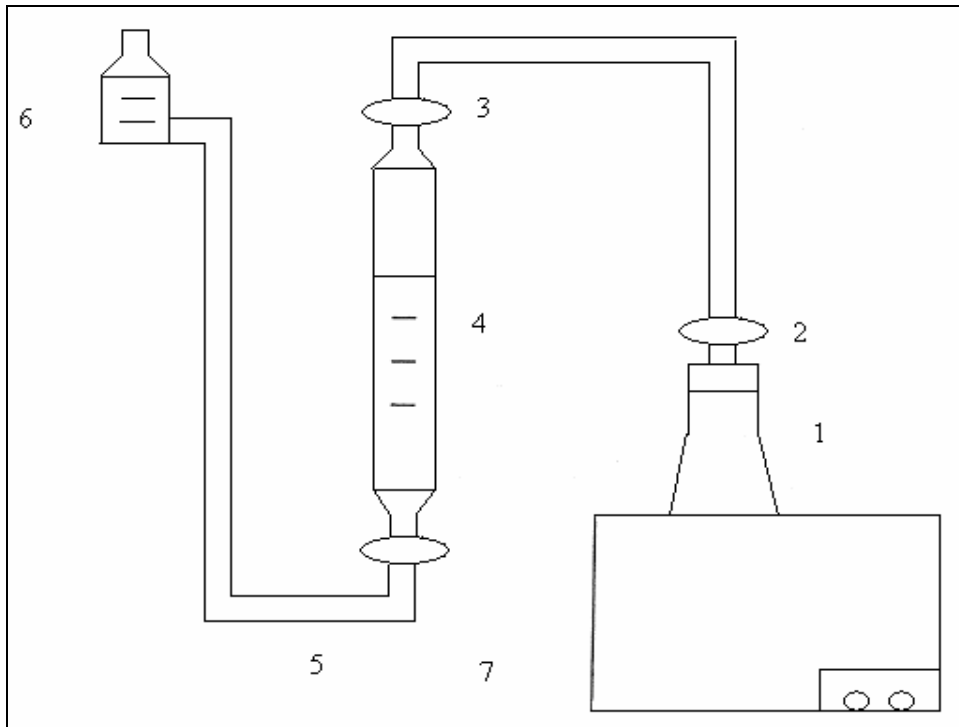
Erlenlerin gaz toplama büretlerine ve gaz toplama büretlerinin düzey şişelerine bağlantısını sağlamak üzere silikon-kauçuk hortumlar kullanılmıştır. Daha dayanıklı olması ve sızma yapmaması gibi nedenlerden dolayı, silikon-kauçuk hortum tercih edilmiştir. Hortumların, tüm deney sisteminde eşit uzunlukta olmasına da dikkat edilmiştir.

Çalışma sonucunda büretlerde toplanan gazın hangi oranda metan içerdiğini belirlemek amacıyla, Autofilm markalı gaz analizi cihazı ile, yapılan ölçüm sonucunda oluşan gazın biyogaz olmadığı, metan oranının çok düşük olduğu, büretlerde toplananan gazın, bu gibi sistemlerin ilk çalışmaları sırasında oluşan CO₂ ağırlıklı gaz olduğu belirlenmiştir.

Çalışma boyunca; örnek alınması, ortamın pH'ının ölçülmesi ve ayarlanması sırasında, ortamda oluşan gazın sistemden uzaklaşmaması için erlen çıkışlarına iki yollu musluk koyulmuştur. Ayrıca, hem gaz toplama büretlerinin düzeylerinin ayarlanması hem de büretlerden analiz için gazların alınmasını sağlamak üzere büretlerin alt ve üst çıkışına birer tane üç yollu musluk koyulmuştur (Şekil 4.1).

4.2.3. Gaz toplama sistemi

Atıkların anaerobik arıtımı süresince oluşan gazın toplanması için, 1 L hacimli dereceli büretler kullanılmıştır. Büretlerin içine yer değiştirme sıvısı olarak civa kullanılabilir. Ancak civa pahalı bir madde olduğu için gazın toplanması için büret içine, sulu $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 'in doymuş çözeltisi kullanılmıştır [57]. Hortumlar aracılığıyla bürete gelen gaz, bu çözelti doymuş olduğu için çözelti içerisinde çözünmeyip, çözeltinin üst kısmında toplanır. Oluşan gazın basıncı ile, yer değiştirme sıvısı, hortum yardımıyla, düzey şişesinde birikir. Dereceli büretteki düzey farkından oluşan gazın hacmi okunur. Gaz toplama düzeneği, Şekil 4.1' de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Gaz toplama düzeneği 1. Reaktör 2. İki yollu musluk 3. Üç yollu musluk 4. Gaz toplama büreti 5. Silikon kauçuk hortum 6. Seviye şişesi 7. Çalkalamalı su banyosu

4.3. Deneysel Parametrelerin Belirlenmesi

Çalışmada; KOİ’deki % azalma miktarı üzerine sıcaklık, pH ve özümleyici çamuru hacmi oranının etkisi incelenerek deneyler, Box-Wilson deneysel tasarım yöntemine göre tasarlanarak Design Expert 7.0.3 Trial İstatistiksel paket programı ile elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Ön çalışmadan elde edilen değerlerle literatür değerleri karşılaştırılarak sıcaklık, pH ve özümleyici çamuru hacmi oranının çalışma aralıkları belirlenmiştir.

Ön çalışmalarda peyniraltı suyunun anaerobik arıtımında, sıcaklık, pH ve çamurun hacimsel yüzdesi için değişik aralıklar alınmış ve her seferinde, her farklı aralıktaki değerlerin KOİ’deki azalma yüzdesi üzerine etkisi, yapılan KOİ analizleriyle belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak en uygun çalışma aralıkları belirlenmiştir.

4.3.1. Sıcaklık

Metan bakterileri, diğer tüm mikroorganizmalarda olduğu gibi, büyümeleri ve etkinlik gösterebilmeleri doğrudan sıcaklığa bağlı olduğu için, sıcaklıktan oldukça etkilenirler. Bu nedenle bu çalışmada sıcaklık, bağımsız değişkenlerden biri olarak seçilmiştir. Literatür değerleri ve ön çalışmalardan elde edilen sonuçlar doğrultusunda mezofilik koşulların olduğu, 34°C – 38°C sıcaklık aralığı seçilmiştir. Deneylerde sıcaklık denetimi sağlamak için sıcaklık denetimli su banyoları kullanılarak, sıcaklık mezofilik koşullarda tutulmuştur.

4.3.2. pH

Birçok farklı mikroorganizma topluluğunun bulunduğu anaerobik sistemlerde, bakterilerin maksimum gelişmesini sağlayacak bir pH aralığı sağlanmalıdır. Sürecin gelişimi açısından pH’ın optimum koşullarda tutulması önemlidir. Çünkü; anaerobik fermantasyonu denetleyen en önemli etkenlerden birisi de ortam pH’ıdır. Bu nedenle

bu çalışmada pH da bir parametre olarak seçilmiştir. Literatür bilgileri doğrultusunda pH 6,8-7,6 aralığında seçilmiştir. pH denetimi 1 M NaOH ve 1 M H₂SO₄ çözeltileri ile yapılmıştır. Reaktörler içerisindeki hammaddelerin hacimlerinin, eklenen bazla artmasını engellemek için kullanılan NaOH çözeltisinin derişimi, duruma göre arttırılmıştır.

4.3.3. Özümleyici çamurunun hacmi

PAS'ın anaerobik arıtımında kullanılan özümleyici çamurunun hacmi, anaerobik arıtım verimini büyük oranda etkilemektedir. Bu nedenle özümleyici çamurunun hacmi de bu çalışmada bir parametre olarak seçilmiştir. Çalışmada kullandığımız hammadde olan peynir altı suyu organik maddelerce oldukça zengindir. Bu kirlilik yükünün giderilmesi, yani organik maddelerin ayrıştırılarak arıtılması için, çalışmada bir aşu mikroorganizma kullanılması ve hangi oranda kullanılacağı da önemli bir parametredir. Çalışmalar boyunca özümleyici çamuru hacimsel yüzdesi için %5-%15 aralığı seçilmiştir.

4.3.4. Bekleme süresi

İlk yirmi dört saatlik zaman aralığında mikrobiyal etkinliğin oldukça yüksek olmasından dolayı, yirmi dört saatlik bekleme süresi seçilmiştir.

4.3.5. Karıştırma

Yirmi dört saatlik deney süresince her saat başı pH denetimi yapıldığı için, sürekli karıştırma yapılmasıyla sistemde oksijen aktarımının artması nedeniyle, sürekli karıştırma yerine periyodik karıştırma yapılmıştır. Periyodik karıştırma da, gazın reaktörün üst kısmında birikimi engellemek ve hortumlara iletimini sağlamak için pH denetimlerinden önce 1-2 dakika süreyle elle çalkalayarak gerçekleştirilmiştir.

4.4. Analiz Yöntemleri

Analizler standart metotlara göre yapılmıştır [57].

Arıtma çamuru ve PAS için başlangıç analizinde izlenen parametreler;

1. Toplam katılar
2. Toplam uçucu katılar
3. Toplam sabit katılar
4. Toplam organik karbon (TOK)
5. pH
6. Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ)
7. Gaz hacmi

4.4.1. Toplam katıların tayini

Bir porselen kroze alındı, duyarlı terazide tartıldı ve darası kaydedildi. Porselen kroze sabit tartıma gelinceye kadar 103 °C – 105 °C de etüvde tutuldu. Desikatörde 20 dakika soğutuldu ve tekrar duyarlı terazide tartıldı ve darası kaydedildi. Arıtma çamuru örneği iyice çalkalanarak karıştırıldıktan sonra alınarak porselen kroze içerisine konuldu ve tekrar tartıldı. Bulunan tartımdan dara çıkarılarak tartım sonucu kaydedildi (m_1). Katı madde içeriğini belirlemek için porselen kroze, 103 °C – 105 °C de 24 saat etüvde tutuldu. Porselen 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, g

m_2 = Son tartım (etüvden sonra), g

% KM = Katı madde miktarı

4.4.2. Toplam uçucu katı (Organik madde içeriği) tayini

Bir porselen kroze alındı, duyarlı (on binde bir duyarlılıkta) terazide tartıldı ve darası kaydedildi. Porselen kroze sabit tartıma getirilmek için 550 °C – 600 °C’ de fırında tutuldu. Daha önce etüvde kurutulmuş arıtma çamuru örneğinin iki ayrı noktasından örnek alınarak porselen kroze koyuldu. Tekrar tartıldı ve yapılan tartımdan dara çıkartılarak tartım sonucu kaydedildi (m_1). Porselen kroze 550 °C – 600 °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, g

m_2 : Son tartım (fırından sonra), g

$\% O_m$: Yüzde organik madde içeriği

4.4.3. Toplam sabit katı (İnorganik madde içeriği) tayini

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

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

Burada;

m_1 : İlk tartım, g

m_2 : Son tartım (fırından sonra), g

$\% İm$: Yüzde inorganik madde içeriği

4.4.4. Toplam organik karbon içeriği

Organik madde içeriğinden karbon içeriğine geçmek için korelasyon katsayısı

$R^2 = 0,82$ olan bir regresyon denklemi kullanıldı.

$$C_t = 3,2 \sqrt{O_m} \quad (4.4)$$

C_t : Toplam karbon içeriği, %

O_m : 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)

KOİ (Kimyasal Oksijen İhtiyacı), örnekteki organik maddenin kimyasal oksidasyonu için gerekli oksijen miktarıdır.

Atıkların toksik madde içermemesi ve sadece kolaylıkla kullanılabilecek organik gıda maddelerini içermesi halinde bulunacak KOİ sonucu, yaklaşık olarak BOİ değerine eşittir. Ancak kanalizasyon sularında genellikle KOİ değeri, BOİ değerinin iki katıdır [22].

Oksitlenme derecesi organik maddelerin türüne, derişimine, $K_2Cr_2O_7$ ve H_2SO_4 derişimine, tepkime sıcaklığına ve zamanına bağlıdır. Bu nedenle koşulların tam olarak sağlanması gerekmektedir.

Spektrofotometrik Yöntem

Standart yöntemden farklı olarak titrasyon yapılmaz. Bunun yerine ısıtıcıda yükseltgenme basamağını tamamlamış örnekler, soğutularak spektrofotometrede okutulur.

Kullanılan Malzemeler

1. Spektrofotometre
2. Hazırlanmış kit
3. Otomatik pipet

Reaktifler (1-1000 mg/l için)

1. Potasyum dikromat, civa sülfat ($K_2Cr_2O_7$ - $HgSO_4$) çözeltisi: 20 g $HgSO_4$, 200 ml saf su ve 25 mL derişik H_2SO_4 içerisinde çözülerek soğutulur. 3,6775 g, 105 °C’ de kurutulmuş $K_2Cr_2O_7$ eklenerek 250 mL’ye seyreltilir.
2. Sülfürik asit – Gümüş sülfat karışımı (H_2SO_4 - $AgSO_4$) çözeltisi: 10 g gümüş sülfat 35 mL saf suda çözülür. 965 mL sülfürik asit yavaş yavaş ilave edilir. Çözelti kullanılmadan bir gün önce hazırlanmalıdır ve renkli şişede saklanır.

Yöntem

1. Kitin içine $K_2Cr_2O_7$ - $HgSO_4$ çözeltisinden 1 mL, H_2SO_4 - $AgSO_4$ çözeltisinden 2 mL alınarak karıştırılır. Böylece kit hazırlanmış olur.
2. Hazırlanmış kitin üzerine örneğin alındığı yer yazılarak olası bir karışıklık önlenir.
3. Aynı işlemler tanık örnek (2 mL saf su) için de yapılır.
4. Isıtıcı açılarak cihazın ısınması beklenir.
5. İçine 2 mL örnek eklenen kitin kapağı kapatılarak iyice çalkalanır
6. Isıtıcıya konularak 150 °C’de 2 saat ısıtılır.
7. Süre bitiminde alınan kitler oda sıcaklığında soğutulur. Örnek hacmi azalmışsa değerlendirmeye alınmaz. Bunun önlenmesi için kitlerin kapağı sıkı kapatılır.

8.Önce tanık örnek okutularak spektrofotometrenin “0” ayarı yapılarak diğer kitler okutulur ve okunan absorbans değerleri kaydedilir.

Spektrofotometrik yöntemle KOİ analizlerinde, PAS ve aşı çamuru karışımı olan rektörler içinden 1 mL örnek alınarak 50 mL’ye seyreltildi. Daha sonra bu 50 mL’lik örnek, süzgeç kağıdından geçirildikten sonra, süzüntüden 2 mL alınarak hazırladığımız kitin üzerine eklendi. Daha sonra, 2 saat süre ile ısıtma işleminin ardından oda sıcaklığına kadar soğuyan örneğin, spektrofotometrede, 600 nm dalga boyunda absorbans değeri okunup, gerekli hesaplamalar yapılarak KOİ değeri belirlendi. Her noktada alınan numunelerden üç tekrar deneyi yapılarak, sonuçların karşılaştırılması suretiyle okunan KOİ değerlerinin doğruluğu sağlanmaya çalışılmıştır.



Resim 4.2. KOİ analizlerinde kullanılan ısıtıcı

Hesaplama

Spektrofotometreden okunan değerler absorbans (x) değerleridir. Spektrofotometre için oluşturulan kalibrasyon eğrisinden elde edilen A ve B değerleri ile

$Y = A \cdot x + B$ formülünden, 600 nm dalga boyunda ölçülen x (absorbans) değerlerini kullanarak istediğimiz örneğin KOİ değerini bulmuş oluruz [57, 58, 59].

4.4.7. Gaz hacmi

Atıkların anaerobik arıtımı süresince mikroorganizmaların etkinlikleri sonucu oluşan gazın, sisteme zararlı etkisini önlemek amacıyla toplanması için, 1 L hacimli dereceli bütretler kullanıldı. Bütretlerin içerisine yer değiştirme sıvısı olarak sulu Na_2SO_4 – H_2SO_4 'in doymuş çözeltisi kullanıldı [57].

Sodyum sülfat-sülfürik asit çözeltisi, 800 mL saf su içinde 200 g. Na_2SO_4 çözülerek, daha sonra da üzerine 30 mL derişik H_2SO_4 eklenerek hazırlanmıştır.

4.5. Box – Wilson Deneysel Tasarım Yöntemi ile Oluşturulan Modelde Design Expert Paket Programı ile Anaerobik Arıtım İçin Optimum Koşulların Bulunması

KOI'deki en yüksek azalma yüzdesi 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, $^{\circ}\text{C}$	32,64	34	36	38	39,36
pH	6,53	6,8	7,2	7,6	7,87
Çamur Hacmi, %	1,6	5	10	15	18,41

Çizelge 4.2’de hesaplanan $-\alpha$ ve $+\alpha$ değerleri Eş. 2.6’dan yararlanılarak bulunmuştur. Sıcaklık için adım aralığı 2, pH için adım aralığı 0,4, çamur hacmi için ise adım aralığı 5 olarak alınmıştır.

Deneysel tasarım matrisinin kodlanmış ve gerçek değerleri ile 2^3 faktöriyel merkezi bileşim değerleri Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Deneysel tasarım matrisinin kodlanmış ve doğal değerleri ile 2^3 faktöriyel merkezi bileşim değerleri

Deney No	U_1	U_2	U_3	X_1 , (T, °C)	X_2 (pH)	X_3 (% mL/100mL)
1	+1	+1	+1	38	7,6	15
2	+1	+1	-1	38	7,6	5
3	+1	-1	+1	38	6,8	15
4	+1	-1	-1	38	6,8	5
5	-1	+1	+1	34	7,6	15
6	-1	+1	-1	34	7,6	5
7	-1	-1	+1	34	6,8	15
8	-1	-1	-1	34	6,8	5
9	$+\alpha$	0	0	39,36	7,2	10
10	$-\alpha$	0	0	32,64	7,2	10
11	0	$+\alpha$	0	36	7,87	10
12	0	$-\alpha$	0	36	6,53	10
13	0	0	$+\alpha$	36	7,2	18,41
14	0	0	$-\alpha$	36	7,2	1,6
15	0	0	0	36	7,2	10
16	0	0	0	36	7,2	10
17	0	0	0	36	7,2	10
18	0	0	0	36	7,2	10
19	0	0	0	36	7,2	10
20	0	0	0	36	7,2	10

5. DENEYSEL SONUÇLAR

5.1. Başlangıç Analiz Sonuçları

Deneysel çalışmanın ilk aşamasında, peynir altı suyu ve arıtma çamurunun özelliklerini belirlemek amacıyla standart yöntemlere göre deneyler yapılmış ve sonuçları Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Peyniraltı suyunun özellikleri

	Peyniraltı suyu
KOİ, mg O ₂ /L katı	59 600
pH	6,18

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.saatte alınan örneklerdeki KOİ deney sonuçları ve % KOİ azalma değerleri

Deney No	KOİ, mg O ₂ /L g peynir altı suyu	KOİ’deki azalma, %
1	33 998,536	33,984
2	39 964,761	29,763
3	33 554,602	34,846
4	41 527,993	27,016
5	40 266,141	21,814
6	41 231,549	27,536
7	36 164,397	29,778
8	41 529,700	27,013
9	34 681,140	36,013
10	40 708,999	24,891
11	39 489,716	27,141
12	39 211,742	27,654
13	31 730,639	36,103
14	43 290,080	26,304
15	34 077,891	37,126
16	33 943,474	37,374
17	34 246,996	36,814
18	34 232,904	36,840
19	33 877,350	37,496
20	34 105,867	37,074

6. DESIGN EXPERT 7.0.3 TRIAL PAKET PROGRAMI İLE OPTİMUM KOŞULLARIN BELİRLENMESİ

Cevap yüzey yöntemi kullanılarak, peyniraltı suyunun anaerobik arıtımı için optimum koşullar belirlenmiştir. Peyniraltı suyunun anaerobik arıtımı üzerine sıcaklık, pH ve çamur hacmi oranı etkisinin incelendiği bu çalışmada, 2^3 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 (°C)	X ₁
pH,	X ₂
Çamur hacmi, (%)	X ₃

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

Çizelge 6.2. Deneysel tasarım yönteminde kullanılan bağımlı değişken

Bağımlı değişkenler	Tasarım değişkeni
24. saat sonundaki KOİ’ deki azalma, %	Y ₁

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

Çizelge 6.3. Sıcaklık, pH ve çamur hacmi değerleri ile 24. saat sonunda elde edilen KOİ yüzde azalma miktarları

Deney no	(Sıcaklık, °C) X ₁	(pH) X ₂	(%Özümleyici çamur hacmi, ml/100 ml)X ₃	(KOİ'deki % azalma) Y ₁
1	38	7,6	15	33,984
2	38	7,6	5	29,763
3	38	6,8	15	34,846
4	38	6,8	5	27,016
5	34	7,6	15	21,814
6	34	7,6	5	27,536
7	34	6,8	15	29,778
8	34	6,8	5	27,013
9	39,36	7,2	10	36,013
10	32,64	7,2	10	24,891
11	36	7,87	10	27,141
12	36	6,53	10	27,654
13	36	7,2	18,41	36,103
14	36	7,2	1,6	26,304
15	36	7,2	10	37,126
16	36	7,2	10	37,374
17	36	7,2	10	36,814
18	36	7,2	10	36,840
19	36	7,2	10	37,496
20	36	7,2	10	37,074

6.1. KOİ' deki (%) Azalma Miktarı İçin Elde Edilen Sonuçlar

6.1.1. KOİ' deki (%) azalma miktarları kullanılarak model denkleminin kurulması

Kullanılan program ile KOİ'deki 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

$Y_1 = a + b \cdot X_1 + c \cdot X_2 + d \cdot X_3 + e \cdot X_1 \cdot X_2 + f \cdot X_1 \cdot X_3 + g \cdot X_2 \cdot X_3 + h \cdot X_1^2 + i \cdot X_2^2 + j \cdot X_3^2 + k \cdot X_1^2 \cdot X_2 + l \cdot X_1^2 \cdot X_3 + m \cdot X_2^2 \cdot X_3 + n \cdot X_1^3 + o \cdot X_2^3 + p \cdot X_3^3$			
Model Parametresi	Hesaplanan Katsayılar	P değeri	Standart Hata
Sabit	37,13	<0,0001	0,54
X_1	2,80	<0,0001	0,36
X_2	-0,47	0,2190	0,36
X_3	1,87	0,0004	0,36
$X_1 X_2$	1,17	0,0320	0,47
$X_1 X_3$	1,88	0,0025	0,47
$X_2 X_3$	-1,51	0,0090	0,47
X_1^2	-2,41	<0,0001	0,35
X_2^2	-3,49	<0,0001	0,35
X_3^2	-2,15	0,0001	0,35

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

$$Y_1 = 37,13 + 2,80 \cdot X_1 - 0,47 \cdot X_2 + 1,87 \cdot X_3 + 1,17 \cdot X_1 X_2 + 1,88 \cdot X_1 X_3 - 1,51 \cdot X_2 X_3 - 2,41 \cdot X_1^2 - 3,49 \cdot X_2^2 - 2,15 \cdot X_3^2 \quad (6.1)$$

$R^2 = 0,9655$ olarak bulunmuştur.

Bulunan bu eşitlikte, yüzde KOİ'deki azalma miktarı; sıcaklık, pH ve çamur hacmine bağlı olarak bulunmuştur. Burada görülen R^2 değeri, bağımlı değişkenin, bağımsız değişkenler tarafından ne kadar iyi açıklandığını ve model denkliği ile gerçek değerlerin uyumunu göstermektedir. 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 0,9655 olarak bulunmuştur. Sonuç olarak, KOİ'deki azalma miktarı için modeldeki R^2 değerinin 0,9655 olarak bulunması, modelden hesaplanan değerle deneysel değerler karşılaştırıldığında deneysel sonuçların kabul edilebilir bir uyum içerisinde olduğunu göstermiştir.

R^2 değeri dışında modelin doğruluğu; her noktadaki deneysel olarak bulunan ve modelden hesaplanan % hata değerlerinin, %10'dan düşük olması ile de uyumluluk gösterir.

X_1 , X_2 ve X_3 'ün 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_3 , X_1^2 , X_1X_2 , X_1X_3 , X_2X_3 , X_2^2 , X_3^2 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'deki azalma yüzdesi üzerine en etkin parametrenin X_1 sıcaklık olduğu [$(X_1$ için $P < 0,0001$) ve $(X_1^2$ için $P < 0,0001$)] sıcaklıktan sonra ikinci önemli parametrenin ise çamur hacim oranı [$(X_3$ için, $P=0,0004$)] ve [$(X_3^2$ için $P=0,0001$)] olduğu görülmektedir.

Ancak; modelde X_2 (pH) parametresinin P değeri 0,1'in üzerinde olduğu için bu parametrenin, model üzerine birinci dereceden etkisinin ihmal edilebilir olduğu görülmektedir

Parametreler arasındaki iç etkileşimler değerlendirildiğinde ise, X_1 (sıcaklık) ile X_3 (çamur hacmi) arasındaki etkileşiminin en fazla (X_1X_3 için, $P=0,0025$) olduğu, X_1

(sıcaklık) ile X_2 (pH) arasındaki etkileşimin de tüm sistemde etkisinin (diğer etkileşimlerle karşılaştırıldığında) en az olduğu (X_1X_2 için, $P=0,0320$) görülmektedir.

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

X_2 (pH) parametresi ihmal edildikten sonra kalan model denklemine ANOVA testi uygulanarak elde edilen sonuçların doğruluğu kontrol edilmiştir.

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

ANOVA	Kareler Toplamı	Karaler toplamı, %	Karaler Oranı		Serbestlik derecesi
Kaynak	KT	KT%	KO	F	df
Model	488,19	95,96	61,02	32,66	8
Hata	20,55	4,04	1,87		11
Toplam	508,74	100			19

Regrasyon katsayısı $R^2 = 488,19 / 508,74 = 0,9596$ 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.

Çözüm sonucu KOİ'deki en yüksek azalma yüzdesi için hesaplanan katsayılar ve istatistiksel hesaplamalar Çizelge 6.6'da verilmiştir.

Çizelge 6.6. KOİ'deki azalma yüzdesi için parametreler arasında ihmal yapıldıktan sonra bulunan katsayılar ve istatistiksel hesaplamalar

$Y_1 = a + b \cdot X_1 + c \cdot X_3 + d \cdot X_1 \cdot X_2 + e \cdot X_1 \cdot X_3 + f \cdot X_2 \cdot X_3 + g \cdot X_1^2 + h \cdot X_2^2 + j \cdot X_3^2$			
Model Parametresi	Hesaplanan Katsayılar	P değeri	Standart Hata
Sabit	37,13	<0,0001	0,56
X_1	2,80	<0,0001	0,37
X_3	1,87	0,0004	0,37
$X_1 X_2$	1,17	0,0345	0,48
$X_1 X_3$	1,88	0,0026	0,48
$X_2 X_3$	-1,51	0,0096	0,48
X_1^2	-2,41	<0,0001	0,36
X_2^2	-3,49	<0,0001	0,36
X_3^2	-2,15	<0,0001	0,36

Çözüm sonucu KOİ'deki azalma yüzdesi için elde edilen model eşitliği gerçek değerler cinsinden, pH'ın etkisi ihmal edildikten sonra aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$Y_1 = 37,13 + 2,80 \cdot X_1 + 1,87 \cdot X_3 + 1,17 \cdot X_1 X_2 + 1,88 \cdot X_1 X_3 - 1,51 \cdot X_2 X_3 - 2,41 \cdot X_1^2 - 3,49 \cdot X_2^2 - 2,15 \cdot X_3^2 \quad (6.2)$$

$R^2 = 0,9596$ olarak bulunmuştur.

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

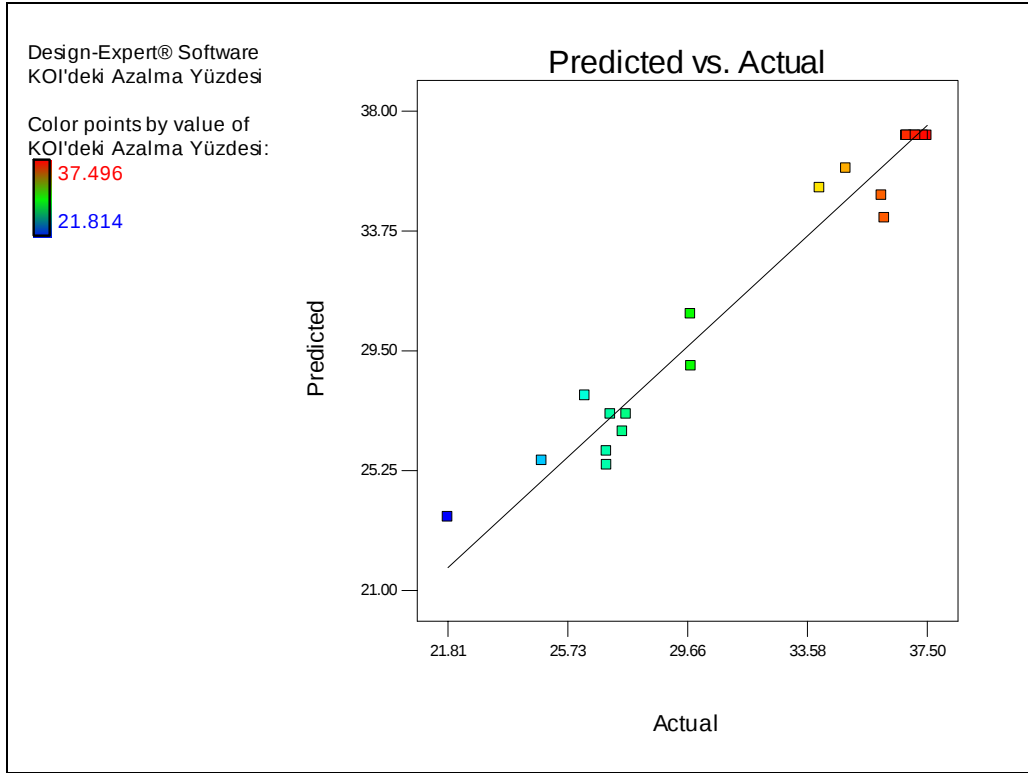
Çizelge 6.7'de daha önceden belirlenen parametreler için modelden hesaplanan ve deneysel olarak bulunan KOİ' deki azalma miktarının (%) karşılaştırmalı değerleri ve % hata oranları verilmiştir. Görüldüğü gibi deneysel olarak bulunan ve modelden hesaplanan değerler birbirine yakın çıkmıştır. Hata oranı Eş. 6.3 ile hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Hata} = [(Y_{\text{model}} - Y_{\text{deneysel}}) / Y_{\text{deneysel}}] * 100 \quad (6.3)$$

Çizelge 6.7. KOİ’deki azalma yüzdesi için deneysel olarak bulunan ve modelden hesaplanan Y değerleri ve % hata değerleri

Deney No	Sıcaklık (°C)	pH	Çamur Hacmi (mL/100mL)	Deneysel bulunan (KOİ’deki %Azalma/gün) Y ₁	Modelden Hesaplanan (KOİ’deki %Azalma/gün) Y ₁	Hata %
	X ₁	X ₂	X ₃			
1	38	7,6	15	27,01	25,94	-4,125
2	38	7,6	5	27,02	25,44	-6,211
3	38	6,8	15	27,54	26,63	-3,417
4	38	6,8	5	29,76	30,80	3,377
5	34	7,6	15	29,78	28,95	-2,867
6	34	7,6	5	34,85	35,96	3,087
7	34	6,8	15	21,81	23,60	7,585
8	34	6,8	5	33,98	35,27	3,657
9	39,36	7,2	10	24,89	25,60	2,773
10	32,64	7,2	10	36,01	35,00	-2,886
11	36	7,87	10	27,65	27,25	-1,468
12	36	6,53	10	27,14	27,25	0,404
13	36	7,2	18,41	26,30	27,90	5,735
14	36	7,2	1,6	36,10	34,20	-5,556
15	36	7,2	10	37,50	37,13	-0,996
16	36	7,2	10	36,81	37,13	0,862
17	36	7,2	10	37,37	37,13	-0,646
18	36	7,2	10	37,07	37,13	0,162
19	36	7,2	10	36,84	37,13	0,781
20	36	7,2	10	37,13	37,13	0,000

Design Expert 7.0.3 istatistiksel paket programıyla modelden hesaplanan ve deneysel olarak bulunan KOİ’deki azalma yüzde değerlerinin grafiksel olarak karşılaştırılması Şekil 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.1. Deneysel olarak bulunan ve modelden hesaplanan KOİ' deki (%) azalma miktarlarının karşılaştırılması

Çizelge 6.7'de görüldüğü gibi, KOİ'deki (%) azalma miktarının deneysel olarak bulunan ve modelden hesaplanan değerleri, birbirine yakın çıkmıştır. Ayrıca Şekil 6.1'de hemen hemen bütün değerlerin diagonalin üzerinde ve diagonale yakın olması deneysel ve modelden hesaplanan değerlerin birbirine yakın olduğunu göstermektedir.

6.1.4. 24. saat sonundaki KOİ' deki (%) azalma miktarı için optimum koşulların belirlenmesi

Elde edilen model denkleminde KOİ' deki azalma miktarını en yüksek yapan sıcaklık, pH ve çamur hacmi oranının optimum değerleri Çizelge 6.8'de verilmiştir.

Çizelge 6.8. KOİ’ deki azalma yüzdesini optimum yapan parametre değerleri

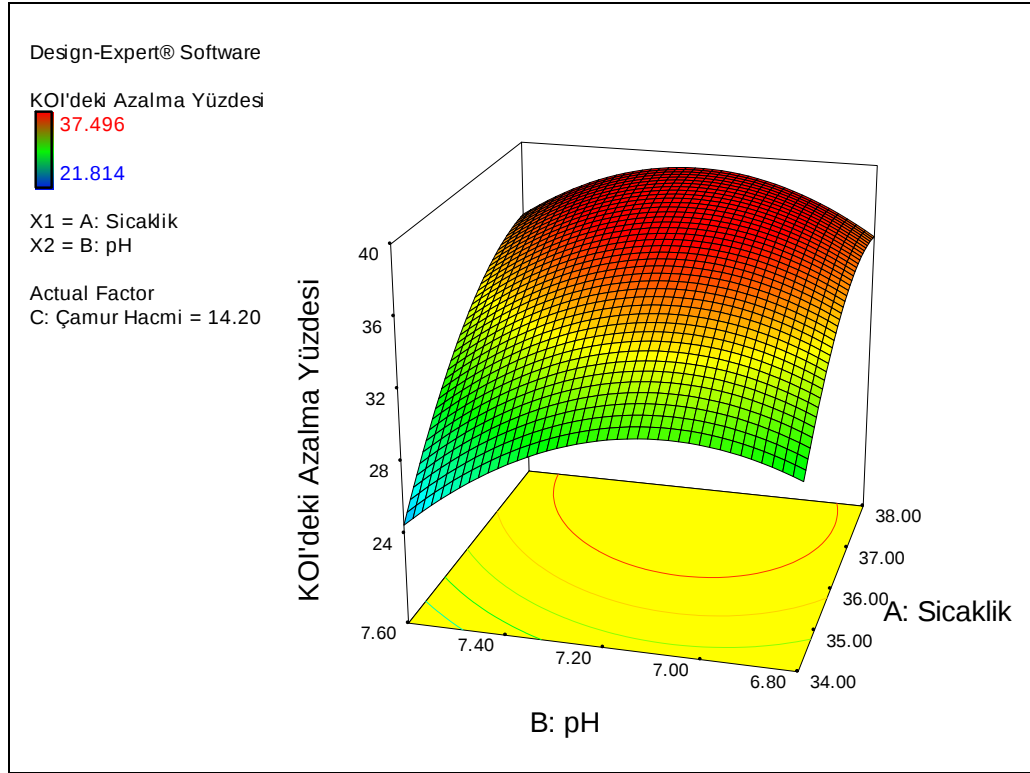
Parametreler	X ₁ (Sıcaklık, °C)	X ₂ (pH)	X ₃ (Çamur Hacmi, (%))
En düşük değer	32,6	6,53	5
Ortalama değer	36,0	7,20	10
En yüksek değer	39,4	7,87	15
Optimum değer	37,8	7,19	14,20

En yüksek KOİ’ deki azalma miktarı % 39,17 olarak bulunmuştur.

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

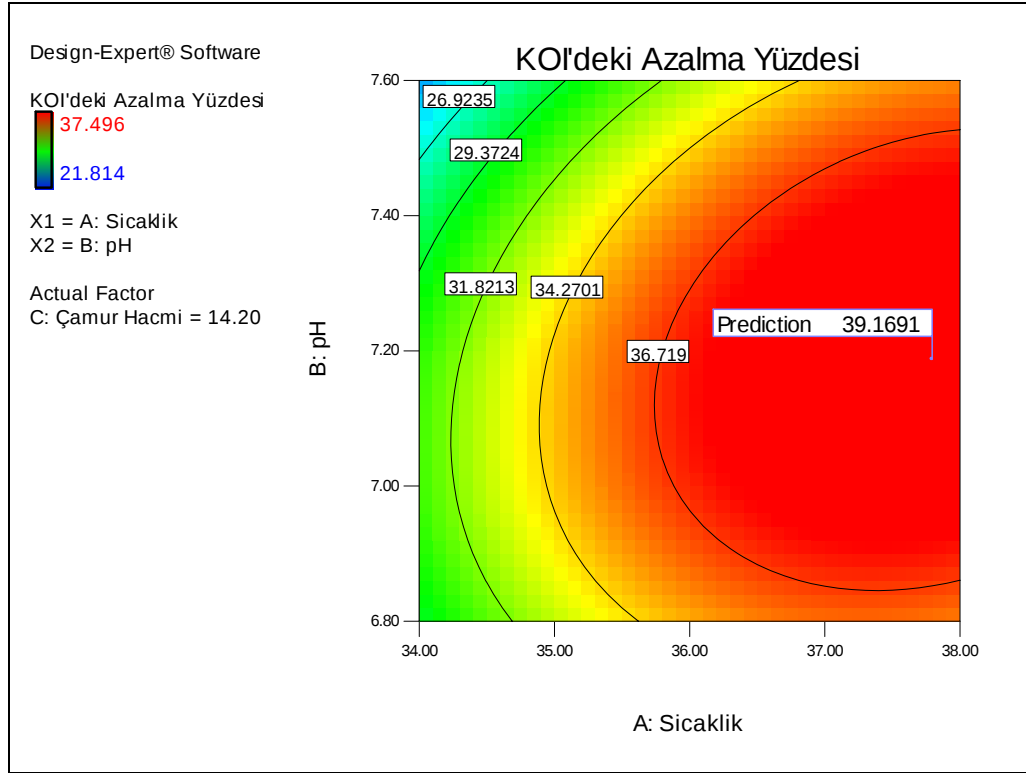
KOİ’ deki azalma miktarını maksimum yapan sıcaklık, pH ve çamurun hacimsel yüzdesi belirlendikten sonra, bu değişkenlerin birini sabit tutarak (KOİ’ deki maksimum azalma miktarında), diğer iki değişkenin değişimini incelemek üzere cevap yüzey eğrileri (response surface) Design Expert 7.0.3 Trial istatistiksel 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’ deki azalma miktarları (%) değerleri görülmektedir.

KOİ’ deki en yüksek azalma yüzdesinin, sıcaklık ve pH’ın fonksiyonu olarak üç boyutlu gösterimi Şekil 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.2. Sabit çamur hacmi oranında (14,20ml/100ml), sıcaklık ve pH'ın KOİ' deki azalma yüzdesi üzerine etkisi

Cevap yüzeyini daha iyi anlayabilmek için contour plot (Eş KOİ'deki % Azalma Eğrileri) Şekil 6.3' de gösterilmiştir.



Şekil 6.3. Sabit çamur hacmi oranında (14,20), sıcaklık ve pH'ın KOİ' deki azalma yüzdesi üzerine etkisi için contour plot

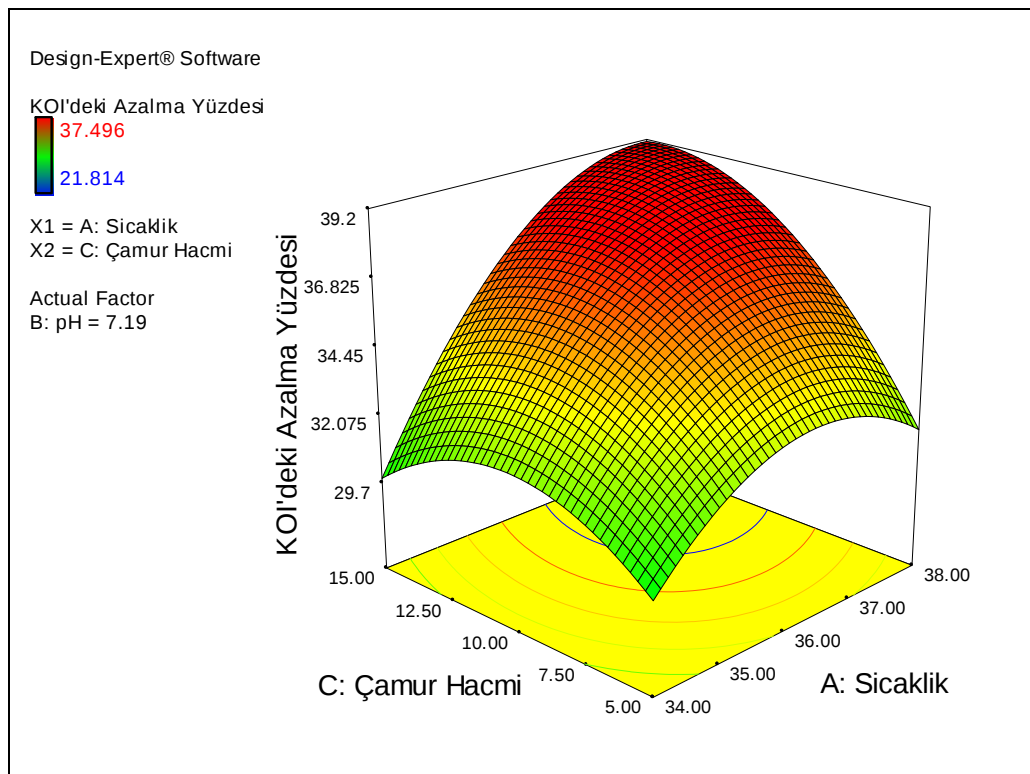
KOI'deki en yüksek azalma miktarı, yaklaşık olarak 37,8°C sıcaklık, 7,19 pH değerinde ve % 14,20 çamur hacmi oranında elde edilmiştir. Çamur hacim oranı optimum noktada (14,20) sabit tutularak KOİ'deki azalma miktarı üzerine sıcaklık ve pH'ın etkisi incelenmiştir. Şekil 6.2'de de görüldüğü üzere belli bir sıcaklıkta (örneğin 37 °C'de) pH değeri arttıkça KOİ'deki azalma miktarı da artmakta pH-7,19 da maksimum değerine ulaşmakta, bu değerden sonra ise azalmaktadır.

Düşük pH'larda asit üreten ve tüketen bakteriler arasında denge sağlanamadığından dönüşüm olmamakta ve bu yüzden de KOİ'deki azalma düşük çıkmaktadır. Yüksek pH'larda ise, sistemde amonyak üretimi artmakta, amonyağın fazla miktarı sistemde zehirliliğe yol açmakta ve metan bakterilerinin aktivitesini düşürerek arıtımı engellemektedir.

Belli bir pH değerinde (örneğin pH-7,00'da) sıcaklığın KOİ'deki azalma miktarı üzerine etkisi incelendiğinde ise, KOİ'deki azalma (anaerobik arıtım) miktarı

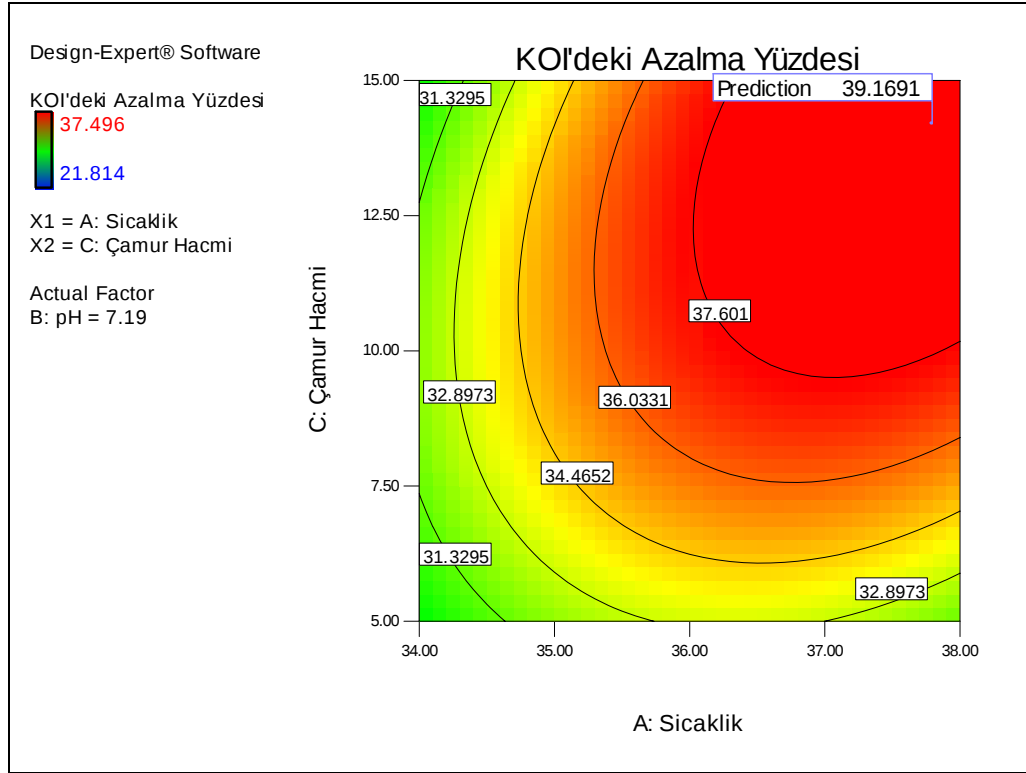
sıcaklık arttıkça artmakta, 37,8 °C sıcaklıkta maksimuma ulaşmakta ve bu sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklar mezofilik bakteriler için kararsız bölge olduğu için, KOİ'deki azalma (anaerobik arıtım) azalmaktadır.

KOI' deki en yüksek azalma yüzdesinin, sıcaklık ve çamurun hacimsel yüzdesinin fonksiyonu olarak üç boyutlu gösterimi Şekil 6.4'de verilmiştir.



Şekil 6.4. Sabit pH'da (7,19), sıcaklık ve çamurun hacimsel yüzdesinin KOİ' deki azalma yüzdesi üzerine etkisi

Cevap yüzeyini daha iyi anlayabilmek için contour plot (Eş KOİ'deki % Azalma Eğrileri) Şekil 6.5' de gösterilmiştir.

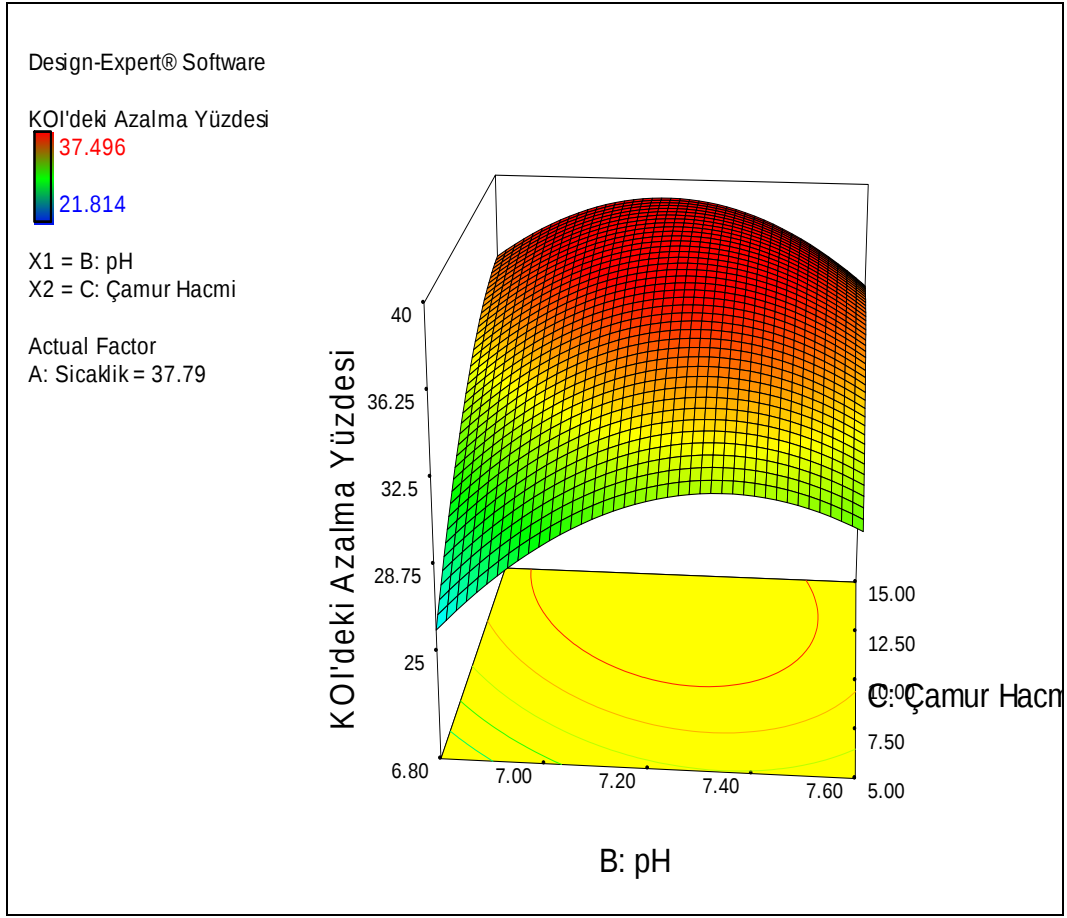


Şekil 6.5. Sabit pH'da (7,19), sıcaklık ve çamurun hacimsel yüzdesinin KOİ' deki azalma yüzdesi üzerine etkisi için contour plot

pH değeri optimum noktada (7,19) sabit tutularak sıcaklık ve çamurun hacimsel yüzdesinin etkisi incelenmiştir. Belli bir çamur hacmi yüzdesinde (örneğin %12,50 değerinde) sıcaklık arttıkça KOİ'deki azalma miktarı artmakta, 37,8 °C'de maksimuma ulaşmakta ve bu sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklar mezofilik bakteriler için kararsız bölge olduğu için KOİ'deki azalma miktarı azalmaktadır.

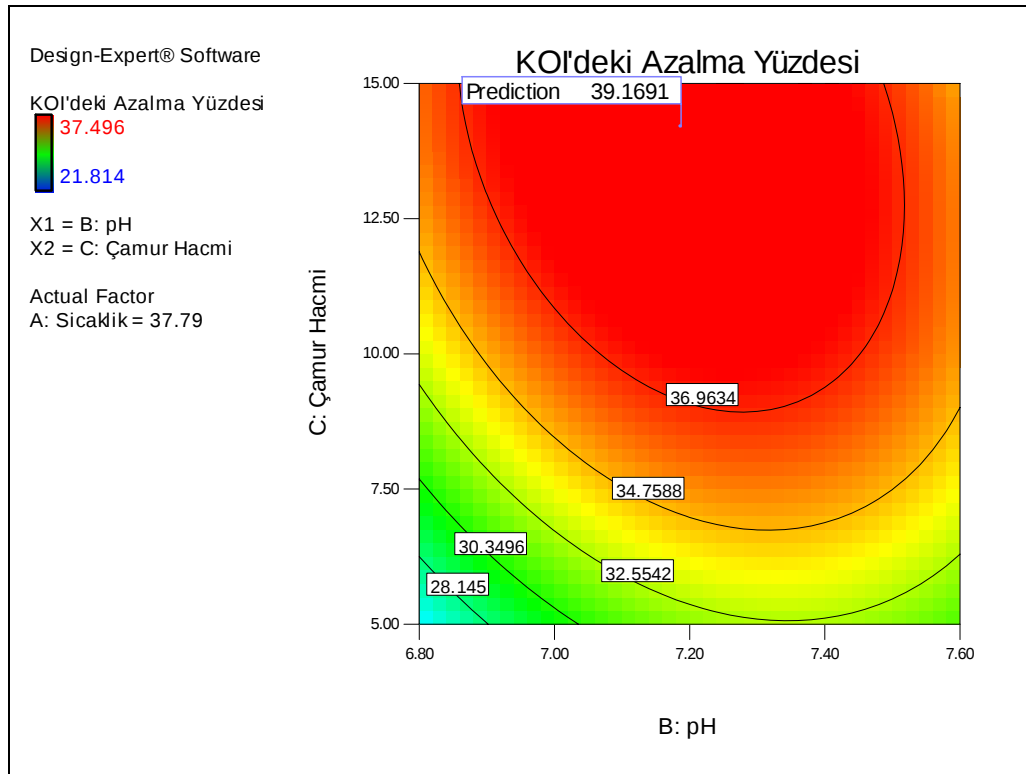
Belli bir sıcaklıkta (örneğin 37,5 °C'de) çamurun hacimsel yüzdesinin KOİ'deki azalma miktarı üzerine etkisi incelendiğinde ise, çamur hacim yüzdesi arttıkça KOİ'deki azalma miktarı artmaktadır, bu artış %14,20 değerinden sonra gözlenmemektedir.

KOİ' deki en yüksek azalma yüzdesinin, pH ve çamurun hacimsel yüzdesinin fonksiyonu olarak üç boyutlu gösterimi Şekil 6.6'da verilmiştir.



Şekil 6.6. Sabit sıcaklıkta (37,8°C), pH ve çamurun hacimsel yüzdesinin KOİ' deki azalma yüzdesi üzerine etkisi

Cevap yüzeyini daha iyi anlayabilmek için contour plot (Eş KOİ'deki %Azalma Eğrileri) Şekil 6.7' de gösterilmiştir



Şekil 6.7. Sabit sıcaklıkta (37,8°C), pH ve çamurun hacimsel yüzdesinin KOİ' deki azalma yüzdesi üzerine etkisi için contour plot

Sıcaklık optimum noktada sabit tutularak (37,8°C) KOİ'deki azalma miktarı üzerine pH ve çamurun hacimsel yüzdesinin etkisi incelenmiştir. Belli bir pH'da (pH-7,40'da) çamur hacim oranı arttıkça KOİ'deki azalma miktarı artmakta, belli bir değerden sonra ise azalmaktadır.

Belli bir çamur hacmi yüzdesinde (örneğin %12,50) pH'ın KOİ'deki azalma miktarı üzerine etkisi incelendiğinde ise, KOİ'deki azalma miktarı pH 7,1 değerine kadar artmakta, pH-7,1-7,2 arasında maksimum değerine ulaşmakta ve pH 7,2'nin üzerinde KOİ'deki azalma miktarı düşmektedir.

Bunun nedeni ise yüksek pH değerlerinde sistemde amonyak üretiminin artması ve amonyak değerinin fazla olmasının sistem içerisinde zehirliliğe yol açmasıdır. Bu durumda özellikle metan bakterileri etkinlikleri azalmakta ve KOİ giderim miktarı düşmektedir. Aynı zamanda düşük pH değerlerinde, asit üreten ve tüketen bakteriler

arasında denge sağlanamadığından metan bakterilerinin aktivitesi büyük ölçüde düşüktür.

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, peynir altı suyunun kesikli sistemde anaerobik arıtımı ve yan ürün olarak gaz elde edilebilme imkanları incelenmiştir. Bu çalışmada sıcaklık, pH ve çamurun hacimsel yüzdesinin KOİ’deki % azalma miktarı, yani peyniraltı suyunun anaerobik arıtım verimi üzerindeki etkisi incelenmiş ve deneyler Box-Wilson deneysel tasarım yöntemine göre tasarlanmıştır. “Design Expert 7.0.3 Trial” istatistiksel paket programı ile, KOİ’deki azalma yüzdesi için model denklemleri oluşturulmuş, seçilen sıcaklık, pH ve çamurun hacimsel yüzdesi değerlerinde en yüksek KOİ azalma yüzdesi için optimum değerler bulunmuştur.

KOİ; anaerobik arıtmada, kirlilik gideriminin bir göstergesidir. Bu nedenle de deney süresi boyunca KOİ bağımlı değişken olarak seçilmiştir.

Kesikli sistemde gerçekleştirilen bu çalışmada; KOİ’deki azalma yüzdesi üzerine en etkin parametrenin X_1 sıcaklık olduğu, sistem için sıcaklıktan sonra etkin olan diğer parametrenin çamurun hacimsel yüzdesi olduğu, bunlardan daha az etkili ama diğer etkileşimlere göre daha kuvvetli etkili bir diğer parametrenin de; X_1 sıcaklık ve X_3 çamurun hacimsel yüzdesinin ikili etkileşimleri olduğu görülmüştür. Ancak, X_2 (pH) parametresinin P değeri 0,1’in üzerinde olduğu için bu parametre, model denkleminde ihmal edilmiştir. Buna göre model denklemi ve R^2 değeri aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$Y_1 = 37,13 + 2,80 \cdot X_1 + 1,87 \cdot X_3 + 1,17 \cdot X_1 \cdot X_2 + 1,88 \cdot X_1 \cdot X_3 - 1,51 \cdot X_2 \cdot X_3 - 2,41 \cdot X_1^2 - 3,49 \cdot X_2^2 - 2,15 \cdot X_3^2 \quad R^2=0,9596$$

Modelden hesaplanan ve deneysel çalışmalar sonucunda bulunan KOİ’deki % azalma değerleri Şekil 6.1’de de görüldüğü gibi, birbiri ile uyumludur. Deneysel sonuçlarla modelden hesaplanan KOİ’deki azalma yüzdeleri arasındaki uygunluğun göstergesi olan korelasyon katsayısı R^2 ’nin 0,9596 olarak bulunması da, bunun önemli göstergelerinden biridir. Ayrıca tasarlanan 20 deneyin sonuçları da, modelden hesaplanan sonuçlarla uyumludur. Çizelge 6.7’de de görüldüğü gibi en yüksek hata

değeri pH'ın 6,8; sıcaklığın 34 °C; çamur hacim yüzdesinin ise 15 olduğu deneyde %7,58 olarak belirlenmiştir. Diğer 19 deneyde ise bu hata değerleri, bu değerin çok daha altındadır. Modelin uygunluğu açısından bu hata değerlerinin %10'u geçmemesi gerekmektedir ve bulunan sonuçlar da bunu sağlamıştır.

Design Expert 7.0.3 Trial paket programına göre; KOİ'deki en yüksek azalma, % 39,17 (KOİ'deki % azalma/gün) olarak bulunmuş ve KOİ'deki azalma yüzdesini bir başka ifadeyle anaerobik arıtım verimi değerini en yüksek yapan optimum sıcaklık 37,8 °C , optimum pH 7,19 ve optimum çamur hacmi yüzdesi ise % 14,20 (ml/100ml) olarak bulunmuştur.

Sonuçlara göre, KOİ'deki % azalma üzerine en etkin parametrenin sıcaklık olduğu, sıcaklıktan sonra ikinci sırada etkin olan parametrenin ise çamur hacmi yüzdesi olduğu bulunmuş ve pH'ın birinci dereceden etkisinin ihmal edilebilir olduğu görülmüştür. Kullanılan aşı çamuru içerisindeki mikroorganizmaların ortama ve sisteme adapte olma süreçlerinde hassasiyetlerinin yüksek olması ve sistem pH'ının çok hızlı ve de fazla değişmesinden dolayı kontrolünün zor olan bu parametre sistem için diğer parametreler gibi önemlidir, birinci dereceden etkisinin ihmal edilebilir olması önemsiz bir parametre olduğu anlamına gelmemektedir.

KOİ' deki % azalma miktarını en yüksek yapan sıcaklık, pH ve çamur hacmi oranı belirlendikten sonra, bu değişkenlerin birini sabit tutarak (KOİ' deki maksimum azalma miktarında), diğer iki değişkenin değişimi incelenmiştir. Buna göre; çamur hacim yüzdesi optimum noktada (14,20) sabit tutularak KOİ'deki % azalma miktarı üzerine sıcaklık ve pH'ın etkisi incelenmiştir. Şekil 6.2'de ve Şekil 6.3'de görüldüğü üzere belli bir sıcaklıkta (örneğin 37 °C'de) pH değeri artıkça KOİ'deki azalma miktarı da artmakta pH-7,19 da maksimum değerine ulaşmakta, bu değerden sonra ise azalmaktadır. Düşük pH'larda asit üreten ve tüketen bakteriler arasında denge sağlanamadığından dönüşüm olmamakta ve bu yüzden de KOİ'deki azalma düşük çıkmaktadır. Yüksek pH'larda ise, sistemde amonyak üretimi artmakta, amonyanın fazla miktarı sistemde zehirliliğe yol açmakta ve metan bakterilerinin aktivitesini düşürerek arıtımı engellemektedir. Belli bir pH değerinde (örneğin pH-7,00'da)

sıcaklığın KOİ'deki azalma miktarı üzerine etkisi incelendiğinde ise, KOİ'deki azalma (anaerobik arıtım) miktarı sıcaklık arttıkça artmakta, 37,8 °C sıcaklıkta maksimuma ulaşmakta ve bu sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklar mezofilik bakteriler için kararsız bölge olduğu için, KOİ'deki azalma (anaerobik arıtım) azalmıştır.

pH değeri optimum noktada (7,19) sabit tutularak, KOİ'deki % azalma miktarı üzerine sıcaklık ve çamurun hacimsel yüzdesinin etkisi incelenmiştir. Belli bir çamur hacmi yüzdesinde (örneğin %12,50 değerinde) sıcaklık arttıkça KOİ'deki azalma miktarı artmakta, 37,8 °C'de maksimuma ulaşmakta ve bu sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklar mezofilik bakteriler için kararsız bölge olduğu için KOİ'deki azalma miktarı azalmaktadır. Belli bir sıcaklıkta (örneğin 37,5 °C'de) çamur hacim yüzdesinin KOİ'deki azalma miktarı üzerine etkisi incelendiğinde ise, çamur hacim oranı arttıkça KOİ'deki azalma miktarı artmaktadır. Bunun nedeni özümleyici çamuru içerisinde bulunan mikroorganizmaların, peyniraltı suyu içerisindeki organik maddeleri ayrıştırma işlemini gerçekleştirmesidir. Yeterli oranda mikroorganizmanın bulunmadığı reaktörlerde arıtım yani KOİ'deki azalma miktarı düşük; buna karşılık arıtma çamuru hacminin yüksek olduğu reaktörlerde anaerobik arıtım veriminin arttığı gözlenmiştir.

Sıcaklık optimum noktada sabit tutularak (37,8 °C) KOİ'deki % azalma miktarı üzerine pH ve çamurun hacimsel yüzdesinin etkisi incelenmiştir. Belli bir pH'da (örneğin pH-7,40) çamur hacim yüzdesi arttıkça KOİ'deki azalma miktarı artmakta, belli bir değerden sonra ise azalmaktadır. Belli bir çamur hacim yüzdesinde (örneğin 12,50) pH'ın KOİ'deki azalma miktarı üzerine etkisi incelendiğinde ise, KOİ'deki azalma miktarı pH- 7,1 değerine kadar artmakta, pH-7,1-7,2 arasında maksimum değerine ulaşmakta ve pH-7,2'nin üzerinde KOİ'deki azalma miktarı düşmektedir. Bunun nedeni ise yüksek pH değerlerinde sistemde amonyak üretiminin artması ve amonyak değerinin fazla olması sistem içerisinde zehirliliğe yol açmasıdır. Bu durumda özellikle metan bakterileri etkinlikleri azalmakta ve KOİ giderim miktarı düşmektedir. Aynı zamanda düşük pH değerlerinde, asit üreten ve tüketen bakteriler arasında denge sağlanamadığından metan bakterilerinin aktivitesi büyük ölçüde düşmekte, bu durum da arıtım verimini olumsuz yönde etkilemektedir.

Peyniraltı suyu ve arıtma çamurunun anaerobik arıtılabilirliğinin incelenmesi ve peyniraltı suyundan biyogaz eldesi ile ilgili olarak yapılacak çalışmalarda; bu çalışmadan elde edilen, en yüksek KOİ azalma yüzdesi için optimum sıcaklık, pH ve arıtma çamuru hacmi yüzdesi değerleri kullanılarak, sürekli sistemde çalışılmak koşulu ile, biyogaz eldesi, oluşan gazın kimyasal yapısı ve bu yapı üzerine bu bileşenlerin etkisi, oluşan gazın sistem içerisinde karıştırma veya sistem sıcaklığının sabitliğini sağlama gibi işlemlerde kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi gibi çalışmalar yapılabilir. Ayrıca bu üç parametre sabit tutularak, arıtma verimi ve biyogaz üretim hızı üzerine değişik parametrelerin etkileri de araştırılabilir.

Bu çalışmada PAS, literatürdeki çalışmalarda da olduğu gibi seyreltilerek kullanılmış, bu işlemin de anaerobik arıtım verimine etkisinin, seyreltilmeden kullanılmasına göre daha fazla olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlar literatür değerleri ile uyum göstermektedir.

PAS'ın anaerobik arıtımında; 100 ml'lik bir PAS-Arıtma Çamuru karışımında 14,20 ml arıtma çamuru yüzdesi kullanılması, kirlilik gideriminde en yüksek değeri elde etmemizi sağlamıştır. Peyniraltı suyunun arıtılmadan kanalizasyona veriliyor olması hem büyük bir çevre kirliliği nedeni hem de değerlendirilebilir bir atığın kullanılabilirliğiyle ilgili eksik bilgiden kaynaklı, maddi bir kayıptır. Çalışmamızda elde edilen değerler, ekonomik değeri yüksek, değerlendirilmeyen ancak değerlendirilebilir bu atığın anaerobik arıtımı için kullanılabilir. Örneğin; Ankara Atatürk Orman Çiftliği Süt Fabrikasında haftanın belirli günlerinde üretilen PAS, arıtılmaksızın kanalizasyona verilmektedir. Ankara'da bulunan ve arıtım çamurunu anaerobik olarak arıtan ASKİ'ye bağlı Tatlar Merkezi Atıksu Arıtma Tesisi'nde PAS'ın en verimli şekilde arıtılabilmesi için, PAS ile karıştırılacak arıtma çamuru yüzdesinin 14,20; sıcaklığın 37,8 °C ve pH değerinin ise 7,19 olduğu çalışmamızda belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

1. Monroy H., Vazquez M., and Derramadero J.C., “Anaerobic-aerobic treatment of cheese wastewater with national technology in mexico: the case of el sauz”, *Wat. Sci. Tech.*, 32: 149-156 (1995).
2. Gavala, H.N., Kopsinis, H., Skiadas, I.V., Stamatelatou, K., and Lyberatos, G. “Treatment of dairy wastewater using an upflow anaerobic sludge blanket reactor”, *J. Agric. Engng Res.*, November 73: 59-63 (1999).
3. Ramasamy, E.V., and Abbasi, S.A. “Energy recovery from dairy wastewaters: impacts of biofilm support systems on anaerobic CST reactors”, *Applied Energy* 65: 91-98 (2000).
4. Üçüncü, M., “A’dan Z’ye peynir teknolojisi”, *Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları*, İzmir, 2:1146-1157 (2004).
5. Uraz, T., Güneş, T., Sezgin, E., “Süt ve Mamülleri Teknolojisi”, Türkiye Cumhuriyeti Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, *Sınai Eğitim ve Geliştirme Merkezi Genel Müdürlüğü Yayınları*, Ankara, 208-214 (1981).
6. Yeğin, S., “Peyniraltı suyunun değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 4-9 (1995).
7. PPM Kirlilik Önleme Mühendislik Müşavirlik Şirketi “Süt İşletmeleri İçin ÇED Raporu” *Ankara*, 25-37 (2003).
8. Alpaslan, N., “Arıtma Çamurları” Atıksu Arıtma Tesislerinin Tasarım ve İşletim Esasları Kurs Notları, *İzmir*, 1-3 (2004).
9. Filibeli, A., “Arıtma Çamurlarının İşlenmesi ”, *D.E.Ü Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü*, 2. Baskı, 72-92 (1998).
10. Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü Ankara Araştırma Enstitüsü, “Biyokatıların arazide kullanımı”, *ASKİ, Ankara*, 1-12 (2002).
11. Akturman, F., “Atıksu arıtımı ve arıtma teknikleri”, *Bilim ve Teknik*, 428:42-52 (2003).
12. Toprak, H., “Çamurların susuzlaştırılması”, Çevre Mühendisliği Uygulamaları, *TMMOB Çevre Mühendisleri Odası*, Ankara, 153-160 (2002).
13. “Atıksu Arıtma Tesisi Tanıtım Buroşürü”, *ASKİ*, Ankara, 18-32 (2006).
14. Ayvaz, Z., “Atıksu arıtma çamurlarının değerlendirilmesi”, *Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümü*, İzmir, 9 (35): 3-12 (2000).

15. Gökçay, C., Demirer, G.N., Ergüder, T.H., N.V. ve Tezel, U., “ Anaerobik arıtımı teorik altyapı ve uygulamaları eğitim semineri notları”, **TMMOB Çevre Mühendisleri Odası**, Ankara Şubesi, 47-55 (2002).
16. Speece, R.E., ”Anaerobic biotechnology for industrial wastewater”, **Arche Press**, Tennessee, 34-67 (1996).
17. Kestioğlu, K., “Atıksu arıtımında biyokimyasal prosesler”, **Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü**, Bursa, 1:219-225 (2001).
18. Duran, M., Demirer G.N., “Atıksu arıtımı ve anaerobik biyoteknoloji”, Atıksu Arıtma Sistemleri Semineri Notları, **TMMOB Çevre Mühendisleri Odası**, Ankara Şubesi, 19-23 (1997).
19. Gökçay, C.F., Duran, M.M. ve Demirer, G.N., ”Anaerobik biyoteknoloji teorik altyapı ve uygulamalar”, **IV. Ulusal Çevre Müh. Kongresi**, İçel, 7-10 Kasım (2001).
20. Aydemir, D., “Peyniraltı suyunun anaerobik arıtımı ve biyogaz üretimi ”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 12-14, 27-29, 31-43 (2003).
21. Ferry, J. G. “Methanogenesis, ecology, physiology, biochemistry and genetics”, **Chapman & Hall**, New York, 25 -33 (1993).
22. Bitton, G., “Wastewater microbiology”, **CRC Press**, USA, 229-245 (1994).
23. Lay, J.J., Li, Y.Y. and Noike, T., ” Influences of pH and moisture content on the methane production in high-solid sludge digestion”, **Water Research**, 31(6):1518-1524 (1997).
24. 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).
25. Van Den Berg, L., “Effect of temperature on growth and activity of a methanogenic culture utilizing acetate”, **Canad. J. of Microb.** 23(7):151-158 (1977).
26. Lin, C.Y., Noike, T., Sato, K. and Matsumoto, J., “Temperature characteristics of the methanogenesis process in anaerobic digestion”, **Water Science and Technology**, 19: 299-310 (1987).
27. Uğurlu, A., “Anaerobik arıtma sistemleri”, **Çevre ve Mühendis**, Ankara, 3(6): 19-22 (1995).

28. Desai, M., Patel, V. and Madamvar, D., "Effect of temperature and retention time on biomethanation of cheese whey-poultry waste-cattle dung", *Environmental Pollution*, 83: 311-315 (1994).
29. Ahn, J-H., Forster, C.F., "The effect of temperature variations on the performance of mesophilic and thermophilic anaerobic filters treating a simulated papermill wastewater", *Process Biochemistry*, 37: 589-594 (2002).
30. Eismann, F., Glindemann, D., Bergmann, A. and Kusch, P., "Effect of free phosphine on anaerobic digestion", *Water Research*, 31(11):2771-2774 (1997).
31. G. Zayed, G. and Winter, J., "Short contribution: Inhibition of methane production from whey by heavy metals-protective effect of sulfide", *Applied Microbiology and Biotechnology Abstract*, 53(6):726-731 (2000).
32. Vijayaraghavan, K., and Murthy, D.V.S., "Effect of toxic substances in anaerobic treatment of tannery wastewaters", *Bioprocess Engineering Abstract*, 16(3):151-155 (1997).
33. Filibeli, A., Büyükkamacı, N. ve Ayol, A., "Anaerobik arıtma", *DEÜ, Müh. Fak. Yayınları*, İzmir, 280:21-46 (2000).
34. Tüzüm, A. P., " Yemek atıklarının anaerobik arıtımı ve biyogaz üretimi ", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 14-43, 44-52 (2003).
35. Demirer G., Duran M., Zitoimer D., Speece R., " Anaerobik biyoteknoloji ile endüstriyel atıksu arıtımı", *2. Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi*, İstanbul, 387-392 (1997).
36. Rajeshwari, K.V., Balakrishnan, M., Kansal, A., Lata, K. and Kishore, V.V.N., "State-of-the-art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4:135-156 (2000).
37. Karataş, A., "Tavuk gübresinin anaerobik parçalanması için uygun koşulların belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 3-7, 21-23, 27-28 (2006).
38. Barber, W.P., and Stuckey, D.C. "The use of the anaerobic baffled reactor (ABR) for wastewater treatment: a review", *Water Research*, 33(7):1559-1578 (1999).
39. Van den Berg, L. and Kennedy, K.J., "Performans characteristics of anaerobic downflow fixed film reactors", 1st International Symposium on Fixed Film Processes, *Kings Island*, 26-53 (1982).

40. Bayrakçeken, H., Biyogaz retim sistemi tasarımı ve uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon, 20-24 (1997).
41. Eryılmaz H., “ Biyogaz retiminde türkiye koşullarına en uygun üreteç tipinin tespiti” , *T.C. Köy İşleri ve Kooperatifler Bakanlığı Topraksu Genel Müdürlüğü Merkez Topraksu Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü yayınları*, Ankara, 21 (1981).
42. elik, D., ift fazlı sistemde 2- feniletanoln fenilasetaldehite biyotransformasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 35-42 (2001).
43. Çetinkaya, A., “Aspergillus niger (ATCC 6275 ve NRRL 599) fermentasyonu ile şeker pancarı melasından sitrik asit üretiminde optimum koşulların belirlenmesi” Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 17-34 (2002).
44. Omil, F., Garido, J.M., Arrajo, B., and Mendez, R. “Anaerobic filter reactor performance for the treatment of complex dairy wastewater at industrial scale”, *Water Research*, 37: 4099-4108 (2003).
45. İnce, O. “Preformance of a Two-phase anaerobic digestion system when treating dairy wastewater”, *Water Research*, 32(9): 2707-2713 (1998).
46. Han QING YU, and FANG, Herbert H.P., “Asidification of mid-and high-strength dairy wastewaters”, *Water Research*, 35: 3697-3705 (2001).
47. Gavala, H.N., Kopsinis, H., Skiadas, I.V., Stamatelatou, K., and Lyberatos, G. “Treatment of dairy wastewater using an upflow anaerobic sludge blanket reactor”, *J. Agric. Engng Res.*, 73: 59-63 (1999).
48. Nadais, H., Capella, I., Arroja, L., and Duarte, A. “Optimum cycle time for intermittent UASB reactors treating dairy wastewater”, *Water Research*, 2164-2175, January (2005).
49. Punal, A., Mendez-Pamain, R.J., and Lema, J.M. “Characterization and comparision of biomasses from single- and multi-fed upflow anaerobic filltres”, *Biosource Technology*, 68: 293-300 (1999).
50. Ramasamy, E.V., and Abbasi, S.A. “Energy recovery from dairy wastewaters: impacts of biofilm support systems on anaerobic CST reactors”, *Applied Energy*, 65:91-98 (2000).
51. İnce, B.K. and İnce, O. “Changes to bacterial community make-up in a two-phase anaerobic digestion system”, *Chem Technol Biotechnol*, 75: 500-508 (2000).

52. Farizoğlu, B., Keskinler, B., Yıldız, E., Nuhoglu, A. "Cheese whey treatment performance of an anaerobic jet loop membrane bioreactor", *Process Biochemistry*, 39: 2283-2291 (2004).
53. Uemura, S. and Harada, H., "Treatment of sewage by a UASB reactor under moderate to low temperature conditions", *Bioresource Technology*, 172:275-282 (2000).
54. Demirer, G.N., Duran, M., Ergüder, T.H., Güven, E., Ugurlu, O. and Tezel, U., "An anaerobic treatability and biogas production potential studies of different agro-industrial wastewaters in Turkey", *Biodegradation*, 11:401-405 (2000).
55. Callaghan, F.J., Wase, D.A.J., Thayanithy, K. and Forster, C.F., "Continuous co-digestion of cattle slurry with fruit and vegetable wastes and chicken manure", *Biomass and Bioenergy*, 27:71-77 (2002).
56. Ghally, A.E., "A comparative study of anaerobic digestion of acid cheese whey and dairy manure in a two-stage reactor", *Bioresource Technology*, 58:61-72 (1996).
57. APHA, "Standart methods for the examination of water and wastewater", *American Public Health Association*, 20th Edition, Washington D.C., 5-13 (1998).
58. "ASKİ Merkez Laboratuvarları- Su ve Çevre Kimyası Analizleri", *ASKİ*, Ankara, 1 (2000).
59. "Su ve Atıksu Analizleri Laboratuvar Notları", *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi*, İzmir, 72:122 (1984).

EKLER

EK-1 KOİ kalibrasyon eğrisi

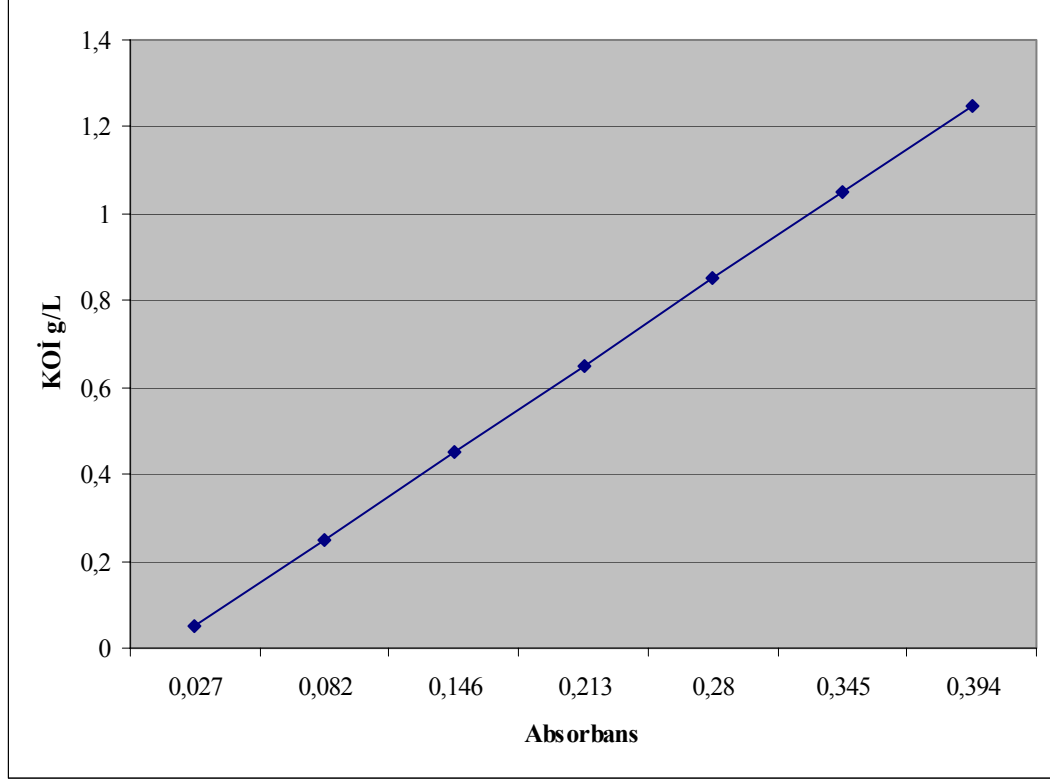
Spektrofotometrede, spektrofotometrik yöntemle, KOİ ölçümü yapabilmek ve elde ettiğimiz absorbans değerlerinden KOİ değerini tayin edebilmek için gerekli olan A ve B değerlerini elde edebilmek için kalibrasyon eğrisinin oluşturulması gerekmektedir

Bunun için potasyum hidrojen fitalat stok çözeltisi; 110 °C’de sabit tartıma getirilmiş olan KHP’den 4,2517 gram tartılıp, 500 mL’ye tamamlanarak hazırlandı. Bu stok çözelti 10 g/L KOİ’ye eşdeğerdir. Daha sonra bu stok çözeltiden sırasıyla 0,5 mL, 2,5 ml, 4,5 mL, 6,5 mL, 8,5 mL, 10,5 mL, 12,5mL ve 15 mL’lik örnekler alınarak 100 mL’ye seyreltildi. Daha sonra, seyreltilmiş bu örneklerden 2’şer mL alınarak hazır kitlerin üzerine ilave edilerek, kit tüplerinin kapakları sıkıca kapatılıp çalkalanarak ısıtıcıya yerleştirildi. 2 saat 105 °C’de kaynatılan tüpler, oda sıcaklığına kadar soğutulduktan sonra spektrofotometrede, 600 nm dalga boyunda absorbans değerleri ölçüldü. Fitalat değerlerine karşılık gelen KOİ değerleri ile, okunan absorbans değerlerinin oluşturduğu kalibrasyon eğrisinin eğiminden, A ve B değerleri elde edilmiştir.

<u>KOİ g/L</u>	<u>Absorbans (x)</u>
0,050	0,027
0.250	0,082
0,450	0,146
0,650	0,213
0,850	0,28
1,050	0,345
1,250	0,394

Buna göre R^2 değeri 0,99816 olarak bulunmuş ve $A=3\ 166,97$ $B=-20,95$ olarak tespit edilmiştir.

EK-1 (Devam) KOİ Kalibrasyon eğrisi



Şekil 1.1. KOİ Kalibrasyon Eğrisi

EK-2 KOİ hesaplamalarına dair örnek

Arıtma çamurunun başlangıç KOİ değerinin hesabı:

Arıtma çamurundan alınan 1ml'lik örnek 50 ml'ye seyreltilip ardından bu 50 ml'lik örnekten 2ml alınıp hazır kitlerin üzerine ilave edildi. Kit tüpünün kapağı iyice kapatılıp, tüp çalkalandıktan sonra ısıtıcıda 2 saat kaynatıldı. Soğuyan kit, 600 nm dalga boyuna ayarlanmış spektroda okunarak absorbans (x) değeri 0,042 olarak tayin edildi. Buna göre;

KOİ değeri(y);

$y = A \cdot x + B$ formülü kullanılarak

$$y = [(3\ 166,97) \cdot (0,042)] + (-20,95)$$

$$y = 112,06274$$

Başlangıçta 50 kat seyreltme yapıldığı için;

$$y = (112,06274) \cdot (50)$$

$y = 5\ 603,137$ mg/L KOİ olarak bulundu.

EK-3 KOİ'deki azalma yüzdesi için design expert paket programında bulunan değerler

Çizelge 3.1. 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	4,68	0,3098	0,1804	-0,0149	516,32	
2FI	4.75	0,4225	0,1559	-0,5805	804,05	
Quadratic	1.32	0,9655	0,9345	0,7336	135,54	Suggested
Cubic	0.32	0,9988	0,9962	0,9021	49,80	Aliased

Çizelge 3.2. 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	488,19	8	61,02	32,66	< 0,0001	significant
A-X ₁	106,70	1	106,70	57,11	< 0,0001	
C-X ₃	47,89	1	47,89	25,63	0,0004	
AB	10,87	1	10,87	5,82	0,0345	
AC	28,16	1	28,16	15,07	0,0026	
BC	18,29	1	18,29	9,79	0,0096	
A ²	83,95	1	83,95	44,93	< 0,0001	
B ²	175,88	1	175,88	94,14	< 0,0001	
C ²	66,48	1	66,48	35,58	< 0,0001	
Residual	20,55	11	1,87			
Lack of Fit	20,17	6	3,36	44,23	0,0004	significant
Pure Error	0,38	5	0,076			
Cor Total	508,74	19				

EK-3 (Devam) KOİ'deki azalma yüzdesi için design expert paket programında bulunan değerler

Çizelge 3.3. 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	37,13	1	0,56	35,90	38,36	
A-X ₁	2,80	1	0,37	1,98	3,61	1,00
C-X ₃	1,87	1	0,37	1,06	2,69	1,00
AB	1,17	1	0,48	0,10	2,23	1,00
AC	1,88	1	0,48	0,81	2,94	1,00
BC	-1,51	1	0,48	-2,58	-0,45	1,00
A ²	-2,41	1	0,36	-3,21	-1,62	1,02
B ²	-3,49	1	0,36	-4,29	-2,70	1,02
C ²	-2,15	1	0,36	-2,94	-1,36	1,02

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ÖZTÜRK Esra
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 04.05.1981 Ankara
 Medeni hali : Bekar
 e-mail : esraozturk1@gmail.com

Eğitim Derece

Eğitim Birimi

Mezuniyet tarihi

Lise	Ankara İnönü Lisesi	1999
Lisans	Akdeniz Üniversitesi/Çevre Mühendisliği Bölümü	2003
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi/Çevre Bilimleri A.B.D.	2007

İş Deneyimi

Yıl

Yer

Görev

2006-	Çankırı İl Çevre ve Orman Müdürlüğü	Mühendis
-------	-------------------------------------	----------

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Halk oyunları, yüzme