

**PEYNİRALTI SUYUNDAN SÜREKLİ SİSTEMDE
BİYOĞAZ ÜRETİMİ İÇİN EN UYGUN KOŞULLARIN
BELİRLENMESİ**

Nurgül YİĞİT

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2007
ANKARA**

Nurgül YİĞİT tarafından hazırlanan PEYNİRALTI SUYUNDAN SÜREKLİ SİSTEMDE BİYOGAZ ÜRETİMİ İÇİN EN UYGUN KOŞULLARIN BELİRLENMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. S. Ferda MUTLU
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği / oy çokluğu ile KİMYA MÜHENDİSLİĞİ Anabilim Dalında Yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: : Prof. Dr. Bekir Zühtü UYSAL

Üye : Prof. Dr. Nurdan SARAÇOĞLU

Üye : Prof. Dr. Serpil TAKAÇ

Üye : Doç. Dr. İrfan AR

Üye : Yrd. Doç. Dr. S. Ferda MUTLU

Tarih : 20 / 06 / 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 sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Nurgül YİĞİT

**PEYNİRALTI SUYUNDAN SÜREKLİ SİSTEMDE BİYOGAZ ÜRETİMİ
İÇİN EN UYGUN KOŞULLARIN BELİRLENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Nurgül YİĞİT

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Haziran 2007**

ÖZET

Bu çalışmada, Atatürk Orman Çiftliği (AOÇ) Peynir Üretim Tesislerinden alınan ve başlangıçta 70 000 mg KOİ/L değerinde organik yüke sahip olan peyniraltı suyunun yukarı akışlı çamur yataklı anaerobik (YAÇYA) reaktörlerde arıtılabilirliği ve biyogaz üretimi için uygun koşullar araştırılmıştır. Peyniraltı sularında 1/20, 1/10, 1/5, 1/4, 1/3 ve 1/2 oranında seyreltmeler yapılarak besleme olarak kullanılmış ve bu parametrelerin biyogaz üretimi üzerine olan etkileri incelenmiştir.

3,4 litre hacminde paralel bağlı iki YAÇYA reaktör (R1 ve R2) kullanılmış ve başlangıçtaki aşılama işlemi Ankara Merkezi Atık Su Arıtma Tesisi (ASKİ) anaerobik aktif çamur arıtma reaktörlerinden sağlanan özümleyiciler ile yapılmıştır. Deneyler süresince reaktörlerdeki 35°C sıcaklık reaktör ceketindeki su döngüsüyle sağlanmıştır. Peyniraltı suyu (PAS) reaktörlere peristaltik pompalarla 0,56mL/dk hızında beslenmiştir. Her iki reaktör de uygulanan organik yükleme hızlarında 4 günlük hidrolik alıkoyulma süresinde çalıştırılmıştır. R1’de belli bir süre, değişen hızlarda geri döngü kullanılmıştır. Başlangıçta R1’de 1,8 cm, R2’de 1,6 cm çamur bulunan reaktörlere 1/10 seyreltme oranında verilen PAS ile granül oluşumu ve KOİ (kimyasal oksijen ihtiyacı) değişimleri gözlenmiş, 50 gün sonunda R1’de granül yüksekliği 6,5 cm %KOİ giderimi 38,51; R2’de granül yüksekliği 8,0 cm ve %KOİ giderimi 38,22 olarak bulunmuştur. Değişik KOİ derişimlerinde

verilen beslemeler içinden en yüksek biyogaz ve dönüşüm verimi PAS'ın 1/2 oranında seyreltilmesi ile elde edilmiştir. Sonuçta R1 reaktöründe gaz üretim hızı $0,68 \text{ cm}^3/\text{dk}$, metan yüzdesi %49,79 ve yatak yüksekliği 20,50 cm, R2 reaktöründe gaz üretim hızı $0,29 \text{ cm}^3/\text{dk}$, metan yüzdesi %27,93 ve yatak yüksekliği 18,00 cm olarak bulunmuştur.

Bilim Kodu : 912.1.086

Anahtar Kelimeler : Peyniraltı suyu, yukarı akışlı çamur yataklı anaerobik reaktör, anaerobik arıtma, biyogaz, çamur granülü

Sayfa Adedi : 98

Tez Yöneticisi : Yrd.Doç.Dr.S.Ferda MUTLU

**DETERMINATION OF OPTIMUM CONDITIONS FOR BIOGAS
PRODUCTION FROM CHEESEWHEY USING CONTINUOUS SYSTEMS**

(M.Sc. Thesis)

Nurgül YİĞİT

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

June 2007

ABSTRACT

In this study, anaerobic treatability of cheese whey in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors and the optimum conditions for biogas production were investigated. Cheese whey taken from the AOÇ cheese producing industries has 70 000mgCOD/L organic load initially. Cheese whey was diluted by the ratios of 1/20, 1/10, 1/5, 1/4, 1/3 and 1/2, respectively. These mixtures were used as the feed solution in the UASB experiments and influence of these parameters was investigated for biogas production.

Two parallel UASB reactors of 3,4 liters volume (R1 and R2) were used. Reactors were inoculated with the anaerobic activated sludge taken from ASKİ wastewater treatment industry. Throughout the period of the experiments, the reactors were operated at 35°C by the water recirculation through jackets around the reactors. Cheese whey was fed to the UASB reactors at a rate of 0,56 mL/min with using peristaltic pumps. Both reactors were operated at a hydraulic retention time of 4 days at applied organic loading rates. Recycle with different flow rates was used in R1 for some time. The initial sludge height was 1,8 cm for R1 and 1,6 cm for R2. Granule formation and COD (chemical oxygen demand) reduction with using 1/10 dilution of cheese whey were observed. After 50 day, the height of granular sludge bed was observed 6,5 cm for R1 and 8,0 cm for R2 with COD removal efficiencies of 38,51% and 38,22% for R1 and R2,

respectively. Maximum biogas production and COD removal efficiency was obtained with 1/2 dilution of cheese whey used at different COD concentrations. Consequently, gas production rate was obtained 0,68 cm³/min and 0,29 cm³/min with methane content of 49,79% and 27,93% and granular sludge bed of 20,50 cm and 18,00 cm for R1 and R2, respectively.

Science Code	: 912.1.086
Key Words	: Anaerobic treatment, UASB, cheese-whey, biogas, sludge granule
Page Number	: 98
Adviser	: Asst.Prof.Dr.S.Ferda MUTLU

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Hocam Yrd.Doç.Dr.S.Ferda MUTLU'ya ayrıca laboratuvar çalışmalarındaki katkılarından dolayı tüm arkadaşlarıma, manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen çok değerli aileme özellikle kardeşim Murat Yiğit'e ve desteğinden dolayı hayatımda çok önemli bir yeri olan Serdal Dönmez'e çok teşekkür ederim. Ayrıca çalışmam için sağlamış olduğu cihaz katkılarından dolayı Temiz Enerji Araştırma ve Uygulama Merkezi Müdürü Sayın Prof.Dr.Bekir Zühtü UYSAL'a ve 06/2006-25 kodlu projemize vermiş olduğu maddi destek dolayısıyla Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ	1
2. PEYNİRALTI SUYU	3
2.1. Peyniraltı Suyunun Bileşimi.....	4
2.2. Peyniraltı Suyunun Çevresel Etkileri.....	10
2.3. Peyniraltı Sularının Arıtılması.....	11
2.4. Anaerobik Arıtım Süreci.....	14
2.4.1. Anaerobik arıtım temelleri ve mikrobiyolojisi.....	16
2.4.2. Anaerobik arıtım biyokimyası.....	22
2.4.3. Anaerobik arıtım süreçleri için optimum çevre koşulları.....	24
2.4.4. Anaerobik arıtımın üstünlük ve sakıncaları.....	35
2.4.5. Anaerobik arıtım süreçlerinin işletmeye alınması ve süreç denetimi...37	
2.5. Anaerobik Arıtma Sistemleri.....	39
2.5.1. Geleneksel anaerobik reaktörler.....	40
2.5.2. Yukarı akışlı çamur yataklı anaerobik reaktörler.....	40

Sayfa

2.5.3. Anaerobik temas reaktörler.....	40
2.5.4. Anaerobik filtreler.....	41
2.5.5. Anaerobik akışkan yataklı reaktörler.....	41
2.5.6. İki kademeli anaerobik reaktörler.....	42
2.6. Yukarı Akışlı Çamur Yataklı Anaerobik Reaktörler.....	43
2.6.1. Yukarı akışlı çamur yataklı anaerobik reaktörlerin işletilmesi.....	45
2.6.2. YAÇYA reaktörlerin işletmeye alınmasındaki zorluklar.....	48
2.7. Biyogaz.....	49
2.7.1. Biyogazın özellikleri.....	49
2.7.2. Biyogaz üretiminde kullanılan organik atıklar.....	50
2.7.3. Biyogazın diğer yakıtlarla karşılaştırılması.....	51
2.7.4. Biyogazın kullanım alanları.....	52
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	53
4. MATERYAL VE YÖNTEM	57
4.1. Deney Düzenegi.....	57
4.2. Yapılan Analizler ve Yöntemleri.....	61
4.2.1. Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) tayini (Spektrofotometrik yöntem).....	62
4.2.2. Toplam kjeldahl azotu (TKA) tayini.....	64
4.2.3. Toplam katı madde (TKM) tayini.....	65
4.2.4. Uçucu ve sabit katı madde (UKM, SKM) tayini.....	66
4.2.5. Alkalinite tayini.....	67
4.2.6. Uçucu asit (UA) tayini.....	69

	Sayfa
4.2.7. Gaz ölçüm yöntemi.....	70
5. BULGULAR.....	71
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	87
KAYNAKLAR	91
EKLER.....	96
EK-1 Kalibrasyon eğrisi.....	97
ÖZGEÇMİŞ.....	98

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. 100 ml peyniraltı suyunun kimyasal bileşimi	5
Çizelge 2.2. Başlıca anaerobik mikroorganizma grupları.....	17
Çizelge 2.3. Enzimatik hidrolize katkıda bulunan mikroorganizmalar.....	17
Çizelge 2.4. Asit oluşturan mikroorganizmalar ve oluşturdıkları asitler	18
Çizelge 2.5. Anaerobik mikroorganizmalar için optimum çevre koşulları.....	25
Çizelge 2.6. Alkali ve toprak alkali metallerin yavaşlatma derişimleri	30
Çizelge 2.7. Anaerobik arıtmaya amonyak azotu (NH ₃ -N) etkisi	31
Çizelge 2.8. İz elementlerin farklı atık sulardaki yararlı konsantrasyon değerleri	34
Çizelge 2.9. Anaerobik arıtmada proses kontrolü amacıyla izlenmesi gereken parametreler.....	38
Çizelge 2.10. Biyogazın bileşimi	50
Çizelge 2.11. Çeşitli kaynaklardan elde edilebilecek biyogaz verimleri ve biyogazdaki metan miktarları.....	51
Çizelge 4.1. Kullanılan aşı çamurunun özellikleri	60
Çizelge 4.2. Kullanılan peyniraltı suyunun bileşimi.....	60
Çizelge 5.1. Belirli zamanlarda ölçülen günlük pH değerleri.....	72
Çizelge 5.2. Farklı organik yüklemelerde elde edilen %KOİ giderimleri.....	74
Çizelge 5.3. Değişen organik yükleme hızlarındaki KOİ giderimleri.....	77
Çizelge 5.4. Zamanla artan çamur yatağı yüksekliğinin metan yüzdesi üzerine etkisi.....	80
Çizelge 5.5. Alıştırma ve granül oluşturma devresinde çıkış suyunda ölçülen alkalinite ve uçucu asit değerleri.....	84
Çizelge 5.6. Farklı organik yüklerde elde edilen çıkış suyu alkalinite ve uçucu asit değerleri.....	85

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Organik maddelerin anaerobik ayrışma aşamaları.....	16
Şekil 2.2. Anaerobik arıtımın ikinci basamağında oluşan asitler.....	18
Şekil 2.3. Anaerobik arıtmada asetik asit oluşumu.....	19
Şekil 2.4. Metan oluşum basamağı	21
Şekil 4.1. Deney düzeneğinin şematik gösterimi	58
Şekil 5.1. Reaktör 1’de organik yük ile %KOİ giderimi arasındaki ilişki.....	75
Şekil 5.2. Reaktör 2’de organik yük ile %KOİ giderimi arasındaki ilişki.....	76
Şekil 5.3. Reaktör 1’de organik yükleme hızının KOİ giderimi üzerine etkisi.....	77
Şekil 5.4. Reaktör 2’de organik yükleme hızının KOİ giderimi üzerine etkisi.....	78
Şekil 5.5. Reaktör 1’de zamana bağlı olarak değişen %metan ve yatak yükseklikleri.....	81
Şekil 5.6. Reaktör 2’de zamana bağlı olarak değişen %metan ve yatak yükseklikleri.....	81
Şekil 5.7. Reaktör 1’de uygulanan organik yük ile yatak yüksekliği ve %metan arasındaki ilişki.....	82
Şekil 5.8. Reaktör 2’de uygulanan organik yük ile yatak yüksekliği ve %metan arasındaki ilişki.....	83
Şekil 5.9. Zamana bağlı olarak çamur yatağı yüksekliğindeki değişim.....	84
Şekil 5.10. Reaktör 1’de uygulanan organik yüklerin alkalinite ve uçucu asit üzerine etkisi.....	86
Şekil 5.11. Reaktör 2’de uygulanan organik yüklerin alkalinite ve uçucu asit üzerine etkisi.....	86

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Anaerobik çamur granülleri.....	44
Resim 4.1. Deney düzeneği.....	59
Resim 4.2. KOİ ölçümünde kullanılan reaktör ve deney tüpleri.....	63
Resim 5.1. Reaktörde gelişen çamur granülleri.....	79

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Kısaltmalar	Açıklama
AOÇ	Atatürk Orman Çiftliği Süt ve Süt Ürünleri Fabrikası
ASKİ	Ankara Merkezi Atık Su Arıtma Tesisi
AKM	Askıda katı madde
BOİ	Biyokimyasal oksijen ihtiyacı
EGSB	Geliştirilmiş granüllü çamur yataklı reaktör
HAS	Hidrolik alıkoyulma süresi
KOİ	Kimyasal oksijen ihtiyacı
OYH	Organik yükleme hızı
PAS	Peyniraltı suyu
R1	Birinci reaktör
R2	İkinci reaktör
SKM	Sabit katı madde
TKA	Toplam kjeldahl azotu
TKM	Toplam katı madde
TUA	Toplam uçucu asit
UKM	Uçucu katı madde
UA	Uçucu asit
UAS	Uçucu madde alıkoyulma süresi
YAÇYA	Yukarı akışlı çamur yataklı anaerobik

1. GİRİŞ

Tüm dünya ülkelerinde olduğu gibi ülkemizde de endüstriyel alandaki yatırımlar giderek artmakta; gelişen endüstriyel etkinliklere ve evlerden oluşan atıklara bağlı olarak doğanın dengesi bozulmakta ve böylece önemli çevresel sorunlar oluşarak insan yaşamını olumsuz etkilemektedir. Ekolojik dengenin bu şekilde bozulması çevre kirlenmesi olarak kabul edilmektedir.

Endüstriyel kirlenme, gerek karşılaşılan kirlenme sorunlarının çok ve çeşitli olması gerekse doğanın korunması ve bu amaçla alınacak önlemlerin dengesi yüzünden en karmaşık kirlenme şeklini oluşturmaktadır. Endüstriyel atık suların hiçbir işlem uygulanmadan alıcı su ortamlarına atılması bugün gelişen dünyanın en tehlikeli ve önemli sorunlarından birisidir. Ülkemizde ise 20. yüzyılın ortalarında başlayan ve giderek hızlanan endüstrileşme sürecinde, özellikle gıda, tekstil, kimya gibi sektörler öne çıkmaktadır. Gıda sektörünün önemli bir yan kolu olan süt ve süt ürünlerinin üretimi ve işlenmesi, hem üretim kapasitesi hem de çevreye verdiği kirlilik yükü bakımından ülkemizde önemli bir yer tutmaktadır.

Süt ve süt ürünleri işletmelerinde oluşan atık su kaynakları; ısıtma ve soğutma sistemlerinden gelen sular, tesis ve makinelerin yıkanmasından gelen atık sular ve peyniraltı sularıdır. Atık su miktar ve özellikleri, üretim şekli ve ürün çeşidine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Peyniraltı suyu dışında oluşan atık sular, süt endüstrisinde atık su miktarının büyük, kirlilik yükü bakımından ise küçük bir kısmını oluşturmaktadır. Süt endüstrisinde toplam kirlilik yükünün büyük kısmını peyniraltı suları oluşturmaktadır. Peyniraltı suyu (PAS), sütün peynire dönüşümü sırasında pıhtılaşmayan, bileşiminde laktoz, protein, mineral madde ve yağ bulunan yeşilimsi-sarı renkte bir sıvıdır. Miktarı az, kirlilik derişimi yüksek ancak biyolojik parçalanabilirliği oldukça kolaydır.

Ülkemizde süt ve süt ürünleri işleten birçok üretim tesisi etkinlik göstermektedir. Bunlardan bir kısmının arıtma tesisi bulunmamakta, diğer bir kısmının ise atık su

arıtma tesisi bulunsa dahi önemli işletme sorunları ile karşılaşmaktadır. Bundan dolayı yapılan bu çalışmada kirlilik derişimi oldukça yüksek olan peyniraltı sularının anaerobik olarak arıtılabilirliği incelenmiş ve arıtım sonucu üretilen biyogaz için en uygun koşullar araştırılmıştır. Anaerobik arıtma sistemi olarak aynı boyutlarda paralel bağı 2 adet laboratuvar ölçekli yukarı akışlı çamur yataklı anaerobik reaktör kullanılmıştır. Reaktörlerden birinde belli bir süre zarfında değışen hızlarda geri döngü kullanılmıştır. Kullanılan peyniraltı sularının kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) derişimi çok yüksek olduğundan atık su seyreltmesi yapılarak organik yük değıştirilmiştir. Her bir organik yükün reaktörün arıtma verimine ve oluşan çamur yatağı yüksekliğı ile bağlantılı olarak elde edilen gazdaki metan yüzdesi üzerine etkisi incelenmiştir. Reaktörlerde granülasyonu sağlamak amacı ile belli miktarda çamur aş ı maddesi olarak kullanılmıştır. Alıştırma ve granül oluşturma devresinden sonra bir yandan organik yük artırılırken bir yandan da azot eksikliğini gidermek amacı ile amonyum klorür (NH_4Cl) eklenmiştir. Ayrıca mikroorganizmaların gerek duyduğu iz elementlerinden demir eklenmesi ile çamur yatağı yüksekliğinde oluşan değışimler gözlenmiştir. 75 gün boyunca sürdürülen çalışmada günlük olarak pH, KOİ, alkalinite, uçucu asit analizleri yapılmıştır. Yatak yüksekliğı ile oluşan gazda metan yüzdesindeki değışimi görmek amacıyla sık sık gaz ölçümleri yapılmıştır.

2. PEYNİRALTI SUYU

Peyniraltı suları, süt endüstrisinin peynir yapımı sırasında sütün kazeininin çöktürülerek alınması işleminde ortaya çıkan içeriği zengin bir yan üründür. Sütün peynir ve kazeine işleniş sırasında maya enziminden ve asitten etkilenmeyerek pıhtılaşmayan laktalbumin, laktoglobulin gibi serum proteinleri ile laktoz ve mineral maddelerden oluşur. Pıhtı oluşumunu sağlayan bu maya ve asitten dolayı pH değeri 4,4-6,6 arasında değişebilir. Yeşilimsi sarı renkte olup, rengini içerdiği laktoflavinden alır [1]. Biyolojik parçalanabilirliği kolay, kirlilik derişimi yüksek olan peyniraltı suları genel olarak yüksek biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ), kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) ve toplam katı madde (TKM) içeren atık sulardır. Biyokimyasal oksijen ihtiyacı, peynir yapım sürecine bağlı olarak 30000-60000 mg/L arasında değişir [2]. Çözünmüş KOİ derişiminin, toplam KOİ derişimine oranı yüksek olup (0,75), KOİ derişimi 95000mg/L'ye kadar çıkabilir [3]. Yüksek miktarda katı madde içeren peyniraltı sularının çözünmüş formu içerdiği laktozdan dolayı oldukça fazladır.

Peyniraltı suyu işlenen sütün hacminin %85-95'lik bir kısmını oluşturur ve süt besinlerinin %55'i kadarını bünyesinde bulundurur. 1 kg peynir yapımı sırasında 9 kg peyniraltı suyu oluşur. Peyniraltı suyu mevsime bağlı oluşan, süt endüstrisinin tekrar işlenebilen ve değerli başka ürünlere dönüştürülebilen bir yan üründür. Peynir endüstrisinin protein ve laktoz bakımından zengin bir yan üründür [4-5]. Bu zengin içeriğinden dolayı çevre kirliliğine neden olmaktadır. Bu nedenle ya arıtılması yada değerlendirilmesi gereklidir [6].

Peynir işletmelerinde yapılan peynirin türüne göre iki çeşit peyniraltı suyu üretimi gerçekleşir; asidik peyniraltı suyu ($pH < 5$) ve tatlı peyniraltı suyu ($6 < pH < 7$). Peyniraltı suyunun bu farklı işlenme formları peynir üretimi sırasında kazeinin farklı şekillerde çöktürülmesi ile gerçekleşir. $pH < 5$ olan peyniraltı suyunda daha yüksek kül ve daha az protein bulunmaktadır. Bu tür peyniraltı sularının sahip oldukları asidik tat ve yüksek tuz içerikleri nedeniyle besin olarak kullanımında önemli

sınırlamalar bulunmaktadır [7-8]. Peynirin maya enzimi veya asit ile elde edilmesine göre karakteri değişik olur. Asit ile yapılan peynirlerden süzülen atıksu ekşi peyniraltı suyunu oluştururken, maya enzimiyle yapılan peynirlerden süzülen atıksu tatlı peyniraltı suyudur. Aralarındaki en önemli fark, içerdikleri laktoz ve laktik asit miktarından kaynaklanmaktadır [1, 9].

2.1. Peyniraltı Suyunun Bileşimi

Peyniraltı suyunun bileşiminde yaklaşık olarak %6,96 oranında süt kuru maddesi bulunmaktadır. Bunda %0,36 yağ, %0,84 protein, %5,76 laktoz ve tuzlar, %0,2 kadar laktik asit yer almaktadır. Bu değerler çeşitli etkenlere bağlı olarak değişmektedir. Sütün bileşimi ve kullanılan peynir işleme yöntemlerine göre içerik değişmektedir. Peyniraltı suyunda vitaminler de yer almaktadır. Vitamin A çoğunlukla yağla birlikte peynire geçmekte çok az bir kısmı peyniraltı suyunda kalmaktadır. Vitamin B₁, B₂ ve C suda çözündüklerinden peynir suyunda kalmaktadır. Vitamin D çok az bulunmaktadır. Bunlardan başka peyniraltı suyunda potasyum oksit %0,188, sodyum oksit %0,075, kalsiyum oksit %0,071, magnezyum oksit %0,018, demir oksit %0,001, fosforpentoksit %0,11, klor %0,107 ve kükürttrioksit %0,029 kadar bulunmaktadır [10].

Peynir yapımından kalan yaklaşık %4-5 oranında laktoz içeren peyniraltı suyu mikrobiyolojik işlemler için iyi birer hammadde kaynağıdır. Peyniraltı suyunda bulunan kalsiyum, fosfor ve laktoz besin değerini yükseltmektedir. Peyniraltı suyu proteinleri yüksek nitelikli olup hayvanların beslenmesinde önemli bir kaynaktır. Çizelge 2.1’de 100 ml peyniraltı suyundaki kuru madde bileşimi gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. 100 ml peyniraltı suyunun kimyasal bileşimi [7]

Bileşen	Miktar	Ölçü Birimi
Kuru madde	6,3-7,0	g
Yağ	0,05-0,4	g
Ham protein	0,85-1,15	g
Karbonhidrat	4,6-5,2	g
Kül	0,5-0,6	g
Laktoz	4,6-5,2	g
Laktik asit	0,05-0,2	g
Sitrik asit	0,14-0,17	g
Kazein	0,04-0,05	g
α -laktoglobulin	0,12	g
β -laktoglobulin	0,32	g
Serum albümin	0,40	g
Immünoglobulinler	0,70	g
Na	36-51	mg
K	140-160	mg
Ca	40-50	mg
Mg	8-10	mg
Fe	0,10	mg
Cl	70-120	mg
P	40-55	mg
S	15-18	mg
Tiamin	0,03-0,05	mg
Riboflavin (B ₂)	0,1-0,16	mg
Piridoksin	0,04-0,07	mg
Vitamin C	0,9-1,5	mg
Vitamin A	0,002-0,004	mg

Dünya genelinde üretilen peyniraltı suyunun yaklaşık %50 kadarı işlenmekte ve çeşitli besin ürünlerine dönüştürülmektedir. Bu miktarın yaklaşık %45'i doğrudan sıvı formda, %30'u tozlaştırılmış peyniraltı suyu formunda, %15'i laktoz ve delaktoz yan ürünleri şeklinde ve geri kalanı ise peyniraltı suyu proteini konsantresi olarak kullanılmaktadır. Peyniraltı suyunun BOİ değerinin %75'inden fazlası biyogaz, etanol, tek hücre proteini ve diğer pazarlanabilir ürünlere dönüştürülerek yada doğrudan biyolojik arıtım yöntemleri ile giderilmektedir. Bununla beraber dünya peyniraltı suyu üretiminin %50'ye yakın kısmı halen atık olarak akarsulara, göllere ve denizlere boşaltılmaktadır. Yine de her geçen yıl dünyada oluşan yıllık peyniraltı suyu miktarı artmakta, beraberinde bunun kullanımı için gereken yeni arıtım ve işleme süreçleri geliştirilmektedir.

Peyniraltı suyunun sıvı şekilde kullanımı

Peyniraltı sularının doğrudan kullanım şekli olan sıvı şekilde tüketimi iki şekilde gerçekleştirilmektedir. Birincisi; herhangi bir işlem uygulanmadan çiftlik hayvanlarının içme suyuna karıştırılarak bir hayvan besini olarak kullanılmasıdır. Yüksek miktarda protein ve laktoz içeren peyniraltı suları bunun yanı sıra Ca, Mg, P ve suda çözünmüş vitaminler içermesi nedeniyle oldukça değerli bir besin özelliğine sahiptir. Ancak yüksek laktoz ve mineral madde içeriği nedeniyle sıvı formda kullanımı oldukça sınırlıdır. Peyniraltı sularının sıvı formda doğrudan kullanımının bir diğer şekli de toprağa gübre olarak verilmesidir. Ancak yüksek tuz içeriği ve taşımada karşılaşılan sorunlar nedeni ile bu şekilde kullanımı kısıtlıdır ve toprakta fazla miktarda tuz depolanmasına neden olabilir [4, 11-12].

Peyniraltı suyunun yoğunlaştırılarak veya tozlaştırılarak kullanımı

Toz haline getirme veya yoğunlaştırma işlemi ile taze peyniraltı sularının niteliği artırılarak hem raf ömrü uzamakta hem de taşımada kolaylıklar sağlanmaktadır. Amaca uygun olarak farklı şekillerde deriştirmek mümkündür. Asidik veya tatlı peyniraltı suyu tozu, demineralize peyniraltı suyu tozu, laktozu alınmış peyniraltı suyu tozu, deproteinize peyniraltı suyu tozu, yağca zenginleştirilmiş peyniraltı suyu tozu gibi formlarda toz ürünler elde edilebilir [7].

Üretilen bu toz ürünler, melas ve soya unu ile karıştırılarak hayvan yemi olarak kullanıldığı gibi, düşük oranlarda insan yiyeceklerine karıştırılarak da değerlendirilebilir. Bu yiyeceklerin başında bebek mamaları, dondurmalar, kekler, tatlandırıcılar ve süt ürünleri gelmektedir.

Peyniraltı suyunun proteyin konsantresi olarak kullanımı

Süt proteyininin yaklaşık %20'si peyniraltı suyuna geçmektedir. %50 β -laktoglobulin, %12 α -laktoglobulin, %10 immünoglobulinler, %5 serum albümin ve

%0,23 proteaz pepton peyniraltı suyundaki proteyinlerin başlıcalarıdır. Biyolojik değeri tüm yumurta proteyinlerinden daha yüksek olan peyniraltı suyu proteyinleri, diğer süt proteyinlerine oranla daha fazla amino asit içermektedir. Peyniraltı suyunun tuzlardan arındırılarak proteyin konsantresi haline getirilmesinde ultrafiltrasyon ve diafiltrasyon işlemleri kullanılmaktadır. Proteyinin yapısı bozulmadan peyniraltı suyu proteyinlerinin %30-60 kadarının geri kazanılmasını sağlayan bu yöntemlerde maliyet düşük ve süreç hızı yüksektir. [7]. Peyniraltı suyu ve proteyinlerinin hidroliz ürünleri, peptit karışımları üretiminde kullanılmaktadır. Bu işlem peyniraltı suyu ile yapılan çalışmalarda çözünürlüğü artırırken köpürmeyi engellemektedir. Böylece bu ürünler mikroorganizmalar tarafından daha kolay tüketilmektedir. Ayrıca peyniraltı suyu proteyinleri fosfolipid komplekslerinin hazırlanmasında da kullanılır, bu kompleksler sindirim sisteminde minerallerin absorpsiyonunu kolaylaştırmaktadır. Son yıllarda peyniraltı suyu proteyinleri, demir bağlı proteyinlerin üretilmesinde de kullanılmaktadır. Peyniraltı suyu proteyinleri deriştirilirken yüksek derişimlerde laktoz içeren peyniraltı suyu da üretilmektedir. Böylece kolaylıkla laktozca zengin ürünler elde edilmektedir.

Laktoz ve türevlerinin üretimi

Laktoz (süt şekeri), peyniraltı suyunun kristallendirilmesi ile elde edilir. Bebek mamalarında, hafif tat verme özelliğinden dolayı ilaç üretiminde kullanılır. Laktoz saflaştırma süreçleri 1940'da bulunduğu halde dünyadaki üretimin ancak %5'i bu amaçla kullanılmaktadır. Ayrıca laktozun hidrolizi ile elde edilen glikoz ve galaktozun doğrudan fermentasyonda kullanılmasına ilişkin süreçler de bulunmaktadır [7]. Hidrolize edilmiş laktoz çözeltileri, laktoza oranla daha tatlı olduğundan tatlı sektöründe kullanılabilmektedir. Glikoz, izomeraz enzimi kullanılarak fruktoza dönüştürülmekte ve daha yüksek oranda tatlandırıcılar elde edilebilmektedir. Laktozun tatlandırma derecesi laktitola indirgenmesiyle olasıdır ve böylece düşük kalorili yiyeceklerde katkı olarak kullanılabilir.

Laktoz, lakotsilüre üretiminde de kullanılmaktadır. Proteyin içermeyen azot kaynağı olarak özel fermentasyon ortamlarında kullanılan lakotsilüre ile zehirli olmayan amonyum düzeyinde çalışma koşulları sağlanmaktadır.

Laktozun alkali çözeltilerde izomerleştirilmesiyle laktulos (4-O-β-Galaktopiranosil-D-fruktoz) elde edilmektedir. Bağırsaklarda asitlerine parçalanan laktulos, bir osmotik basınç oluşturarak bağırsakların su kapasitesini artırır, böylece sindirimi kolaylaştırır. Ayrıca kandaki amonyumu temizlemede etkili olduğu için bu laktoz izomeri bazı akıl hastalıklarının tedavisinde kullanılır.

Etanol üretimi

Son yıllarda laktoz fermentasyonu ile etil alkol üretim süreçleri oldukça önem kazanmaktadır. İrlanda, ABD ve Yeni Zelanda'da peyniraltı suyunda yüksek miktarda bulunan laktozun etanole fermentasyonu amacıyla kurulmuş birçok büyük ölçekli tesis bulunmaktadır. Özellikle Yeni Zelanda'da üretilen peyniraltı suyunun %50'si etanol üretiminde kullanılmaktadır [4].

Laktozu doğrudan kullanarak etanol üreten pek çok mikroorganizma bulunmaktadır ancak bunların endüstriyel uygulamalarda kullanılanlarının en önemlisi *Kluyveromyces marxianus* ve türleridir. *Kluyveromyces marxianus* %95-100 oranında laktoz dönüştürme yeteneğine sahiptir. Laktozdan etanol üretimindeki kuramsal verim 0,538 kg etanol/laktoz'dur, fermentasyon çalışmalarında bu değerin %80-85'ine ulaşılmıştır.

İşletme maliyeti yüksek olduğundan deriştirilmemiş peyniraltı suyundan etanol üretimi önerilmez. Çünkü böyle ortamlarda %2'lik bir etanol derişimine ulaşılır ve bunu da damıtmak oldukça masraflıdır. Bu nedenle sürecin ekonomik olarak etkin hale getirilebilmesi için peyniraltı suyundaki laktozun deriştirilmesi gerekmektedir. Bazı mikroorganizmaların yüksek laktoz derişimlerinde %90'dan fazla dönüşüm ile

etanol ürettikleri belirlenmiştir. Ayrıca sürekli sistemde etanol üretimi, hem derişik hem de seyreltik laktoz çözeltilerinde gerçekleştirilmiştir.

Laktozu doğrudan tüketen ve etanol üreten mikroorganizmaların sayısı sınırlı olmakla birlikte, laktoz hidrolizi ile oluşan glikoz ve galaktozdan etanol üreten endüstriyel mikroorganizmalar da bulunmaktadır. *Saccharomyces cerevisiae* mayası ile laktozun hidroliz ürünlerinin besiyeri olarak kullanıldığı fermentasyonla alkol üretmek mümkündür. *Saccharomyces cerevisiae* glikoz ve galaktoz tüketirken düşük verimde etanol üretmektedir. Ancak hidrolizde kullanılan β -galaktosidaz enziminin yüksek maliyeti nedeniyle sürecin ekonomisi olumsuz yönde etkilenmektedir.

Tek hücre proteyinlerin üretimi

Tek hücre proteyini, mantar, maya, bakteri ve alg gibi çeşitli mikroorganizmaların çoğalmaları sonucu, bu mikroorganizmalara ait canlı hücrelerin büyümesi ile elde edilen biyokütledeki proteyinlerdir. 1940'lı yıllardan bu yana mikrobiyal biyokütle üretimi endüstriyel boyutlarda gerçekleştirilmektedir. Fransa, ABD, Almanya ve Avustralya'da büyük ölçekte tek hücre proteinleri üretimi yapılmaktadır. *Kluyveromyces lactis*, *Kluyveromyces fragilis*, *Torulopsis bovina* bu amaçla kullanılan mikroorganizmalar olup peyniraltı suyunda iyi büyümektedirler. Kullanılan peyniraltı suyuna göre süreç çoğu zaman %100 başarılı olmayabilir, çoğu kez fermentasyon ortamına dışarıdan azot ve fosfor eklemek gerekebilir. Böyle süreçlerde düşük pH (3,5) ve yüksek sıcaklık (38°C) koşulları sağlanmalı ve denetlenmelidir. Bu şekilde fermentasyona başka mikroorganizmaların bulaşma riski azaltılmış olur [4,8].

Biyogaz üretimi

Peyniraltı suyunun anaerobik fermentasyonu ile biyogaz ve metan üretimi uzun zamandan bu yana endüstriyel olarak kullanılmaktadır. Bu amaçla pek çok anaerobik reaktör geliştirilmiştir [8, 13]. Bu reaktörler ile peyniraltı suyunun BOİ ve KOİ

değeri önemli oranda azalırken biyogaz ve metan oluşumu gerçekleşmektedir. Biyogaz, çok yönlü bir enerji kaynağı olarak doğrudan ısıtma ve aydınlatma amacıyla kullanıldığı gibi, elektrik enerjisine ve mekanik enerjiye çevrilerek de kullanımı mümkündür. Ayrıca biyogaz üretimi sonucu ortaya çıkan yan ürünler de çeşitli amaçlarla kullanılabilir.

Diğer ürünler

Bugüne kadar pek çok araştırmaya konu olan peyniraltı suyundan yukarıda sayılanların dışında yeni biyolojik ürünler elde etmek amacıyla yapılan çalışmalar hala devam etmektedir. Peyniraltı suyundan, gıda sektöründe sıkça kullanılan propiyonik asit, asetik asit, laktik asit, laktobiyonik asit, sitrik asit, glukonik asit ve itakonik asit gibi organik asitlerin üretiminde yararlanılmaktadır. Ayrıca peyniraltı suyunun farklı mikroorganizmalar tarafından fermentasyonu ile elde edilen diğer ürünler de B₁₂ (kobalamin), B₂ (riboflavin) vitaminleri ve glutamik, lisin ve treonin aminoasitleridir.

Peyniraltı suyunun mayalar tarafından fermentasyonu ile gliserol de üretilmektedir. Ayrıca petrol sondajlarında, tekstilde, gıda sektöründe emülsüfyer ve stabilizör olarak kullanılan ksantan yapıştırıcısı da peyniraltı suyunun fermentasyonu ile elde edilir. Son zamanlarda peyniraltı suyunun anaerobik fermentasyonu ile kalsiyum ve magnezyum asetat üretimi de mümkündür. Peyniraltı suyunun besiyeri olarak kullanıldığı *Kluyveromyces lactis* fermentasyonu ile uçucu tatlandırıcılar elde edilebilmektedir. Ayrıca bitki hormonları, giberilik asit ve enzimlerin temel yapı taşlarının eldesinde peyniraltı suyu bileşimi uygun bir ortamdır [7].

2.2. Peyniraltı Suyunun Çevresel Etkileri

Peyniraltı suyu peynir endüstrisinin protein ve laktoz bakımından zengin bir yan ürünüdür. Yüksek organik içeriği ve düşük alkalinite değerinden dolayı bakterilerle ayrışabilme özelliğine sahiptir. Bu nedenle bazı değerli ürünlerin elde edilmesinde

değerlendirilir [8, 14]. Peyniraltı suyu eğer değerlendirilemiyorsa, peynir üretim tesisi için önemli bir sorun haline gelmektedir. Ancak özel kanalizasyon sistemi ile tesisten uzaklaştırılabilmektedir. Kanalizasyon olmayan tesislerde ise tanklarla taşınarak uzaklara götürmek gerekmektedir ki bu da maliyeti artırmaktadır ve yerleşim yerlerinden uzaklara dökülmelidir. Döküldüğü yerde toprağın derinliklerine geçerek nehirlerle akan peyniraltı suyu bu tür ortamlar için suyun niteliğini etkileyerek önemli sorunlara neden olmaktadır. Köylerde ve küçük şehirlerde akarsulara verilen peyniraltı suyu buralar için daha önemli bir sorun oluşturmaktadır. Peyniraltı suyunun kanalizasyona katılması ile de karbonhidratların fermentasyonu hızlanmaktadır.

Süt ve süt ürünlerine olan gereksinimin gittikçe artması nedeniyle, süt endüstrisi dünyadaki pek çok ülkede büyüme göstermektedir [15]. Ülkeler arasındaki en büyük süt üreticisi Hindistan'dır [16]. Yılda 85 milyon tonu geçen yıllık süt üretimine sahiptir ve bu değer yılda %2,8 oranında artış göstermektedir. Dolayısıyla Hindistan süt endüstrisinden oluşan atık suların da en büyük üreticisi durumundadır [17].

Yüksek kirlilik yüküne sahip süt ve süt endüstrisi atık suları eğer alıcı ortama boşaltılıyorsa, kirletici parametreleri derişiminin “Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği”ndeki değerlere düşürülmesi gerekmektedir. Eğer işlemden geçirilmezse, yüksek BOİ ve KOİ değerlerinden dolayı su ve çevre kirliliğine neden olur [18]. Bu tür atık suların kolaylıkla işlemden geçirilmesi için biyolojik arıtma süreçleri kullanılmaktadır. Biyolojik arıtma süreçleri de aerobik ve anaerobik olmak üzere iki şekilde gerçekleştirilmektedir [19].

2.3. Peyniraltı Sularının Arıtılması

Evsel ve endüstriyel atık suların biyolojik olarak arıtımına 19. yy'ın sonlarında rastlanmaktadır. 1930'lardan beri bu atık suların hem aerobik hem de anaerobik olarak biyolojik arıtımı gerçekleştirilmektedir. Peyniraltı suyunun biyolojik olarak arıtılması uygulamalarına ise 1980'den sonra başlanmıştır. O yıllarda peynir üretim

tesislerinde oluşan peyniraltı atık suyunun çevre kirliliği açısından önemli bir sorun olduğu fark edilmiş ve bu problemin çözümü için düşük maliyetli etkin arıtım teknikleri araştırılmıştır. Özellikle 1990 yılından itibaren geliştirilen süreçler hem uygulama açısından hem de verimlilik açısından oldukça fazla ilgi görmüştür.

Biyolojik atık su arıtımının amacı kararlı olmayan kolloidal katıları bir araya getirerek uzaklaştırmak ve organik maddeleri kararlılaştırmaktır. Endüstriyel atık suların biyolojik arıttaki hedef nokta, organik ve inorganik bileşiklerin giderimi ve derişimlerinin azaltılmasıdır [20].

Biyolojik arıtım, uzaklaştırılmak istenen organik maddelerin karışık bir mikrobiyolojik kültüre beslenmesi ile gerçekleştirilmektedir. Organik maddeler, besinler ve su içerisinde bulunan diğer maddeler substrat olarak ifade edilmektedir. Biyolojik atık su arıtımında aktif mikrobiyal topluluk atık su ile etkileşime sokularak su içerisindeki organik atıkların besin olarak tüketilmesi sağlanmaktadır. Karışık mikroorganizma grupları, mikroorganizma grubu ile atıksu arasındaki etkileşimin yeterliliği, oksijen varlığı, ortamda besin bulunması, sıcaklık, pH ve etkileşim süresi gibi diğer etkenler arıtımın temel bileşenlerini oluşturmaktadır. Mikroorganizmalar, arıtımın sonunda kolloidal ve çözünmüş organik maddeleri çeşitli gazlara, son ürünlere ve yeni hücre dokularına dönüştürmektedir. Oluşturulan bu hücreler çıkış suyundan uzaklaştırılmadıkça arıtım tamamlandı sayılmamaktadır. Çünkü organik yapıda olan bu hücreler çıkış suyunda organik içerik olarak ölçülmektedir. Biyokütle çıkış suyundan uzaklaşmadığı müddetçe sadece organik maddenin bir bölümü son ürün olarak bazı gazlara dönüşmüş olur ancak tam bir arıtım gerçekleşmemiştir.

Son 50 yıldan daha fazla süredir peyniraltı suyundan yararlanma yolları araştırılmasına rağmen, dünyadaki peyniraltı suyu üretiminin hemen hemen yarısı herhangi bir işlem uygulanmadan doğrudan çevreye atılmaktadır. Peyniraltı suyu üretiminin çok fazla oluşu ve bu suların yüksek organik içeriği nedeniyle önemli derecede çevre sorunu ortaya çıkmaktadır. Peyniraltı sularındaki yüksek miktardaki

laktozdan dolayı KOİ ve BOİ değerleri yüksektir. Ancak protein geri kazanımı gerçekleştirilirken peyniraltı suyu KOİ'sinin %12'si kadarı azaltılmaktadır [4].

Peyniraltı atık suyu arıtımına kuramsal olarak en uygun çözüm, anerobik arıtımı izleyen aerobik arıtım sürecinin birlikte kullanılmasıdır. Peyniraltı suyunun anaerobik arıtımı yeni bir süreç değildir. Pek çok laboratuvar ve pilot ölçekli arıtım çalışmaları yapılmıştır fakat büyük çoğunluğu arıtılması kolay olan önceden proteyinleştirilmiş ve seyreltilmiş olan atık sudur [13, 21]. Malaspina yaptığı çalışmada; ham peyniraltı suyunun düşük bikarbonat alkalinitesi ($\sim 50 \text{ megl}^{-1}$) ve yüksek KOİ derişimi ($\sim 70 \text{ gKOİ l}^{-1}$) yanında çok hızlı asitleşme eğilimi, granülleşme oluşumundaki zorluk, çamur çökmesini azaltan ve biyokütle kaşışının bir nedeni olan bakteriyel kökenli viskoz ekzopolimerik madde üretme eğiliminden dolayı anaerobik olarak arıtımı biraz sorunlu olan bir substrat olduğunu söylemektedir [12]. Daha da ötesi, ham peyniraltı suyunun yüksek hızlı anaerobik reaktörlerde doğrudan arıtımının çok emniyetli olmadığı düşünülmektedir çünkü kararlı bir işletme sağlanması için sık sık güçlüklerle karşılaşmaktadır [5].

Peynir üretim süreçlerinden gelen yüksek organik içerikli atık suyun arıtımı için uygulanabilir tek yöntem anaerobik arıttır. Yüksek organik madde içeriğı nedeniyle oluşan düşük verim ve kararsızlık problemlerini azaltmak için peyniraltı suyunu başka atık sularla karıştırarak seyreltme yapılabilir. Özellikle yüksek hızlı anaerobik sistemler olan yukarı akışlı çamur yataklı anaerobik reaktörlerde (YAÇYA) ve yukarı akışlı anaerobik filtrelerde bu uygulanabilir [22]. İki pilot ölçekli YAÇYA reaktörü kullanan Cohen tarafından peyniraltı suyunun iki kademe anaerobik arıtımı çalışılmıştır [21]. Peyniraltı sularının ve süthane atık sularının arıtımına bir diğer olası seçenek de biyolojik ve kimyasal iki arıtım yönteminin birleşimidir [23-24].

Atık su arıtımında anaerobik arıtım süreçleri önemli bir gelişme göstermiştir. Bu gelişimde yukarı akışlı çamur yataklı anaerobik reaktörün (YAÇYA) kullanılan en uygun seçenek olması açısından önemli bir rolü vardır. Bu reaktörün içinde, düşük ve basit fiyatlı ekipmanla yüksek derişimli çamur alıkoyulabilir [25]. Bu yüksek

çamur derişimi yüksek organik yüklemelerle reaktörün işletilmesine izin verir. Ayrıca granüllerdeki metabolik ara yüzey aktarım hızının ilerlemesi nedeniyle bozunma kinetiğı de artmaktadır [26].

Geliştirilmiş granüllü çamur yataklı reaktör (EGSB) ise geleneksel YAÇYA reaktörün biraz değıştirilmiş olanıdır. Her ikisinde de granüler çamur kullanır ancak EGSB reaktör yüksek geri döngü oranları ve artırılmış yükseklik/çap oranıyla elde edilen daha yüksek yukarı akış hızlarında (7-10m/s) çalışır. Bu da atık su-çamur etkileşimini artıran daha yüksek hidrolik karışım sağlar. Bazı uygulamalar için önemli bir yönü olan destek maddesine bu reaktörde gerek yoktur.

Genelde anaerobik arıtım orta ve yüksek güçteki atık sulara uygulanmıştır. Son yıllarda seyreltilmiş atıkların işlemden geçirilmesi için yüksek hızlı anaerobik arıtımın fizibilitesinin hazırlanması yönünde büyük çabalar harcanmıştır. Seyreltik atık suyun işlenmesinde, reaktörde düşük bakteriyel aktivite sağlayan düşük derişimli substrat bulunmaktadır. Geleneksel YAÇYA reaktörde, atık su yataktan geçerek kanallaşır ve böylece zayıf atık su-çamur etkileşimi oluşur. EGSB reaktörlerinin yüksek yukarı akış hızları ise kütle aktarım hızını artırır [27]. Ayrıca EGSB reaktörünün bakterilerle ayrışabilen zehirli bileşenlerin arıtımı için de uygun olduğu gösterilmiştir. Çünkü bu reaktörler yüksek geri döngü oranlarında işletilirler ve giriş derişimi bakteriyel etkinlik için zararlı olmayan düzeylere kadar seyreltilir [28]. Yukarı akış hızlarının anaerobik granüllerin boyutu ve büyüklüğü üzerine etkisinin olduğu da gösterilmiştir [29]. Günümüzde arıtım verimine yukarı akış hızının etkisini anlamak için değışik substratlarla işletilen EGSB ve YAÇYA reaktörlerinin karşılaştırılması çalışılmaktadır.

2.4. Anaerobik Arıtım Süreci

Anaerobik arıtma, kompleks ve askıdaki organik maddelerin havasız ortamda ayrışması temeline dayanan ve bu sırada oluşan çok adımlı biyokimyasal tepkimelerden oluşan biyolojik bir süreçtir. Bu tür arıtım sürecinde havasız ortamda

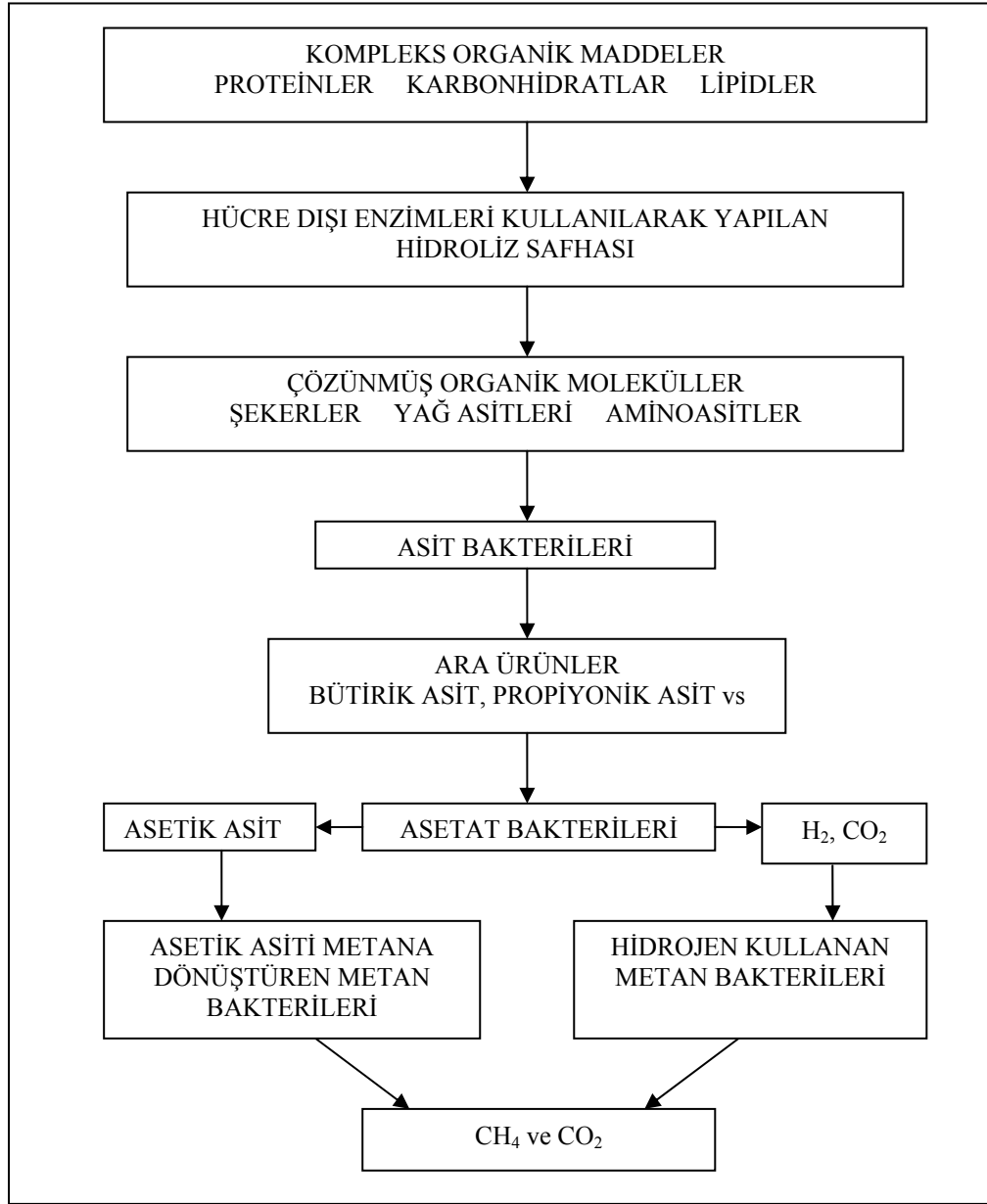
yaşayan asit bakterileri ve metan bakterileri olmak üzere 2 tür bakteri grubu görev almaktadır.

Önce polisakkaritler, proteinler ve lipidlerden oluşan polimerik yapıdaki kompleks maddeler hücre dışı enzimler yardımıyla hücre zarından geçebilecek kadar küçük boyuttaki çözünebilir ürünlere dönüşürler. Basit ve çözünebilir yapıdaki bu bileşikler fermentasyon veya anaerobik oksidasyonla kısa zincirli yağ asitlerine, uçucu yağ asitlerine, alkollere, karbondioksite, hidrojene ve amonyağa dönüşürler. Sürecin son aşamasında asetatin parçalanması veya H_2 ile CO_2 'nin sentezi yoluyla metan (CH_4) üretimi gerçekleştirilir.

Kompleks yapıdaki organik maddelerin anaerobik ayrışması yedi adımda gerçekleşir:

1. Protein, yağ ve karbonhidratların hidrolizi
2. Şeker ve aminoasitlerin fermentasyonu
3. Uzun zincirli yağ asitleri ve alkollerin havasız oksidasyonu
4. Ara ürünlerin havasız oksidasyonu
5. Karbondioksit ve hidrojenden asetate üretimi
6. Asetatin metana dönüşümü
7. Hidrojenin metana dönüşümü

Şekil 2.1'de organik maddelerin anaerobik ayrışma basamakları gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Organik maddelerin anaerobik ayrışma aşamaları [30]

2.4.1. Anaerobik arıtım temelleri ve mikrobiyolojisi

Anaerobik arıtma, birçok mikroorganizma grubunun rol aldığı oldukça kompleks bir süreçtir. Ancak temel görevi üstlenen bakteriler, asit ve metan bakterileridir. Asit ve metan bakterileri de kendi aralarında alt gruplara ayrılmaktadır (Çizelge 2.2).

Çizelge 2.2. Başlıca anaerobik mikroorganizma grupları [30]

Bakteri tipi	Anaerobik arıttımdaki fonksiyonu
Asit bakterileri	Uçucu yağ asitleri üretenler
Asetat bakterileri	Asetat ve hidrojen üretenler
Metan bakterileri	Asetat dekarboksilasyonu ile metan üretenler
	Karbondioksit redüksiyonu ile metan üretenler

Polimerik maddeler (selüloz, nişasta,yağ vb) içeren atıkların anaerobik arıtımında başlıca dört basamak vardır:

Polimerik bileşiklerin hidrolizi

Bu basamakta proteinler aminoasitlere; yağlar yağ asidi ve gliserine; nişasta glikoz ve dekstroza; selüloz glikoza hidroliz olurlar. Hidroliz organizmalar yardımı ile enzimatik olarak gerçekleştirilen oldukça yavaş bir süreçtir. Hidrolize katkıda bulunan mikroorganizmalar Çizelge 2.3.'de gösterilmiştir.

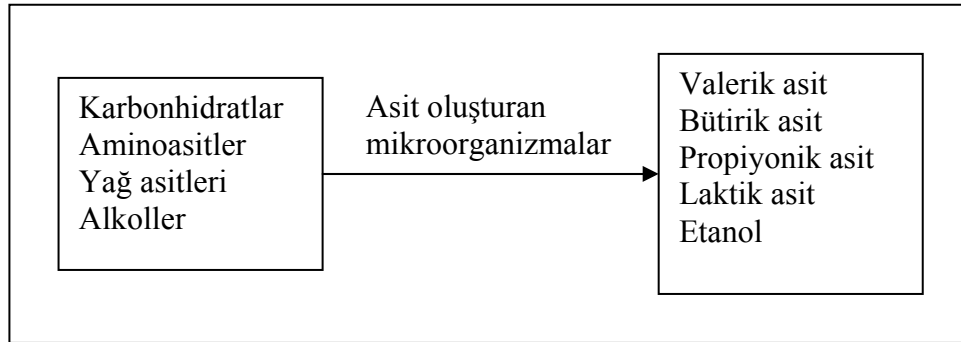
Çizelge 2.3. Enzimatik hidrolize katkıda bulunan mikroorganizmalar [31]

Hidroliz	Mikroorganizma
Protein Hidrolizi	<i>E.coli</i> , <i>Clostridia</i> , <i>S.Cerevisiae</i> , küfler
Yağ Hidrolizi	Anaerobik bakterilerin çoğu
Nişasta Hidrolizi	<i>Clostridia</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Aspergillus</i>
Selüloz Hidrolizi	<i>Trichoderma</i> , <i>Thermomonospora</i> , <i>Clostridia</i> , Beyaz Çürükçül Fungus, Küfler

Enzimatik hidrolizde reaksiyon hızını etkileyen en önemli faktörler pH, sıcaklık ve çamur yaşı (mikroorganizma bekleme süresi) dir. Yağlar çok yavaş hidrolize olduğundan önemli miktarda yağ ve diğer yavaş hidrolize olan maddeler içeren atıkların anaerobik arıtımında hidroliz hız sınırlayıcı bir faktör olabilmektedir [31]. Özellikle bazı selülozlu atıkların anaerobik arıtımında da hidroliz sınırlayıcı rol oynar. Lignin de oldukça kompleks bir maddedir ve rastgele moleküler yapısı nedeniyle anaerobik koşullarda hiç hidroliz olmaz veya tepkime hızı çok düşük olur [32].

Hidrolizle oluşan bileşiklerin asitlere dönüşümü

Hidrolize uğrayan polimerik bileşiklerden oluşan moleküller (glikoz, dekstroza, amino asit, yağ asidi, alkol vb) asit oluşturan mikroorganizmalar yardımıyla organik asitlere (valerik, bütirik, propiyonik) ve alkole dönüşürler (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Anaerobik arıtımın ikinci basamağında oluşan asitler [31]

Asit oluşturan mikroorganizmalar ve oluşturdıkları asitler Çizelge 2.4’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.4. Asit oluşturan mikroorganizmalar ve oluşturdıkları asitler [31]

Mikroorganizma	Asit
<i>E.Coli, E.aerogenes</i>	Formik, asetik, bütandiol, asetoin, CO ₂ , H ₂
<i>Clostridia</i>	Valerik, bütirik, bütanol, aseton, CO ₂ , H ₂
<i>Propionibacteriae</i>	Propiyonik, CO ₂ , H ₂
<i>Lactobacillus, Streptococcus, Leuconoctoc</i>	Laktik, etanol, CO ₂
<i>Sacharomyces sp.</i>	Ethanol, CO ₂

Çözünebilir karbonhidratların fermentasyonu: Metan bakterilerinin olmadığı ortamda, anaerobik mikroorganizmalar yardımıyla karbonhidratların fermentasyonunun başlıca ürünleri etanol, H₂, CO₂’dir. Bununla birlikte H₂ kullanan bakterilerin bulunması durumunda etanolde indirgenme ve asetat üretiminde bir artış gözlenir.

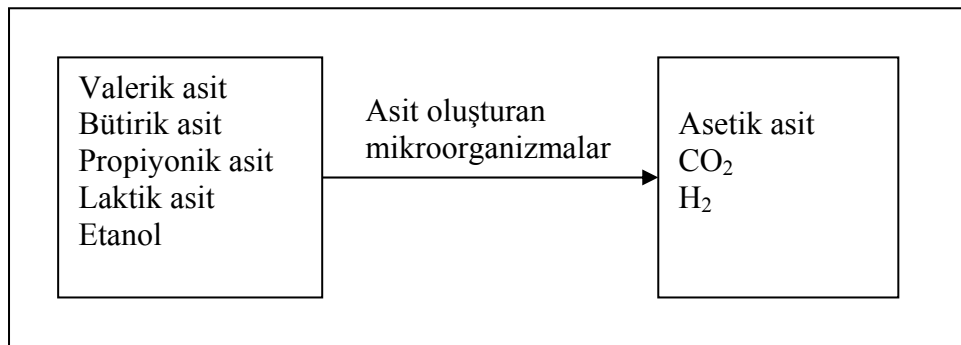
Aminoasitlerin fermentasyonu: Aminoasitlerin fermentasyonu, redoks reaksiyonlarını da içeren oldukça karmaşık bir süreçtir. İndirgenme reaksiyonunda, anaerobik bakteriler tarafından kullanılan başlıca elektron alıcıları, aminoasitler, keto asitler, doymamış asitler ve protonlardır. Amino asitlerin fermentasyonunun son ürünleri, kısa zincirli yağ asitleri, süksinik asit ve H₂ gazıdır.

Uzun zincirli yağ asitlerinin anaerobik oksidasyonu: Yağlar suda çözünmeyen ancak organik çözücülerde çözünebilen heterojen organik bileşiklerdir. Yağ asitlerinin genel formülleri CH₃(CH₂)_nCOOH olup β oksidasyonu ile parçalanırlar. β oksidasyonu ile asidin –COOH kökünden asetil grupları ardışık olarak koparılarak asetik asit (CH₃COOH) ve H₂'ye dönüştürülür. Anaerobik β oksidasyonu ile doymuş yağ asitleri ve 14-18 karbonlu yağ asitleri önce asetata sonra da CO₂ ve CH₄'a dönüştürülür. Uzun zincirli yağ asitlerinin fermentasyonu sonucu oluşan kısa zincirli yağ asitleri ya sadece asetik asit ya da asetik asit ve propiyonik asittir [30].

Asetik asit oluşumu

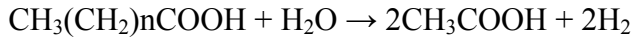
İkinci basamakta oluşan organik asitler bir grup anaerobik mikroorganizma tarafından asetik aside dönüştürülürler (Şekil 2.3).

Bu basamakta fonksiyon gösteren başlıca mikroorganizmalar *Enterebacter sp.* (*E.coli*, *E.aerogenes*), *Clostridia sp.* (*C.aceticum*) vb.'dir.



Şekil 2.3. Anaerobik arıtımda asetik asit oluşumu [31]

Kısa zincirli yağ asitlerinin anaerobik oksidasyonu: Oksidasyon sonucunda oluşan başlıca ürünler asetat ve H₂ gazıdır. Asıl karbon ürünü asetat olduğundan bu tepkimeler asetojen fazı olarak adlandırılır. [30]. Bu aşamada, uçucu yağ asitlerini asetik asite dönüştüren asetojenik bakteri grupları devreye girmekte ve bir kısım asetojenik bakteriler aşağıdaki reaksiyonda da görüldüğü gibi uçucu yağ asitlerini asetik asit ve hidrojene dönüştürmektedir [33].



Diğer bir kısım asetojenik bakteri grubu ise açığa çıkan karbondioksit ve hidrojeni kullanarak asetik asit oluşturmaktadır. Ancak bu ikinci yolla oluşan asetik asit miktarı, birinciye oranla daha azdır [33].

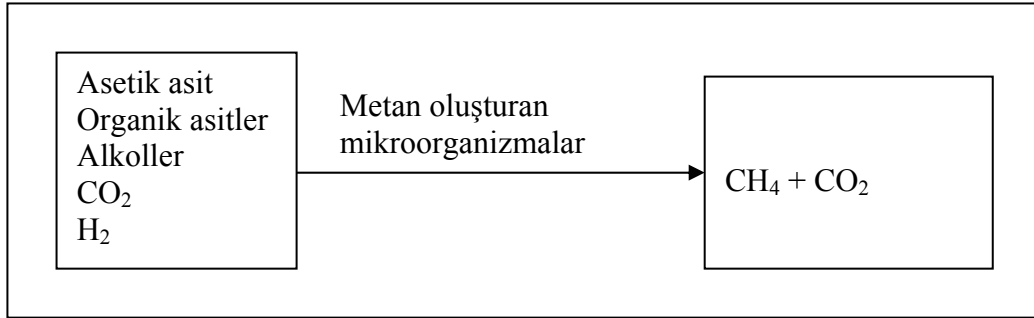


Kısa zincirli yağ asitlerinin ayrışmasının başarılı olması için sistemde üretilen hidrojen gazının etkili bir şekilde giderimi gereklidir. Sistemde hidrojen derişimi arttığında;

1. Toplam asit üretim hızının düşmesine neden olur. Bu durumda sistemin kararlı hale dönebilmesi için ileve zamana gerek duyulmaktadır.
2. Bütirik asit ve propiyonik asit konsantrasyonlarının artmasına neden olur. Bu da asetik asit üretimini ve asetat kullanan metan bakterilerinin CH₄ üretmelerini engeller.
3. H₂ derişiminin daha da artması propiyonik asit üretimini hızlandırır ve böylece sistemde pH düşer.

Metan oluşumu

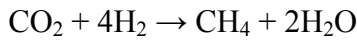
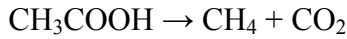
Üçüncü basamakta oluşan asetik asit, CO₂ ve H₂, metan oluşturan mikroorganizmalar yardımıyla metana dönüştürülürler (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Metan oluşum basamağı [31]

Metan oluşturan bakterilerden bazıları; *Methanobacter sp.*, *Methanacoccus sp.*, *Methanovibrio sp.*, *Methanospirilla sp.* Ve *Methanobacillus sp.*'dir.

Metan üretimi yavaş bir süreçtir ve genellikle anaerobik arıtmada hız sınırlayıcı basamak olarak kabul edilmektedir. Metan, asetik asidin parçalanmasıyla veya H_2 ile CO_2 'in sentezi sonucu üretilir.



Anaerobik reaktörlerde üretilen CH_4 'ın %30'u H_2 ve CO_2 'den, %70'i ise asetik asidin parçalanmasından oluşmaktadır [34]. H_2 ve CO_2 'den metan üreten bakteriler, asetik asit kullanan bakterilere oranla çok daha hızlı bir şekilde çoğalmaktadırlar. Dolayısıyla ortamda yeterli H_2 ve CO_2 olduğu ve H_2 kısmi basıncı da uygun olduğu sürece bu yolla CH_4 üretimi devam eder. Ancak metan üretimi basamağının her zaman hız sınırlayıcı olması söz konusu değildir, bazen hidroliz basamağı da daha kritik olabilir. Hidroliz koşulları anaerobik fermentasyon koşullarından farklı olduğundan ayrı bir reaktörde gerçekleştirilebilir. Asit oluşumu ($T=30-35^\circ C$, $pH=7-7,5$) ve metan oluşumu ($T=35-40^\circ C$, $pH=6,5-7$) iki ayrı reaktörde gerçekleştirilebildiği gibi tek reaktörde de gerçekleştirilebilir ($T=35^\circ C$, $pH=7$).

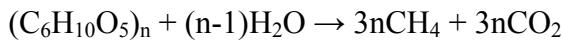
Anaerobik parçalanmada H_2S gazı, sülfatın (SO_4) *Desulfovibrio sp.* tarafından indirgenmesi ile oluşur. Ayrıca *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Achromobacter* gibi

denitrifiye edici mikroorganizmalar NO_3^- 'ı N_2 gazına dönüştürürler. Böylece atık maddenin bileşimine bağlı olarak CH_4 ve CO_2 yanında H_2S ve N_2 gazları da oluşur [31].

2.4.2. Anaerobik arıtım biyokimyası

Anaerobik reaktörlerde arıtılan ve çoğunlukla organik kökenli olan maddelerin en önemlileri polisakkaritler, lignin, proteinler, azotlu bileşikler ve yağlardır. Anaerobik arıtma sürecinde meydana gelen biyokimyasal olayların daha iyi anlaşılabilmesi için bu organik maddelerin yapı ve işlevlerinin bilinmesinde yarar vardır [32].

Polisakkaritler: Selüloz, hemiselüloz ve petkinleri içermektedirler. Saf selüloz tıpkı nişasta gibi glikozun bir polimeridir ancak kolay hidrolize olmaz. Hemiselüloz ve pektinler, selülozun aksine belirsiz yapıdaki maddelerin heterojen karışımlarıdır ve çeşitli çözücülerdeki çözünürlükleri ile belirlenirler. Polisakkaritler genel olarak anaerobik ortamda ayrıştırılabilmektedir. Polisakkaritlerin hidroliz yoluyla monosakkaritlere parçalanması sırasında şekerler enerji kaynağı olarak kullanılır. Glikozun polimerleri olarak ele alındığında polisakkaritlerin hidroliz yoluyla tam anaerobik fermentasyonu;

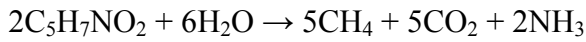


tepkimesi ile verilir. Bu eşitlikten hareketle, genel formülü $\text{C}_n\text{H}_{2n}\text{O}_n$ olan bir karbonhidratın, polimerleri için gaz verimi hesaplandığında, standart koşullarda giderilen uçucu katı maddenin kilogramı başına $0,75 \text{ m}^3$ gaz üretilebileceği görülür.

Lignin: Aynı tip monomerlerin ardışık bağlanmış şekli olmayıp, farklı tipteki monomerlerden oluşur. Bu yüzden lignin yapısı henüz tam olarak anlaşılmış değildir. Lignini oluşturan monomerler en az beş farklı tarzda bir araya gelebilmekte ve bunlardan hiçbiri de anaerobik olarak kolayca hidroliz olmamaktadır. Lignin

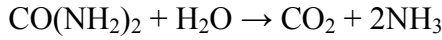
içerisindeki aromatik asitler, zenginleştirilmiş bazı kültürlerce anaerobik olarak ayrıştırılarak bir miktar CH₄ üretilmektedir.

Proteinler: Yirmi kadar doğal aminoasidin polimerleridir. Anaerobik fermentasyon öncesinde proteinlerin bünyesindeki azot; amonyak, asetat, propiyonat ve bütirat gibi belli başlı fermentasyon ürünlerine çevrilerek uzaklaştırılır. Anaerobik reaktörlerde proteinlerin mikroorganizmalarca gazlara ve amonyağa dönüştürülmesi süreci;



tepkimesiyle ifade edilir.

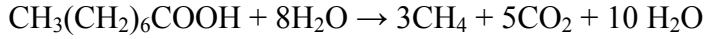
Azotlu bileşikler: Bilinen en önemli azotlu bileşik, hayvansal bir organik atık olan üre; CO(NH₂)₂'dir. Üre anaerobik bakterilerce amonyak ve CO₂'e parçalanır.



Üre, suda çözündüğü için, anaerobik reaktörlerin çıkış sularında önemli oranda azot bulunabilir. Azotlu bileşiklerin fermentasyonu sonucunda; formik, asetik, propiyonik ve laktik asit gibi yağ asitleri ile CO₂ ve H₂ gibi gazlar oluşmaktadır.

Yağlar (Lipidler): Suda çözünmeyen ancak organik çözücülerde çözünebilen heterojen organik bileşiklerdir. Lanolin ve benzeri bazı yağ türleri anaerobik ayrışma süreci ile parçalanamamaktadır. Yağ asitlerinin genel formülleri CH₃(CH₂)_nCOOH olup, asidin –COOH kökünden asetil grupları ardışık olarak koparılarak asetik asit ve H₂'ye dönüştürülür. Uzun zincirli yağ asitlerinin anaerobik süreçlerle asetata dönüştürülmesi sistemin gaz üretimi ve KOİ giderimi bakımından sınırlayıcı faktördür.

Yağ asitlerinin tam anerobik ayrışması sonucu yüksek verimli biyogaz üretilebilir. Stearik asidin tam anaerobik ayrışması aşağıdaki tepkime ile verilir [32].



Açığa çıkan gazın %72'si metan olup gaz üretim verimi ise 1,42 m³/kgUKM'dir.

Anaerobik reaktörlerdeki mikroorganizmalarca kullanılan organik maddeler hücre sentezi için karbon ve enerji kaynağıdır. Anaerobik ayrışma süreci sonucu açığa çıkan son ürünler, CH₄ ve CO₂ çeşitli bakteri gruplarının rol aldığı karmaşık biyokimyasal tepkimeler sonucunda elde edilir. Açığa çıkan ürünler bir üst kademe için besin 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 CH₄ üretimi yavaşlatılmış olur.

2.4.3. Anaerobik arıtım süreçleri için optimum çevre koşulları

Anaerobik arıtma süreçleri kullanılarak atık sularındaki yüksek organik yüklü maddelerin giderimi düşük maliyet ile gerçekleştirilmektedir. Ancak, çeşitli atık suların arıtımında çevresel koşullar, bu sürecin uygulanmasında bazı güçlükler çıkarmaktadır. Bunun yanında, mikroorganizmaların metabolik aktivitelerinin değişen çevresel koşullara karşı uyum sağlayabilmeleri anaerobik arıtma sistemlerinin bir üstünlüğüdür. Fakat asit bakterileri, değişen çevresel koşullara karşı metan bakterilerine göre daha kolay uyum sağlayabilmekte ve ortamda baskın hale gelmektedirler. Bunun sonucunda anaerobik reaktörde, uçucu yağ asitleri birikmeye başlayarak sistemin kararlılığını bozarak bir dengesizliğe neden olmaktadır. Bu sorun, anaerobik arıtma sistemlerinde sıkça görülen bir durumdur. Çevresel etkenlerdeki ani değişimler süreç veriminin büyük ölçüde azalmasına neden olabilir. Bu nedenle, anaerobik arıtmada mikroorganizmaların hem özgün gereksinimleri karşılanmalı hem de optimum çevresel koşullar sağlanmalıdır [30]. Bu çevresel koşullar şunlardır:

- ✓ Sıcaklık
- ✓ pH
- ✓ Karıştırma
- ✓ Alkalinite ve uçucu asitler
- ✓ Yavaşlatıcı veya zehirli maddeler
- ✓ Besin gereksinimi
- ✓ Alıkoyulma süresi
- ✓ Katı madde içeriği
- ✓ Aşılama

Çizelge 2.5’de anaerobik mikroorganizmalar için optimum çevre koşulları gösterilmiştir.

Çizelge 2.5. Anaerobik mikroorganizmalar için optimum çevre koşulları [32]

Parametre	Optimum Şartlar
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, zehirli ve ,yavaşlatıcı elementler içermemeli
KOİ/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 olarak
TUA/Alkalinite	<0,1

Sıcaklık

Sıcaklık, diğer çevresel etkenlere göre, arıtma tesislerinin hem tasarımında hem de işletilmesinde en önemli parametrelerden biridir. Anaerobik arıtmada, mikroorganizmaların metabolik aktiviteleri büyük oranda sıcaklığa bağlıdır. Anaerobik arıtmada başlıca üç sıcaklık aralığı tanımlanmıştır:

- Sakrofilik (20°C'nin altı)
- Mezofilik (20-45°C)
- Termofilik (50-65°C)

Mezofilik ve termofilik koşulların hakim olduğu, 45-50°C arası geçiş bölgesinde, kararlı olmayan işletme koşulları ortaya çıkar. 20°C'nin altında, anaerobik reaktörün işletmeye alma ve başlangıç evresi gecikecektir. Yine 20°C'nin altında arıtma verimi büyük ölçüde düşecektir. Ayrıca 20°C'nin altında veya 70°C'nin üzerinde metan bakterilerinin etkinlikleri azalmaktadır. Bu durum işletme maliyetini artırmaktadır. Bu nedenle anaerobik reaktörlerde mezofilik sistemler için en uygun sıcaklık aralığı $35\pm 3^\circ\text{C}$, termofilik sistemler için ise en uygun sıcaklık aralığı $55\pm 2^\circ\text{C}$ 'dir.

Sıcaklık parametresi anaerobik sistemlerde izlenmesi gereken çok önemli bir parametredir. Anaerobik arıtma sistemlerinde sıcaklığın devamlı sabit tutulmasına özen gösterilmeli ve gün içinde 2°C 'den fazla değişmemesi sağlanmalıdır [30].

pH

pH, mikroorganizmaların davranışlarına ve substratın çözünübilirliğine doğrudan etki eden önemli bir parametredir. Birçok mikroorganizma topluluğunun bulunduğu anaerobik sistemlerde, bakterilerin maksimum gelişmesini sağlayacak bir pH aralığı tutturmak oldukça zordur. Bu yüzden optimum pH aralığı sağlanmalıdır.

Anaerobik bakterilerin, baskın grubu olan asit bakterilerinin en uygun yaşama aralığı pH 5,5-6,5 arasındır. Ancak, metan bakterilerinin en uygun yaşama aralığı pH 6,5-8,0 arasındır. Bu yüzden tek kademeli sistemlerde, iki bakteri grubunun da beraber yaşayabileceği yaklaşık nötral pH aralığı (6,5-7,5) sağlanmalıdır. Eğer pH 6,0'dan küçük ise, metan bakterileri yavaşlamaya başlayacaktır. Asit bakterileri ise yaşamlarına devam edecektir. Asit bakterilerinin oluşturduğu uçucu asitler ve diğer ara ürünler, metan bakterileri olmadığı için kullanılamayacak ve ortamda uçucu asitler birikmeye başlayacaktır. Bu da sistemin verimini düşürecektir. Bu yüzden pH,

anaerobik arıtma sistemlerinde uygun işletme koşullarının olup olmadığının belirlenmesinde anahtar parametre olarak kullanılmaktadır [30].

Karıştırma

Substrat giderimine etkisi olan ve askıdaki biyokütlenin reaktör içerisine eşit olarak dağılmasını sağlayan bir diğer önemli fiziksel parametre de karıştırma. Karıştırma, reaktör hacminin etkin olarak kullanılan bölgesini artıracak gibi hem de biyokütlenin ve diğer reaktör bileşenlerinin de verimli olarak kullanılmasını sağlayacaktır. Ayrıca, uçucu yağ asitlerinin ve diğer ayrışma süreçlerinden kaynaklanan ve yerel yavaşlatıcılığa yol açan maddelerin reaktörün tamamına dağılmasını sağlayarak, olumsuz etkileri en aza indirir. Başarılı bir karıştırma, sıcaklığın reaktörün her köşesine çabuk ve eşit dağılmasını sağlar. Bundan dolayı karıştırma, anaerobik sistemlerin sürekliliğinin sağlanması açısından oldukça önemli bir parametredir.

Alkalinite ve uçucu asitler

Anaerobik sistemlerde, alkalinite ile uçucu asit derişimleri arasında karşılıklı bir etkileşim söz konusudur. Alkalinite, anaerobik sistemlerde, sistemi nötralize etmeye çalışarak bir tamponlama görevi görür. Uçucu asitlerin birikmesi söz konusu olursa pH'da azalma oluşur. Yani anaerobik sistemlerde pH dengesinin sağlanabilmesi için alkaliniteye gereksinim vardır.

Anaerobik sistemlerde uçucu asit derişiminin artması ve ani pH düşüşlerine karşı güvenliği sağlamak için kullanılan parametre, alkalinitedir. Ani pH düşüşlerinden sistemi korumak için, tampon görevi gören alkali metaller (sodyum ve potasyum bikarbonatlar, kireç vs.) kullanılır. 2500 mg/L alkalinite, uçucu yağ asitlerinden dolayı oluşan ani pH düşüşlerine karşı veya pH dalgalanmalarına karşı tampon görevi görerek sistemi korur. Küçük reaktörlerde ise 1000mg/L bikarbonat alkalinitesi de sistemi başarılı olarak korur.

Tampon malzemeler olarak kullanılacak maddelerin, sıvı fazda istenilmeyen etkileri yapmamasına dikkat edilmelidir. Kireç, hem ucuzluğundan hem de kolay elde edilebilirliğinden dolayı en çok kullanılan tampon malzemedir. Fakat kireç iyi bir seçenek değildir. Çünkü 500-1000 mg/L'nin üzerinde olsa bile reaktördeki pH değişimlerine karşı az bir etki göstermektedir.

Tampon malzemede kullanılacak en iyi seçim, sodyum veya potasyum bikarbonatlardır. Bu kimyasallar, reaktörde oldukça çözünür ve reaktöre eklenmesi kolaydır. Ayrıca sodyum veya potasyum bikarbonatların aşırı verilmesi de ani olarak pH'ı artırmayacağı gibi başka olumsuz etkiler de vermeyecektir. Bu malzemeler güvenle kullanılabilir.

Yavaşlatıcı veya zehirli maddeler

Anaerobik arıtmada, yavaşlatıcı veya zehirli maddeler, biyolojik mekanizmanın kolayca bozulmasına neden olurlar. Bu zehirli veya yavaşlatıcı maddelerin kaynağı, ya sisteme giren atık suyun yapısında bulunmaktadır ya da reaktördeki bakterilerin metabolik aktiviteleri sonucu açığa çıkmaktadır. Bu maddelerin, olumsuz etkileri çok küçük değerlerden başlayıp, birkaç bin mg/L düzeylerine kadar ulaşmaktadırlar. Bu maddelerin etkilerini anlamak için şu kavramları tanımlamak gerekir.

Yararlı miktar: Sistemde biyolojik aktiviteyi arttıran etki.

Yavaşlatıcı: Sistemde biyolojik aktiviteyi azaltan etki.

Zehirli: Sistemde biyolojik aktiviteyi tamamıyla durduran etki.

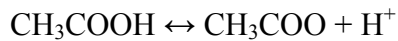
Zehirli veya yavaşlatıcı maddeler, hem organik hem de inorganik yapıda olabilirler. Anaerobik biyolojik sistemlere zehir veya yavaşlatma etkisi yapan maddeler başlıca dört sınıfta toplanabilir:

- Uçucu asitler
- Alkali ve toprak alkali tuzlar
- Amonyak azotu (NH₃-N)
- Ağır metaller

Uçucu asitlerin yavaşlatıcılığı

Anaerobik reaktörlerde bilinen en yaygın sorunlardan birisi, asit bakterilerinin üretmiş olduğu uçucu asitlerin reaktörde birikmesidir. Bunun sonucu olarak da, pH düşmekte, metan bakterilerinin aktiviteleri azalmakta hatta durmakta ve sistemin kararlı yapısı bozulmaktadır. Özellikle ani yükleme koşullarında oluşacak propiyonik asit, asetik aside oranla daha fazla geciktirici etki yapmaktadır.

Anaerobik sistemlerde uçucu asit üretimleri ve diğer metana dönüşüm süreçleri arasındaki dengenin sürdürülmesi gerekmektedir. Eğer pH 6,0'nın aşağısına düşerse ortama hakim olan bakteriler asit bakterileridir ve uçucu asit üretimi artmaktadır. Bu sırada metan bakterileri de hızla azalmaktadır. Yani düşük pH metan bakterilerini ciddi derecede etkilemekte ve metan üretimi azalmaktadır. Metan bakterileri etkilendiği için, ortamda biriken uçucu asitleri kullanacak ve metan gazına dönüştürecek bakteriler görevlerini yapamayacaklardır. Bunun sonucunda asit birikimi artacak ve sistemin pH'ı düşmeye devam edecektir. Bu durum asit bakterilerini de olumsuz etkileyecektir. Bu döngü böyle devam ettikçe düşük pH'da sistemde iyonlaşmamış uçucu asitler bulunacaktır. Uçucu asitlerin iyonlaşıp iyonlaşmaması kuvvetli bir şekilde pH'a bağlıdır.



Tepkimeden de görüldüğü gibi pH düşerse denklem sola kayar ve bunun sonucu olarak da, iyonlaşmamış uçucu asit derişimi artar. Bu durumda metan bakterileri iş yapamaz duruma gelirler. Anaerobik reaktörlerde özellikle iyonlaşmamış uçucu asit derişimi 10 mg/L'yi aşarsa, sistem iş yapamaz hale gelir.

Alkali ve toprak alkali tuzların yavaşlatıcılığı

Özellikle endüstriyel atık suların içerisinde fazla miktarlarda bulunan sodyum, potasyum, kalsiyum ve magnezyum tuzları hem sistemin kararlılığını bozar hem de yavaşlatıcılığa neden olur. Anaerobik arıtmada katyonlar anyonlara oranla daha fazla yavaşlatıcılığa yol açmaktadır. Alkali ve toprak alkali tuzların yararlı değerleri, yavaşlatma ve zehirlilik değerleri Çizelge 2.6’da gösterilmiştir. Süreç veriminin artması için mikroorganizmaların bu maddelere çok az gereksinimi vardır. Az miktarlarda oldukları zaman yararlı etki gösterirler. Bu maddelerin azar azar artırılmasıyla, mikroorganizmaların bunlara alışmaları sağlanır ve bu etki azaltılabilir. Ancak bu maddelerin ani olarak verilmesi bir şoka neden olur ve süreci yavaşlatır. Eğer normal değerlerin çok üstünde bu maddeler sisteme verilirse, kuvvetli bir şekilde yavaşlatma oluşur ve arıtma verimi çok düşer. Bu tür yavaşlamaya uğramış sistemin eski haline dönmesi çok uzun zaman alabilir. Bundan dolayı, anaerobik arıtma sistemlerinde, yüksek derişimlerde katyon içeren atık suların sisteme verilmesi önlenmelidir.

Çizelge 2.6. Alkali ve toprak alkali metallerin yavaşlatma derişimleri [30]

Katyonlar	Faydalı Konsantrasyon (mg/L)	Orta Derecede Yavaşlatma Konsantrasyonu (mg/L)	Kuvvetli Yavaşlatma Konsantrasyonu (mg/L)
Sodyum (Na^+)	100-200	3500-5500	8000
Potasyum (K^+)	200-400	2500-4500	12000
Kalsiyum (Ca^{++})	100-200	2500-4500	8000
Magnezyum (Mg^{++})	75-150	1000-1500	3000

Amonyak azotu ($\text{NH}_3\text{-N}$) yavaşlatıcılığı

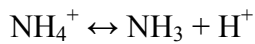
Anaerobik arıtmada amonyak, protein ve ürenin parçalanması sonucu oluşur. Özellikle yüksek derişimli substrat içeren endüstriyel atık sular ile evsel arıtma çamurlarında yüksek miktarlarda amonyak bulunur. Anaerobik arıtmada, amonyak en fazla metan fazına zarar verir. $\text{NH}_3\text{-N}$ ’in 50-200 mg/L derişimlerde bulunması

arıtmaya olumlu bir etki yapar ve metan bakterilerine herhangi bir zarar vermez. 1000 mg/L'ye kadar amonyak azotu bulunması sisteme yine bir zarar vermez. 1500-2000 mg/L arasında $\text{NH}_3\text{-N}$ mevcutsa, yüksek pH'ta yavaşlatıcılığa neden olur. 3000 mg/L'nin üzerinde $\text{NH}_3\text{-N}$ varsa zehir etkisi yapar. Anaerobik arıtmaya amonyak azotunun etkisi Çizelge 2.7'de verilmiştir.

Çizelge 2.7. Anaerobik arıtmaya amonyak azotu ($\text{NH}_3\text{-N}$) etkisi [30]

Amonyak Azotu Derişimi (mg/L)	Anaerobik Arıtmaya Etkisi
50-200	Yararlı
200-1000	Olumsuz bir etkisi yok.
1500-3000	Yüksek pH'da yavaşlatıcılığa yol açar.
3000 ve üzeri	Zehir etkisi gösterir.

Yüksek hidrojen derişimi (düşük pH; 7,2 veya daha düşük) aşağıdaki denklemde dengenin sola kaymasına yol açar ve amonyum iyonu derişimi artarak yavaşlatıcılığa neden olur. Benzer şekilde düşük hidrojen derişimi (yüksek pH) dengenin sağa kaymasına yol açar ve amonyak gazı açığa çıkarak yavaşlamaya neden olur.



Serbest amonyak derişimi, 150 mg/L'nin üzerinde olursa metan bakterilerine zehir etkisi gösterir. Buna rağmen, amonyum iyonu için maksimum güvenlik sınırı 3000 mg/L'dir.

Sülfid yavaşlatıcılığı

Anaerobik arıtmada başlıca sülfid kaynakları, sisteme giren arıtılmamış ham atıklar ve reaktörde oluşan, sülfat ve sülfür içeren diğer inorganik bileşiklerin indirgenmesi sonucunda oluşur.

Anaerobik sistemlerde, sülfatın en önemli etkisi, metan bakterilerinin yavaşlamasına neden olmasıdır. Sülfatın indirgenmesi sonucunda sülfitin oluşması ve metan bakterilerinin kendi aralarında asetat için yarışması şeklinde yavaşlatıcılık oluşmaktadır. Sülfatın indirgenme ürünü olan hidrojen sülfür (H_2S), metan üretiminin üzerine çıkar. Bu durum yüksek derişimlerde sülfat içeren endüstriyel atık sularda görülür. H_2S üretimi sistemdeki kararsızlığı ve metan bakterilerinin yavaşladığını gösterir.

Anaerobik sistemlerde çözünmüş sülfid miktarının 50-100 mg/L arası olması durumunda, kısa bir alışma süresinden sonra hatta hiç alışma süresi olmaksızın, sistem bu miktarı tolere edebilir. Çözünmüş sülfid konsantrasyonunun 200 mg/L'nin biraz üzerinde olması durumunda, sistem kesikli değil de sürekli bir sistem ise belli bir alışma süresinden sonra sistemde önemli bir yavaşlamaya rastlanmaz. Çözünmüş sülfid derişimi 200 mg/L'nin çok üzerindeyse, sistemde metan bakterileri kuvvetli bir şekilde yavaşlamaya uğrarlar.

Ağır metal yavaşlatıcılığı

Anaerobik sistemlerde zehirliliğe veya yavaşlatıcılığa yol açan diğer bir madde ise ağır metallerdir. Ağır metallere hem anaerobik biyolojik parçalanmayı yavaşlatırken hem de ortamda birikme özelliği gösterirler. Hücre dışı ve hücre zarı enzimlerine zarar verirler. Anaerobik çamurda birikirler.

Ağır metallere, evsel, endüstriyel ve ticari bölgelerden gelen şehir kanalizasyon sularında bulunurlar. Ağır metallere, diğer zehirli maddelerden farklı olan en önemli özelliği, biyolojik olarak parçalanamaz olmalarıdır. Ağır metallere, iz elementleri gibi düşük derişimlerde bulunmalarına rağmen, miktarlarındaki az bir artış sistemde ciddi şekilde dengesizliğe yol açar. Bu nedenle ağır metallere, biyolojik sisteme girmeden önce kimyasal arıtma (çöktürme) ile atık sudan uzaklaştırılmalıdır.

Anaerobik süreçlerde yavaşlatıcılığa ve zehirliliğe neden olan parametrelerin belirlenmesinden sonra zehirlilik etkisinin en aza indirilmesine yönelik öneriler aşağıdaki şekildedir:

1. Zehirliliğe neden olan maddelerin biyolojik sisteme girmeden önce uzaklaştırılmaları
2. Atık suyun zehirlilik sınırlarının alt değerlerine kadar seyreltilmesi
3. Zehirliliğe neden olan maddenin çöktürülmesi veya kompleks halde tutulması
4. Sisteme zehirli maddenin etkisini azaltıcı başka madde eklenmesi
5. Biyokütlenin zehirli maddeye alıştırılması

Besin gereksinimi

Biyolojik sistemlerde inorganik besin gereksinimi, hem hücre büyümesi hem de uygun işletme koşullarında substrat giderimi için zorunludur. Anaerobik sistemlerin besin ihtiyacı aerobik sistemlere göre daha az olup yaklaşık 1/10'u kadardır. Anaerobik hücrelerin gelişmesi için en önemli iki besin, azot ve fosfordur (N ve P). Evsel atık sularda yeteri kadar hatta yüksek miktarlarda azot ve fosfor bulunurken, endüstriyel atık sularda besin eksikliği söz konusudur. Bu yüzden laboratuvar ölçekli çalışmalar yapılırken dışarıdan fazla azot, fosfor ve diğer besi maddelerinin ilave edilmesi gereklidir. Azot ve fosfor karbon ile birlikte makrobesinler olarak isimlendirilir. Özellikle yüksek karbonhidrat içeren kompleks atıkların anaerobik biyolojik parçalanması için gereken karbon/azot/fosfor oranı C/N/P : 300/5/1 şeklindedir [30].

Azot ve fosfor dışındaki diğer besi maddelerine mikrobesein adı verilir. En önemli mikrobeseinler, Na, K, Mg, Ca, Fe, S, Ni, Co, Mo. Bu maddeler eşik değerlerini aşmadıkları sürece yavaşlatıcı etki yaratmazlar ve metabolik etkinliği hızlandırırlar. Bir anaerobik reaktörün performansı düşükse, besi maddelerinin miktarı kontrol edilmelidir. Çünkü bu durum besin eksikliğinden oluşmuştur ve en çok endüstriyel

atık suların arıtımında ortaya çıkar. Anaerobik süreçlerin verimini artıran iz elementlerin yararlı derişim değerleri Çizelge 2.8’de verilmiştir.

Çizelge 2.8. İz elementlerin farklı atık sulardaki yararlı konsantrasyon değerleri [30]

İz Elementler	10000mg KOİ/L	50000mg KOİ/L
Fe	0,5-20	3-100
Ni	0,05-3	0,3-15
Co	0,05-2	0,3-10
Mo	0,01-0,05	0,05-0,2

Alıkoyulma süresi

Maddenin alıkoyulma süresi, anaerobik sistemlerde uçucu organik maddelerin reaktörde kaldığı süredir. Tamamen organik maddenin bileşimine ve sıcaklığa bağlıdır. Alıkoyulma süresinin artması, organik maddenin parçalanma hızını artırmaktadır. Ancak en uygun alıkoyulma süresi belirlenmelidir. Uçucu madde alıkoyulma süresi ve hidrolik alıkoyulma süresi olmak üzere iki türlü kullanımı vardır.

Uçucu madde alıkoyulma süresi (UAS), sistemdeki mikroorganizmaların uçucu maddeyi dönüştürmek için kullandıkları süredir ve sistemdeki uçucu madde kütlesinin, sistemden çıkan uçucu maddenin kütleli hızına oranıdır. UAS, anaerobik sistemlerde 2-6 gün arasında değişmektedir.

Hidrolik alıkoyulma süresi (HAS) ise reaktör hacminin sisteme verilen maddenin hacimsel hızına oranıdır. Anaerobik sistemlerde geri dönüşüm olmadığından ve genellikle organik maddeler sulu çözelti ya da sulu karışımlar halinde beslendiğinden UAS, HAS’ne eşittir. Hem UAS hem de HAS organik maddelerin yeteri kadar parçalanmasına ve optimum gaz üretim veriminin sağlanmasına, bu da sıcaklığa bağlıdır. HAS, anaerobik sistemlerde sıcaklığa da bağlı olarak 10-31 gün

arasında değişmektedir. Sürekli sistemlerde, bakterilerin iki katına çıkmasını sağlamak ve reaktörlerden kaçışını önlemek için HAS daha uzun seçilebilir. Hidrolik alıkoyulma süresi yeterli olmazsa reaktörden bakteriler daha hızlı kaçar ve uçucu yağ asidi konsantrasyonu artar. Böylece biyogaz üretimi azalır ve fermentasyon tam olarak gerçekleşmez.

Reaktör sıcaklığı arttıkça hidrolik alıkoyulma süresi düşer. Yüksek sıcaklıkta biyokimyasal reaksiyonlar daha kısa sürede gerçekleşir. Dolayısıyla hidrolik alıkoyulma süresini uygulanacak sıcaklığa göre seçmek gerekir [35].

Katı madde içeriği

Anaerobik arıtmada organik atıkların katı madde içeriği, oluşan biyogazın içerisindeki metan yüzdesini büyük oranda etkilemektedir. Biyoreaktöre doldurulan katı madde oranı %7-9 arasında olmalıdır. Düşük katı oranlarında anaerobik ortam koşullarını sağlamak zorlaşırken, yüksek katı derişiminde bakteriyel etkinliğin yavaşlaması nedeni ile biyogaz üretim hızı düşmektedir.

Aşılama

Organik atıklar anaerobik ortamda bırakıldıklarında biyogaz oluşum süreci kendiliğinden başlar. Ancak, işletilmekte olan başka bir tesisten alınan çamur yüksek mikroorganizma içerdiği için yeni çalışacak tesise aşılama işleminde alınma süresini kısıltacaktır.

2.4.4. Anaerobik arıtımın üstünlük ve sakıncaları

Atık su arıtma sistemleri göz önünde tutulduğunda anaerobik arıtmanın tercih edilmesini gerektiren pek çok neden bulunmaktadır. Bunları kısaca şöyle sıralayabiliriz:

1. $KOİ > 1500$ mg/L olan atık suların anaerobik arıtımı, aerobik arıtmaya göre önemli oranda daha ekonomiktir. Anaerobik arıtma ile enerji tüketilmez, biyoenerji (biyogaz) üretilir. Özellikle kuvvetli atıkların arıtımında, anaerobik arıtım tıpkı bir enerji jeneratörü gibi işlem görmektedir. Anaerobik arıtımla 1000 kg KOİ giderimi sonunda 2700 kw-sa eşdeğeri net enerji üretilebilir.
2. Anaerobik arıtma sistemlerinde oluşan biyolojik çamur miktarı aerobik sistemlere göre daha azdır. Genelde aerobik arıtmaya giren 100 gram organik karbondan 50 gram biyolojik çamur oluştuğu halde anaerobik arıtımda ortaya çıkan biyolojik çamur miktarı 1-5 gram dolaylarındadır. Dolayısıyla anaerobik arıtımda giderilen organik karbonun %90-98'i biyogaza (metan) dönüştürülür.
3. Anaerobik arıtma tesisleri, aerobik sistemlere göre daha az alan kaplarlar.
4. Anaerobik arıtmanın mekanik-ekipman maliyeti daha düşüktür.
5. Anaerobik sistemler şeker ve konserve gibi mevsimlik endüstriler için çok uygundur. Çünkü mikroorganizmalar $15^{\circ}C$ 'den daha az sıcaklıkta tutulmak koşuluyla beslenmeksizin, aktivitelerini uzun süre koruyabilirler.
6. Çok farklı reaktör kapasitelerinde arıtma verimleri değişmeksizin kullanılabilirler.
7. Anaerobik sistemlerde hacimsel organik yükleme, aerobik sistemlere göre 5-10 kat daha fazladır. Bu durum anaerobik reaktör hacimlerinin aerobik reaktörlere göre daha küçük olmasına olanak verirken, ilk yatırım maliyetlerinde önemli ölçüde bir azalma sağlamaktadır.
8. Anaerobik sistemlerde azot, fosfor gibi temel besi maddeleri gereksinimi aerobik süreçlerin %5-20'si kadardır.
9. Anaerobik süreçlerdeki 500-2000 kw-sa/1000kgKOİ'lik bir havalandırma enerjisine karşılık anaerobik süreçlerde böyle bir gereksinim yoktur [32].

Yukarıda belirtilen bu üstünlüklerin yanında, bir kısmı atık türüne bağlı olmak üzere anaerobik arıtmanın bazı kısıtları da bulunmaktadır. Bu kısıtlamaları da şu şekilde sıralayabiliriz:

1. İşletmeye alma devresinin daha uzun olması

2. Seyreltik ve karbonhidratlı atıklarda düşük alkaliniteye bağlı ek alkalinite gereksinimi
3. Bazı hallerde yüzeysel sulara boşaltım ölçütlerinin sağlanamaması (Toplam N ve P)
4. Seyreltik atıklarda üretilen metanın reaktörlerin 35°C’de ısıtılması için yeterli olmayışı
5. Sülfatlı atıklarda H₂S ve koku problemi
6. Klorlu organiklerin anaerobik arıtmada, aerobik arıtıma göre daha zararlı oluşu
7. Düşük sıcaklıklarda arıtma hızının düşük oluşu
8. Yüksek biyokütle aktivitelerinin oluşabilmesi için NH₄⁺ derişimlerinin de 40-70 mg/L gibi yüksek düzeylerde tutulma gereğı
9. Bazı tür endüstriyel atık sulara reaktör içinde ve boru aksamında ciddi inorganik çökelti ve taşlaşma sorunları

2.4.5. Anaerobik arıtım süreçlerinin işletmeye alınması ve süreç denetimi

Anaerobik arıtımın yaygın olarak kullanımını etkileyen en önemli etken aerobik sistemlere göre işletmeye alma devrelerinin uzunluğu ve süreç denetiminin de duyarlı oluşudur. Anaerobik mikroorganizmaların çoğalma hızlarının düşük olması nedeniyle işletmeye alma devresi uzun sürmektedir. Ancak optimum çevre koşulları sağlanarak ve uygun mikroorganizma türleri üretilerek metan dönüşümü en yüksek düzeye getirilebilir ve böylece süreç sonucu oluşan çamur miktarı azalır. Arıtılacak atığa uygun nitelikte bir mikroorganizma topluluğı (aşı çamuru) işletmeye alma aşamasında kullanılırsa alıştırma süresi kısalmır. İstenen özellikte aş yoksa evsel atık su arıtma tesisi çürütücüsünden veya Imhoff tankından alınan çamurla hatta hayvan gübresi ile aşılama yapılarak alıştırma devresi 2-3 ay sürebilir. Metan bakterilerinin çoğalma hızının düşük olması nedeniyle, sistemde arzu edilen organik yüklerde kararlı işletme durumuna ulaşılması 4-8 ay alabilir. Termofilik koşullarda bu süre daha da uzayabilir.

Anaerobik reaktörlerde işletmeye alma süresinin kısaltılması için bu dönemdeki biyokütle kaybının en düşük düzeyde tutulması gerekir. Bunun için de yüksek oranda geri döngü uygulanabilir veya sistemi terk eden biyokütle geçici olarak tesis edilen bir ultrafiltrasyon biriminde tutularak reaktöre geri döndürülebilir.

Anaerobik reaktörlerde alıştırma $0,1 \text{ kgKOİ/kgUAKM}$ gün veya $1-2 \text{ kgKOİ/m}^3$ gün'lük bir organik yükle başlatılabilir. Gaz debisi arttıkça organik yük de kademeli olarak artırılmalıdır. Şartlar uygun olduğu takdirde organik yükleme her hafta %50 artırılabilir [32].

Anaerobik arıtımın istenilen şekilde olması için arıtma sisteminin yakından takip edilmesi ve gerekli önlemlerin zamanında alınması gerekir. Etkili bir işletme ve izleme sonucu yüksek verimli bir arıtmanın sağlanması, metan dönüşüm oranının en yüksek olması ve olabildiğince az arıtma çamuru elde edilmesi gibi hedeflere ulaşılabilir.

Süreç denetiminin amacı arıtma sistemindeki düzensizliklerin olası en erken sürede belirlenmesidir. Bu amaçla anaerobik arıtmada süreç denetimi bakımından dikkatle izlenmesi gereken başlıca parametreler ve izleme sıklıkları Çizelge 2.9'da verilmiştir.

Çizelge 2.9. Anaerobik arıtmada proses kontrolü amacıyla izlenmesi gereken parametreler [32]

Parametreler	İzleme sıklığı
Sıcaklık	Sürekli
pH	Sürekli
Alkalinite	Günlük
Toplam Uçucu Asit(TUA)	3/hafta
Gaz debisi,Q	Sürekli
Gaz bileşimi(%CH ₄ ,%CO ₂)	3/hafta
Organik yük,KOİ ve arıtma verimi	3/hafta

Biyoenerji süreçlerinin ayrışma sürecinin kararlılığının bozulması genellikle TUA derişiminin artması ve pH'ın 6 civarına düşmesi ile kendini gösterir. Organik yük azaltılarak veya NaOH, kireç, NaHCO₃ gibi kimyasal maddeler kullanılarak pH

istenen değerlere ayarlanabilir. Sistemin pH'sının denetim altına alınmasının ardından dengesizliğin nedeni belirlenmelidir. Şayet geçici bir kararsızlık söz konusu ise reaktörde optimum çevre koşulları sağlanarak ve pH dikkatlice denetlenerek kısa sürede daha önceki normal işletme koşulları yeniden sağlanabilir. Uzun süreli ve önemli bir kararsızlık söz konusu ise, dengesizliğin nedeni ortadan kaldırılarak pH denetimi yapılsa bile arıtmayı gerçekleştiren, zarar görmüş mikroorganizmaların kararlı haldeki sistemden beklenen verimi sağlayacak miktara ulaşmaları tıpkı alıştırma döneminde olduğu gibi uzunca bir zaman gerektirebilir.

Herhangi bir nedenle kararlılığını yitiren bir anaerobik reaktörde, dengesizlik ilk önce sistemdeki TUA derişiminin artması sonucu pH'da ani bir düşüş ile kendini gösterir. pH'daki ani düşüşü bir süre sonra (yaklaşık 1 gün) alkalinitedeki ani azalma izler. Bu sırada gaz üretiminin yavaşlaması dolayısıyla gaz debisinde bir azalma ve gazdaki CH_4 yüzdesinde bir düşüş gözlenir. Bunların sonucu olarak da reaktör çıkışındaki $KOİ$ derişimi yükselir ve dolayısıyla sistemin verimi düşer [32].

2.5. Anaerobik Arıtma Sistemleri

Son yıllarda farklı türdeki endüstriyel atık suları arıtabilmek amacıyla çeşitli reaktör tipleri üzerine çalışmalar yapılmıştır. Buna göre anaerobik süreçler mikroorganizmaların askıda yada sabit film halinde olmalarına göre iki ana grupta incelenmiştir.

1. Askıda büyüyen reaktörler: Geleneksel anaerobik reaktörler, temas süreçler ve yukarı akışlı anaerobik çamur yataklı reaktörlerdir. Temas süreçlerin ve anaerobik çamur yataklarının performansları, mikroorganizmaların çökelme özellikleri iyi olan yumak veya granül oluşturabilme özelliklerine bağlıdır.
2. Sabit film reaktörler: Döner diskler, anaerobik filtreler ve anaerobik akışkan yataklı reaktörlerdir. Bu reaktörlerde, mikroorganizma yüzeyde koloni (biyofilm) halinde gelişirler. Ortam hem anaerobik filtredeki gibi sabit olabilir hem de döner disklerdeki ve akışkan yataklı reaktörlerdeki gibi hareketli olabilir.

2.5.1. Geleneksel anaerobik reaktörler

Tam karışım ve geri döngüsüz bir reaktördür. Çamur yaşı (mikroorganizma alıkoyulma süresi) hidrolik alıkoyulma süresine eşittir. Yavaş çoğalan metan bakterilerinin yıkanmasının önlenmesi için çamur yaşının 10 günden az olmaması gerekir. Uygulamada bu süre 15-20 gün alır. Hacminin çok büyük olması ve çıkıştaki askıdaki madde derişiminin yüksek oluşu gibi sakıncalardan dolayı geleneksel anaerobik reaktörler arıtma çamurlarının çürütülmesi dışında endüstriyel atık su arıtımında pek kullanılmamaktadır [32].

2.5.2. Yukarı akışlı çamur yataklı anaerobik reaktörler

Bu süreçte granül halindeki mikroorganizmalar yumaklar biçiminde bir çamur yatağı oluşturur. Sistemde biyokütle-atık su ayırma yarayan bir birim vardır. Biyokütleyi sistemden kaybetmemek için, atık suyun yukarı akış hızı, granül haldeki mikroorganizma yumaklarının çökme hızından büyük olmamalıdır. Mikroorganizmaların granül yapısı hem organik giderimi sağlamakta, hem de gerekli katı ve sıvı ayırma işlemini gerçekleştirmektedir. Bu sistem özellikle yüksek organik madde derişimlerine sahip atık suların gideriminde çok etkindir. Sistemin tasarım ve işletimi, mikroorganizmaların granülleşmesini sağlayabilmelerine bağlıdır ve granülleşme atık su özelliğinin bir fonksiyonudur. Özellikle yüksek derişimlerde karbonhidrat içeren atık suların granül oluşumuna yol açtığı saptanmıştır [30].

2.5.3. Anaerobik temas reaktörler

Anaerobik aktif çamur sistemi adı ile bilinen bu sürecin geleneksel anaerobik reaktörlerden tek farkı çöktürme tankı ve geri döngü düzeni eklenmiş olmasıdır. Böylece çamur yaşı artırılarak sistemin arıtma veriminin yükseltilmesi ve hacminin azaltılması sağlanmaktadır. Bu sistemin uygulamadaki en büyük sorunu çamurların çöktürülmesindeki zorluklardır. Çöktürme verimini artırmak amacıyla vakumlu gaz ayırıcı, termal şok ve plakalı çökelticiler gibi sistemler kullanılmaktadır. Buna

rağmen sistemdeki askıdaki katı madde derişimi (AKM) cinsinden çamur derişiminin 12000 mg/L'yi aşması halinde çökelmede ciddi sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bu yüzden en düşük organik yükün 5 kgKOİ/m³ gün'ü aşması istenmemektedir [32].

2.5.4. Anaerobik filtreler

Yukarı akışlı anaerobik filtreler plastik yada benzeri malzemeden yapılan dolgu maddesi içerir. Atık su, filtre malzeme üzerinde sabit bir film biçiminde büyüyen veya malzeme arasındaki boşlukta askıda bulunan mikroorganizmalar tarafından parçalanır. Filtre malzemesi düzenli olarak yerleştirilebileceği gibi rastgele de yerleştirilebilir. Filtre malzemenin yüzey alanı çok önemli bir parametredir. Aynı hacim için, yüzey alanı büyüdükçe arıtım verimi de yükselir. Bu sistemin alt kısmında biyokütle fazlasını toplamak ve sistemden uzaklaştırmak için bir bölüm bulunur.

Genellikle yukarı akışlı anaerobik filtrelerde gerekli karışımı sağlamak veya filtre yatağının tıkanan bölümlerini açmak için, sisteme basınçlı gaz (azot yada sistemde oluşan gaz karışımı) vermek üzere bir birim yerleştirilir. pH kontrolü amacıyla sistemin çıkış suyu sistemin girişine döndürülebilir. Bu çevrim oranı, giriş organik yüküne bağlı olmak üzere, giriş debisinin 10 katına çıkabilir.

Aşağı akışlı anaerobik filtre birçok yönden yukarı akışlı anaerobik filtre ile benzerlikler gösterir. Ancak akış yönü aşağı doğru olduğundan, bu sistemde askıdaki maddeler çıkış suyuyla beraber dışarı atılmakta ve tıkanma sorunları yukarı akışlı anaerobik filtrelere oranla çok daha az ortaya çıkmaktadır. Ayrıca çıkış suyu reaktör girişine geri döndürülmektedir [30].

2.5.5. Anaerobik akışkan yataklı reaktörler

Bu sistemlerde, anaerobik reaktör yukarı akışlı olarak çalıştırılmakta, yüksek bir geri çevrim hızı (575-975 m³/m² gün) uygulanmakta ve mikroorganizmaların üzerinde

büyüyebileceği bir yüzey sağlayan inert madde (genellikle kum) bulunmaktadır. Sistemdeki giriş suyu hızı dolgu malzemesini ve mikroorganizmaları askıda tutabilecek şekilde ayarlanır. Bu sistemlerin en önemli üstünlüğü birim reaktör hacmi başına elde edilen yüksek yüzey alanıdır. Bu 5-20 kgKOİ/m³ gün gibi yüksek organik yükleri olanaklı kılmakta, dolayısıyla gerekli reaktör hacmi diğer reaktör türlerine göre azalmaktadır. Ancak reaktör içeriğini askıda tutmak için gerekli olan enerji ihtiyacı bu sistemin önemli bir sakıncasıdır. Ayrıca dönemsel olarak, fazla biyokütleyi dolgu malzemesinden ayırmak ve dolgu malzemesini temizleyip yeniden işleme almak gerekebilmektedir [30].

2.5.6. İki kademeli anaerobik reaktörler

Anaerobik arıtma sistemleri, asit ve metan üretiminin tek bir reaktörde meydana geldiği tek kademeli reaktör şeklinde uygulanmak yerine bu iki aşamanın ayrıldığı iki kademeli (asit reaktörü-metan reaktörü) reaktörler tarzında da kullanılabilmekte olup son yıllarda bu yöndeki kullanımlar artmaktadır. Faz ayırmasına gitmek amacıyla anaerobik arıtmada organik yükün %50'ye yakın oranda artırılması olasıdır. Asit reaktörünün metan reaktörü ile aynı tip bir sistem olması da gerekmez. Böyle bir uygulama ile toplam hacimde de %30-40 oranında bir küçülme sağlanabilmektedir. Tam karışımli bir anaerobik tank veya derin anaerobik lagün rahatlıkla asit reaktörü olarak kullanılabilir [32].

İki fazlı anaerobik sistemlerin üstünlükleri şöyle özetlenebilir;

1. Ayrı fazlarda farklı mikroorganizma grupları için yaratılan iki farklı ortam ile, bu mikroorganizmaların büyümeleri ve aktiviteleri için daha uygun koşullar oluşturularak sistemin kararlılığı artırılır.
2. Atık sudaki zehirli maddeler asit fazında kalarak sadece çevresel parametrelere daha dayanıklı olan asitojenleri etkileyeceğinden, faz ayrımı metan fazında zehirlilikten daha fazla etkilenen metanojenler için tampon işlevi görür.

3. Özellikle hidroliz aşamasının sınırlayıcı adım olduğu atık sular söz konusu olduğunda faz ayrımı daha uygun olur.
4. Yüksek oranda H_2 üretimine yol açan hidroliz ve asit üretimi aşamalarının ilk fazda gerçekleşmesi, ikinci fazda H_2 'e duyarlı metanojenik mikroorganizmalar için daha uygun bir ortam sağlar.

Son yıllarda yapılan birçok araştırma kademeli sistemlerin yüksek organik yükü altında yüksek arıtma verimi ile işletilebileceğini, daha kararlı performans gösterdiğini ve propiyonik asit gideriminde tek kademeli sistemlere göre daha üstün olduğunu göstermiştir [30].

2.6. Yukarı Akışlı Çamur Yataklı Anaerobik Reaktörler

Son yıllarda geliştirilen yüksek hızlı anaerobik arıtım sistemleri arasında yukarı akışlı çamur yataklı anaerobik reaktörler (YAÇYA), evsel ve endüstriyel atık suların arıtımı için en çok kullanılan ve tercih edilenidir. Çünkü düşük işletme maliyeti ve yüksek arıtma verimliliğine sahiptirler [36]. Özellikle süt endüstrisindeki atık sularda bulunan karbonhidratların varlığı bakteriyel büyümeyi artıran polisakkaritlerin üretimini sağlar, böyle atık suların arıtımında granüller oluştuğu sürece başarılı işletilen YAÇYA reaktörlerin uygun olduğu düşünülür [37-38]. Yukarı akışlı çamur yataklı reaktörlerde, değişik türdeki anaerobik mikrobiyal topluluklar hidroliz, asitleşme ve metanlaşma gibi basamaklar sayesinde organik kirleticilerin yok olmasını kolaylaştıran çamur granüllerinin oluşumunu sağlar (Resim 2.1). Fermentatif bakteriler, asitojenik bakteriler ve metanojenler içeren bu anaerobik mikroplar genellikle simbiyotik bir bağ oluştururlar [39].



Resim 2.1. Anaerobik çamur granülleri [40]

Anaerobik çamur yataklı reaktörlerin çalışma prensibi, arıtımı sağlayan biyokütlenin uygun işletme koşullarında, granüler halde reaktörde tutularak sistemin yüksek çamur konsantrasyonlarında çalıştırılmasına dayanmaktadır. Yukarı akışlı çamur yataklı anaerobik reaktörler, biyolojik bir reaksiyon bölgesi ve bir çökme bölgesinden meydana gelmektedir. Reaksiyon bölgesinde atık su aktif bir çamur yatağından geçerek yukarıya doğru hareket ederken, girişteki organik bileşikler metana ve karbondioksit dönüştürülür. Üretilen gaz ve yüzen çamur, reaktörün üst kısmına yerleştirilen gaz-katı-sıvı ayırıcısıyla çıkış suyundan ayrılır. Böylece aktif biyokütle reaktör içinde tutulabilmektedir [41].

Anaerobik çamur yataklı reaktörlerde, arıtımı sağlayan mikroorganizmalar yumaklaşarak zamanla çökebilen 0,1-8 mm boyutunda granüller oluşturmaktadır. Bu tür reaktörlerde istenilen özellikte granüler çamur elde edilmesi, tesislerin işletmeye alma aşamasından itibaren uygulanan yükleme ile ilişkilidir. YAÇYA reaktörlerden istenilen seviyede yüksek hızlı bir arıtım gerçekleştirebilmek için aşağıdaki şartlar sağlanmalıdır:

1. Gaz, sıvı ve çamurlar birbirinden çok iyi ayrılmalıdır.
2. Anaerobik biyokütle, kolaylıkla çökebilen granüler şekilde olmalıdır.
3. Atık su, reaktör tabanına olabildiğince homojen dağılacak biçimde beslenmelidir.

YAÇYA reaktörlerde debi dağıtım sisteminin önemi oldukça büyüktür. Yüksek organik yüklerle arıtım yapılabilmesi için kanallaşma olmaması gerekir. Kanallaşma özellikle karıştırma için yeterli gaz üretiminin sağlanamadığı düşük sıcaklıktaki işletme koşullarında ve seyreltik atıkların arıtılmasında oluşmaktadır. Çamur yatağı yüksekliğinin ve dağıtma sistemindeki delik sayısının az olması durumunda da kanallaşma riski artmaktadır. Arıtılan atık suyun organik yüküne (KOİ) göre reaktör tabanındaki ağızlıklar; seyreltik atık sularda 5-10 m²/adet, konsantre atık sularda ise 2-3 m²/adet esasına göre yerleştirilebilir [42].

Gaz-katı-sıvı ayırıcı kısım ise reaktörde daha fazla çamur tutmak için gereklidir. Çözünebilir atık suları arıtan anaerobik çamur yataklı reaktörlerde gaz-katı-sıvı ayırıcının amacı şu şekilde sıralanabilir:

1. Reaktörden biyogazı ayırmak ve deşarj etmek.
2. Yaşayan bakteriyel maddenin uzaklaştırılmasının mümkün olduğu kadar önlemek.
3. Çürütücü bölümüne çamurun geri dönmesini sağlamak.
4. Çamur örtüsü tabakasının aşırı genleşmesini sınırlandıran bariyer gibi görev yapmak.
5. Yüzen granüler çamurun uzaklaştırılmasını önlemek.

2.6.1. Yukarı akışlı çamur yataklı anaerobik reaktörlerin işletilmesi

Atığın ön arıtımı

Ön arıtım olarak sedimentasyon, nötralizasyon ve asitleştirme yapılabilir. Yüksek miktarda askıda katı madde içeren atık suların anaerobik çamur yataklı reaktörlerde ön arıtımı mutlaka yapılmalıdır. Böyle sularda katılar uzaklaştırıldığı takdirde granülasyon gözlenmektedir. Yatakta inert madde birikimi ve aktivite kaybı tamamen atıktaki partiküllerin uzaklaştırılamamasıyla ilgilidir.

YAÇYA reaktörlerde düşük düzeyde karbonhidrat içeren atıklar ön asitleştirme basamağına ihtiyaç duymayabilir. Ancak atık su yüksek konsantrasyonda karbonhidrat içeriyorsa iki fazlı işletme daha etkili olabilir. Anaerobik çamurun kabarmasına neden olan uzun filamentli hidroliz yapan fermentasyon bakterileri glikoz ve nişastada pH=7'de daha iyi gelişir, fakat pH<6'da büyüme eğilimde değildir. Faz ayırıcı, bu organizmaların gelişmesini önleyebilir ve bu nedenle daha iyi çökelme özellikli ve daha yüksek özgül aktiviteye sahip granüllerin gelişmesine neden olur. Faz ayırıcının diğer üstünlüğü, pH kontrolü ve asidifikasyon tankına aşı ilavesiyle fermentasyon ürünlerinin kontrol edilmesidir. Aynı zamanda yüksek metan ve düşük CO₂ içerikli gaz genellikle iki fazlı işletme ile gerçekleştirilmektedir [43].

Diğer anaerobik sistemlerde olduğu gibi atık su yeterli tampon kapasitesini sağlayamazsa, atık sudaki alkalinite ihtiyacının karşılanması gerekir. Bu da çıkış suyunda geri döngü yaptırılarak sağlanabilir.

Granüllerin fiziksel ve kimyasal özellikleri

YAÇYA granüllerinin özgül ağırlığı 1,00-1,08 g/cm³ arasında değişir. Yoğunlukları ise başlangıç aşı maddesi, besi bileşeni ve reaktördeki pH, KOİ yükleme oranı, uçucu yağ asidi konsantrasyonu gibi işletme şartlarına bağlıdır.

Çapları 0,1-8 mm arasında değişen granüllerin büyüklükleri mikrobiyal topluluğa, besi bileşimi ve reaktördeki biyogaz akış hızına bağlıdır. Granüller genellikle kompleks tabakalı bir yapıya sahiptir. Filamentli *Methanotrix* içeren granüller, çubuk tipli *Methanotrix* içeren granüllerden daha çok gelişme eğilimindedirler. Ayrıca besindeki karbonhidratların çoğu büyük ölçülü ve yoğun granüllerin oluşumunu sağlar.

Granüller çapları 10-20µm arasında değişen birçok deliğe sahiptirler. Bu delikler biyogazın salıverilmesine izin verirken granüllerin içine de besinlerin girebilmesi için kanal görevi görürler [42].

X ışınları analizleri atomik spektrofotometreden elde edilen sonuçlara göre granüllerde başlıca Na, K, Ca, Mg ve Fe katyonları bulunmaktadır [41].

Metabolik aktivite

Granüllerin metabolik aktivitesi; spesifik metan üretim aktivitesi, spesifik KOİ uzaklaştırma oranı ve besi maddesi dönüşüm oranı ile ifade edilebilir. Granüler çamurun metabolik aktivitesi besi bileşimine, büyüme şartlarına, aktivite testi için kullanılan besi maddesinin ve granüllerin bileşimine bağlı olarak değişir. Genellikle spesifik KOİ uzaklaştırma oranını veya arıtılmış atık sudan metan üretim hızını değerlendirmek için kullanılır. Tam kapasiteli YAÇYA reaktörlerden alınan granüller genellikle 0,5-1,0 kgKOİ/kg UKM-gün arasında etkinliğe sahiptir [42].

Mikrobiyal bileşim ve granül yapısı

YAÇYA reaktörlerdeki granüllerin mikrobiyolojik yapıları besi maddelerinin içeriğine ve reaktörün sıcaklığına bağlıdır. Kompleks besi maddelerinde veya uçucu yağ asidi karışımlarında gelişen granüler çamurların, anaerobik reaktörlerde bulunan hidroliz yapan fermentasyon bakterileri, asetik asit bakterileri, metan bakterileri ve sülfat indirgeyen bakteriler gibi bazı mikrobiyal grupları içerdiği gözlenmiştir. Özellikle asetat kullanan metan bakterileri bütün granüllerde bulunan başlıca mikrobiyal gruptur.

Granüllerdeki *Methanothrix spp* toplam hücrelerin %30'unu oluşturmaktadır. *Methanothrix* gibi bakteriler granüllerin daha kararlı bir yapıda olmalarını sağlayan bir ağ ve yığın yaparlar.

Mezofilik sıcaklıklarda uçucu yağ asidi karışımlarında gelişen granüller 3 ayrı tipte gruplandırılabilir.

1. Çubuk tipli granüller: Genellikle çubuk şeklindeki bakterilerden olan *Methanothrix soehngenii*'den oluşurlar.
2. Flament tipli granüller: Uzun çok hücreli çubuk şeklindeki bakterilerden oluşurlar.
3. Sarkina tipli granüller: Reaktörde yüksek konsantrasyonda asetik asit korunduğu zaman gelişirler [42].

2.6.2. YAÇYA reaktörlerin işletmeye alınmasındaki zorluklar

Granüler ve yumaklaşmış çamurun yetersiz oluşu YAÇYA reaktörlerin başarılı bir şekilde işletmeye alınmasını engelleyen en önemli etkenlerdendir. İşletmeye alma aşamasında sorun olabilecek diğer etkenleri ise şu şekilde sıralayabiliriz:

1. Farklı atık sularda yetersiz granül oluşumunun nedenleri tam olarak bilinmemektedir.
2. Granüllerin dağılmasını artıran çevresel etkenler genellikle bilinmemektedir.
3. Değişen atık su özelliklerinde granüllerin kararlılığı önceden bilinemeyebilir.
4. Granül oluşumunu artıran sadece birkaç faktör bilinebilir.
5. Granüler olmayan aşıdan granüler çamurun oluşturulması zordur.
6. Granül büyüklüğü ve yoğunluğu tamamen kontrol edilemez.
7. Reaktörü işletmeye almak için en düşük granül miktarı bilinmemektedir.

Granüler çamurun elde edilebilmesinin sınırlı olması ve granüler çamurun satın alınmasının ve taşınmasının çok pahalı olması da YAÇYA reaktörlerin işletmeye alınmasında karşılaşılan problemlerdir.

YAÇYA reaktörlerin işletilmesini zorlaştıran nedenleri de şu şekilde sıralayabiliriz:

1. Yatak genişlemesinin kontrolü
2. Değişen besleme şartlarında prosesin kararlılığı
3. Şok yüklemelerde biyokütle alıkoyulması

4. İnert partiküllerin birikimi
5. Biyokütlenin yüzmesi

Tam kapasiteli YAÇYA reaktörlerin en büyük sorunu granül yüzmesidir. Reaktör çok bir yüklemeye maruz kaldığı zaman granül yüzmesi meydana gelebilir. Ayrıca uzun süren aç bırakma periyodundan sonra granüller tekrar beslenirse de yüzme meydana gelebilir [42].

2.7. Biyogaz

Biyogaz çok amaçlı olarak kullanılabilen, temiz bir enerji kaynağıdır. Başlıca hayvan dışkısı 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 [35].

2.7.1. Biyogazın özellikleri

Biyogaz; organik bazlı atıkların oksijensiz ortamda fermentasyonu sonucu ortaya çıkan renksiz, kokusuz, havadan daha hafif, parlak mavi bir alevle yanan, yoğunluğu 0,83g/L, oktan sayısı yaklaşık olarak 110, yanma sıcaklığı 700°C, alev sıcaklığı 870°C olan bir gaz karışımıdır. Biyogaz kolayca bozunmayan sabit bir yapıya sahiptir ve ancak -164°C’de sıvı hale gelebilir. Biyogazın bileşimi, elde edildiği organik maddenin cinsine ve fermentasyon şekline bağlı olarak değişir. Buna göre tipik bir biyogazın bileşimi Çizelge 2.10’da verilmiştir.

Çizelge 2.10. Biyogazın bileşimi [35]

Gazın cinsi	Yüzde bileşimi
Metan (CH ₄)	54-80
Karbondiyoksit (CO ₂)	20-45
Azot (N ₂)	0-1
Karbonmonoksit (CO)	0,1
Oksijen (O ₂)	0,1
Hidrojen sülfür (H ₂ S)	Az miktarda

Biyogazın yakıt değeri karışımındaki metan gazından ileri gelmektedir. 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.

2.7.2. Biyogaz üretiminde kullanılan organik atıklar

Biyogaz üretiminde birçok hammadde kullanılabilir. Bu maddeler organik içerikli olmalı ve kolaylıkla metana dönüşümü sağlanabilmelidir. Biyogaz üretiminde kullanılabilecek organik atıkları şu şekilde sıralayabiliriz.

Hayvansal atıklar: Sığır, at, koyun, tavuk gibi hayvanların dışkıları, mezbahane atıkları ve hayvansal ürünlerin işlenmesi sırasında ortaya çıkan atıklar özellikle kırsal kesimler için önerilen biyogaz tesislerinde kullanılmaktadır.

Bitkisel atıklar: İnce kıyılmış sap, saman, anız ve mısır artıkları, şeker pancarı yaprakları ve çimen artıkları gibi bitkilerin işlenmeyen kısımları ile bitkisel ürünlerin işlenmesi sırasında ortaya çıkan atıklardır.

Organik içerikli şehir ve endüstriyel atıklar: Kanalizasyon ve dip çamurları, kağıt sanayi ve gıda sanayi atıkları, çözünmüş organik madde derişimi yüksek endüstriyel ve evsel atık sular biyogaz üretiminde kullanılmaktadır. Bu atıklar özellikle

belediyeler ve büyük sanayi tesisleri tarafından yüksek teknoloji kullanılarak tesis edilen biyogaz üretim merkezlerinde kullanılan atıklardır.

Çizelge 2.11. Çeşitli kaynaklardan elde edilebilecek biyogaz verimleri ve biyogazdaki metan miktarları [33]

Kaynak	Biyogaz verimi (Litre/kg)	Metan oranı (Hacimce %)
Sığır Gübresi	90-310	65
Kanatlı Gübresi	310-620	60
Domuz Gübresi	340-550	65-70
Buğday samanı	200-300	50-60
Çavdar samanı	200-300	59
Arpa samanı	290-310	59
Mısır sapları ve artıkları	380-460	59
Keten & Kenevir	360	59
Çimen	280-550	70
Sebze Artıkları	330-360	Değişken
Ziraat atıkları	310-430	60-70
Yerfıstığı kabuğu	365	-
Dökülmüş ağaç yaprakları	210-290	58
Algler	420-500	63
Atık su çamuru	310-800	65-80

2.7.3. Biyogazın diğer yakıtlarla karşılaştırılması

1m³ biyogazın sağladığı ısı miktarı 0,62 litre gazyağı, 1,46 kg odun kömürü, 3,47 kg odun, 0,43 kg bütan gazı, 12,3 kg tezek, 4,70 kWh elektrik enerjisinin sağladığı ısıya eşdeğerdir [44].

1m³ biyogaza eşdeğer yakıt miktarları ise şu şekildedir;

- 0,66 litre motorin
- 0,75 litre benzin
- 0,25 m³ propan

2.7.4. Biyogazın kullanım alanları

Biyogazın ısıtmada kullanımı

Biyogazın yanma özelliği bileşiminde bulunan metan (CH_4) gazından ileri gelmektedir. Biyogaz, hava ile yaklaşık 1/7 oranında karıştığı zaman tam yanma gerçekleşmektedir. Isıtma amacıyla gaz yakıtlarla çalışan fırın ve ocaklardan yararlanılabileceği gibi termosifon ve şofbenler de biyogazla çalıştırılarak kullanılabilir.

Biyogaz, sıvılaştırılmış petrol gazı ile çalışan sobalarda da kolaylıkla kullanılabilir. Biyogaz sobalarda kullanıldığında bünyesinde bulunan hidrojen sülfür (H_2S) gazının yanmadan ortama yayılmasını önlemek üzere bir baca sistemi gerekli olmaktadır. Bu nedenle, daha sağlıklı bir ısınma için kalorifer sistemleri tercih edilmektedir.

Biyogazın aydınlatmada kullanımı

Biyogaz, hem doğrudan yanma ile hem de elektrik enerjisine çevrilerek de aydınlatmada kullanılabilir. Biyogazın doğrudan aydınlatmada kullanımında sıvılaştırılmış petrol gazları ile çalışan lambalardan yararlanılmaktadır. Bu sistemde aydınlatma alevini artırmak üzere amyant gömlek ve cam fanus kullanılmaktadır. Cam fanus ışığı sabitleştirdiği gibi çıkan ısıyı geri vererek alevin daha fazla olmasını sağlamaktadır.

Biyogazın motorlarda kullanımı

Biyogaz, benzinle çalışan motorlarda hiçbir katkı maddesine gerek kalmadan doğrudan kullanılabilirdiği gibi içeriğindeki metan gazı saflaştırılarak da kullanılabilir. Dizel motorlarda kullanılması durumunda belirli oranda (%18-20) motorin ile karıştırılması gerekmektedir [44].

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Gavala ve ark. Yunanistan’da yüksek organik madde içeriğine sahip ($\approx 40-60 \text{ g KOİ/L}$) peynir üretim endüstrisinden gelen atık suyu YAÇYA reaktörde işleminden geçirmişlerdir. Bu atık su biyolojik olarak kolaylıkla parçalanabilecek karbonhidratlar içermektedir. Ayrıca $1-5 \text{ g/L}$ gibi az miktarda askıda madde bulunmaktadır. Yüksek oranda organik madde içermesi nedeniyle arıtımda kullanılabilecek tek yöntem anaerobik arıttır. Çalışmada YAÇYA reaktör kullanılma nedeni katı oranı düşük maddelerde bu sistemin etkili verim sağlamasıdır. Yüksek hızlı arıtım sistemleri olan bu reaktörlerin performansı, hızlı çökebilme özelliğine sahip yüksek miktarda biyokütle içeriğine ve yoğun metanojenik çamur granüllerine bağlıdır. Bu çalışmada 35°C sıcaklıkta korunan 10 litre hacminde YAÇYA reaktör kullanılmıştır. Glikoz katılan özümleyiciler ile aşılana reaktörde atık suyun değişik organik yükleme hızlarında arıtım verimliliği ölçülmüş ve sistem performansı pH, çözülmüş KOİ ve üretilen biyogaz ölçümleri yapılarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak yükleme hızının $6,2 \text{ g KOİ/Lgün}$ ’de, giriş konsantrasyonunun 37 g/L , pH’ın $7,0-7,3$ arasında, hidrolik bekleme süresinin 6 gün olduğu durumda verimin $\%85-99$ olduğu görülmüştür [45].

Ergüder ve ark. 2001 yılındaki çalışmalarında granüler çamur ile aşılana tek ve iki kademeli YAÇYA reaktörü kullanarak peyniraltı suyunun anaerobik olarak arıtılabilirliğini ve metan üretim potansiyelini araştırmışlardır. Ayrıca besin ve iz elementi ilavesinin arıtıma olan etkileri incelenmiştir. Bu amaçla metan üretim potansiyeli deneyleri yapılmıştır. Giriş KOİ konsantrasyonunun, hidrolik bekleme süresinin ve organik yükleme hızının sistem verimi üzerine olan etkisi araştırılmıştır. Buna göre KOİ konsantrasyonunun $42,7-55,1 \text{ g/L}$ olduğu giriş şartlarında (peyniraltı suyu pH’ı $3,92$), hidrolik bekleme süreleri $2-3 \text{ gün}$ tutularak $\%95-97$ oranında KOİ giderimi sağlanmıştır. Bununla birlikte $\%72-82$ oranında metan içeren biyogaz elde edilmiştir ($424 \text{ mL CH}_4/\text{g KOİ}$). Ulaşılan bir başka ilgi çekici nokta ise seyreltilmemiş peyniraltı suyunun kısa hidrolik bekleme sürelerinde önemli herhangi bir kararsızlık

problemi oluşmaksızın anaerobik olarak arıtılabılesidir. Ayrıca besin ve iz elementi katılmasının peyniraltı suyu arıtımı için çok önemli olduğu sonucuna varılmıştır [11].

Pufial ve ark. 1998 yılında yaptıkları çalışmada 20 kgKOİ/m³gün'den daha yüksek organik yüke sahip peyniraltı suyunun tek beslemeli ve çok beslemeli iki adet yukarı akışlı havasız filtre ile arıtılmasıyla oluşan biyokütle karşılaştırılmıştır. Çok beslemeli reaktörün metanlaşma kapasitesi tek beslemeliden oldukça yüksek çıkmıştır ve bu da özellikle yüksek organik yükleme hızında gerçekleşmiştir [46].

Kasapgil ve İnce 2000 yılında iki kademeli anaerobik arıtma sistemi kullanarak 34 hafta boyunca reaktördeki mikrobiyal popölasyonda meydana gelen değişimi izlenmişlerdir. Yukarı akışlı havasız filtre reaktörün kullanıldığı bu çalışmada 7 kg/m³gün değerindeki organik yükleme hızıyla %90 KOİ giderimi ve 0,33 m³CH₄/kgKOİ metan verimi elde edilmiştir [47].

Nadaisa ve ark. 2005 yılındaki çalışmalarında mezofilik koşullarda yumaklaşmış çamur ile aşılanan YAYA reaktörlere süthane atık sularını aralıklı besleyerek döngü zamanının arıtma verimine etkisi incelenmiştir. Besleme periyodunun metan dönüşüm oranına etkilerini görmek amacıyla 2,5-29 gKOİ/Lgün arasındaki organik yükleme hızları kullanılarak 24-144 saat arasında değişen 5 döngü uzunlukları karşılaştırılmıştır. Buna göre en yoğun metan dönüşümü 96 saatlik döngüde yani 48 saat beslemeli 48 saat beslemesiz döngüde elde edilmiştir. Ayrıca literatürde sürekli sistemler için öngörölen ve kararlılığın sağlanabildiği organik yükleme hızı 3-6 gKOİ/Lgün olmasına rağmen bu çalışmada YAYA reaktör kullanılarak organik yükleme hızının 22 gKOİ/Lgün'e çıkarılabileceği tespit edilmiştir [48].

Ramasamy ve ark. 2004 yılında Hindistan'da yaptıkları çalışmada iki tip YAYA reaktör kullanılmış ve süthane atık sularının arıtımındaki etkinlikleri incelenmiştir. Bu reaktörlerden birinde özömlenmiş inek gübresinden elde edilen anaerobik çamur granöllerini diğerinde ise M/s EID Parry şeker endüstrisi atık sularını arıtan reaktörlerden elde edilen anaerobik çamur granöllerini aşı olarak kullanılmıştır.

Reaktörler 3-12 saatlik hidrolik bekleme sürelerinde ve 2,4-13,5 kgKOİ/m³gün değerleri arasındaki organik yükleme hızlarında çalıştırılmıştır. Her iki reaktörde 3 saatlik hidrolik bekleme süresinde 12 saate göre daha yüksek KOİ giderimi sağlanmıştır. Hidrolik bekleme süresi 3 gün olduğunda KOİ'deki azalma sırasıyla %95,6 ve %96,3 olarak, hidrolik bekleme süresi 12 gün olduğunda KOİ'deki azalma sırasıyla %90 ve %92 olarak ölçülmüştür. Yine her iki reaktör için en fazla KOİ gideriminin sırası ile 10,8; 8,6 ve 7,2 kgKOİ/m³gün değerindeki organik yükleme hızlarında olduğu sonucuna varılmıştır. 10,8 kgKOİ/m³gün'den daha yüksek organik yükleme hızlarında reaktörün performansı hızla düşmüştür. Sonuçta en iyi verimin 10,3 kgKOİ/m³gün'lük yükleme hızında aşı çamuru olarak inek gübresi kullanıldığında %95,6, aşı çamuru olarak şeker endüstrisi atık suyu kullanıldığında %96,3 olduğu belirlenmiştir. Ayrıca şeker endüstrisi atık sularını arıtan reaktörlerden alınan aşı kullanıldığında ilk birkaç ayda süthane atık sularında daha iyi biyolojik arıtım sağlandığı gözlenmiştir. Özümlemiş inek gübresinden elde edilen anaerobik çamur granülleri kullanıldığında ise arıtım zamanla artmıştır [17].

Kalyuzhnyi ve ark. 1997 yılında yaptıkları çalışmada, mezofilik (35°C) ve mezofilik olmayan (20-30°C) koşullarda, laboratuvar ve pilot ölçekli yukarı akışlı çamur yataklı anaerobik reaktörlerde yüksek kirlilik konsantrasyonuna sahip (77gKOİ/Lgün) peyniraltı suyunun arıtım verimliliği ve kabul edilebilir en fazla organik yükleme hızları araştırılmıştır. 3 litrelik laboratuvar ölçekli YAÇYA reaktörü kullanılarak mezofilik koşullar için 28,5 gKOİ/Lgün organik yükleme hızında, mezofilik olmayan koşullar için de 9,5 gKOİ/Lgün organik yükleme hızında %90'dan daha fazla KOİ giderim verimliliği sağlanmıştır. 25-30 gKOİ/Lgün değerindeki organik yükler için 5 günlük hidrolik bekleme süresi uygun görülmüştür. pH kontrolünün NaOH ile sağlandığı sistemde 7 günlük hidrolik bekleme süresinde ve 10 gKOİ/Lgün organik yük ile sistemde alkaliniteye kararlılık sağlanmıştır. Daha sonra oda sıcaklığında (24°C) herhangi bir ısıtma yapılmadan işletilen 10.74 m³ hacmindeki pilot ölçekli YAÇYA reaktörlerde peyniraltı suyunun arıtımı çalışılmıştır. Kullanılan aşı çamuruna peyniraltı suyunun alıştırılması için 3 aylık bir zaman geçmiştir. Reaktörde tampon kapasitesi 1-3 g/L NaHCO₃ kullanılarak

sağlanmıştır. Pilot ölçekli reaktörde ise 6,5 gKOİ/Lgün değerindeki organik yükleme hızı ile verimin %95'e yaklaştığı ve sistemin kararlı hale geldiği görülmüştür [5].

Jeong ve ark. 2005 yılında yaptıkları çalışmada organiklerin anaerobik arıtımında mikroorganizmaları en yüksek konsantrasyonda tutmak amacıyla kullanılabilecek organik ve inorganik polimerler araştırılmıştır. Çamur granüllerinin kendiliğinden oluşumu 6 ay sürmektedir. Ancak çamurun granülleştirilmesi bu süreyi kısaltmak için iyi bir yöntemdir. Bunu sağlamak amacıyla evsel atık suya organik ve inorganik hibrit polimerlerin katılmasıyla 5 dakika içerisinde boyutları 1-5 mm arasında değişen granüller oluştuğu görülmüştür. Oldukça büyük miktarda oluşan bu granüllerin çökme hızlarının da yüksek olduğu belirlenmiştir. YAÇYA reaktörlerin işletilmesinde kararlı bir çamur yatağı sağlandıktan sonra 18 kgKOİ/m³gün değerindeki organik yükleme hızı ile %90 KOİ giderme verimi sağlandığı görülmüştür [49].

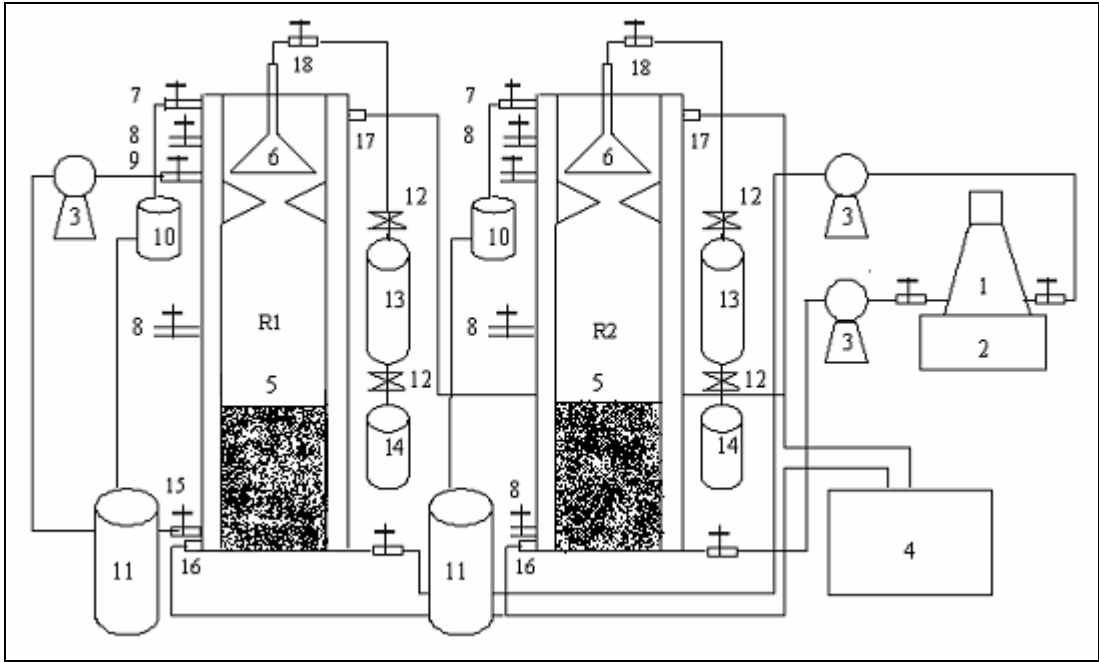
4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Deney Düzeneği

Bu çalışmada 3,4 litre hacimli kuvartz cam malzemeden yapılmış aynı boyutlardaki paralel bağlı 2 adet laboratuvar ölçekli yukarı akışlı çamur yataklı anaerobik reaktör kullanılmıştır. Birinci reaktör R1 ve ikinci reaktör R2 olarak adlandırılmıştır. Reaktörlerin çapı 6 cm ve yüksekliği 120 cm'dir. Şekil 4.1'den de görüldüğü gibi reaktörlerin üst kısmından 3,5 cm aşağıda çıkış suyu muslukları, bundan 5 cm aşağıda numune alma muslukları, onun 6,5 cm altında ise geri döngü çıkışları, geri döngü çıkışından sonra 50 cm aralıkla numune alma muslukları ve geri döngü girişi yer almaktadır. Geri döngü girişinden 5 cm aşağıda ise reaktörlerin sıcaklığını 35°C'de sabit tutmak amacıyla tasarlanan 1 cm kalınlığındaki su ceketi girişleri ve onun karşısında da besleme girişleri bulunmaktadır. Reaktörlerin üst kısmına gaz-katı-sıvı ayırıcı sistem yerleştirilmiştir. Gaz-katı-sıvı ayırıcı sistemin hacmi 0,24 litredir. Besleme tankı, reaktörler, pompalar, gaz toplama kolonları, pH metre, sirkülasyonlu su banyosu, manyetik karıştırıcı, çıkış sularının toplandığı dereceli silindirlerden oluşan sistem, Resim 4.1'de gösterilmiştir. Düzenek oda sıcaklığının 30°C'de sabit kalması amacıyla Febbre marka duvar tipi ısıtıcının kullanıldığı bir odaya kurulmuştur.

Alttan iki farklı çıkışı bulunan 3 litrelik besleme tankında günlük olarak hazırlanan peyniraltı suyunun sıcaklığı, Heidolph marka MR 3001 model manyetik karıştırıcı kullanılarak 35°C'de tutulmuştur. Perista marka pompalar vasıtasıyla çekilen bu besleme her iki reaktöre de en alt kısımlarından verilmiştir. Aynı tanktan farklı iki pompa ile çekilen PAS reaktörlere silikon hortumlar kullanılarak beslenmiştir ve tüm bağlantı elemanları için yine silikon hortumlar kullanılmıştır. Düşük akış hızlarında çalışabilen bu pompalar ile beslemenin yukarı akış hızı 0,56 mL/dk olarak ayarlanmıştır. R1'de belli bir süre için çalıştırılan değişen geri döngü akış hızları yine peristaltik pompayla sağlanmıştır. Reaktörlerin çevresinde sürekli olarak sıcak su dolanımını sağlamak amacıyla Poly Science marka sirkülasyonlu su banyosu

kullanılmıştır. Çıkış suyu musluklarından gelen arıtılmış su önce 40 ml'lik küçük havuzlarda toplanmış, buradan da dereceli silindirlere boşalmıştır. Bu havuzlar çıkış suyu analizlerinde kullanılacak örnekleri alma ve çıkış suyu pH'nı sürekli kontrol etme amacıyla kullanılmıştır. pH kontrolünde Hanna marka HI8711E model ve Metrohm marka 744 model pH metre kullanılmıştır.



Şekil 4.1. Deney düzeneğinin şematik gösterimi

1. Besleme tankı 2. Manyetik karıştırıcı 3. Peristaltik pompa
4. Sirkülasyonlu su banyosu 5. Çamur yatağı 6. Gaz-katı-sıvı ayırıcı
7. Çıkış suyu musluğu 8. Örnek alma musluğu 9. Geri döngü çıkışı
10. Örnek toplama kabı 11. Çıkış suyu tankı 12. Vana
13. Gaz toplama kolonu 14. Çözelti şişesi 15. Geri döngü girişi
16. Su ceket girişi 17. Su ceket çıkışı 18. Gaz çıkışı

Reaktörlerde oluşan gaz karışımlarını toplamak amacıyla en üstte bulunan gaz çıkışı boruları iki farklı gaz toplama kolonuna bağlanmıştır. Kolonların giriş ve çıkışlarına vanalar yerleştirilmiştir. Gaz toplama kolonlarının alt vanalarından çıkan gaz, içinde $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ çözeltisi bulunan kabın içinden geçmektedir. Kolonlarda biriken gazın bileşimini belirlemek amacıyla, gaz toplama kolonlarının üst kısmındaki

vanalar kapatılarak çözeltinin içine daldırılan hortumlar çıkarılmış ve Madur marka gaz ölçüm cihazına bağlanmıştır.



Resim 4.1. Deney düzeneği [50]

Deneysel çalışma boyunca reaktörler 35°C’de, Atatürk Orman Çiftliği (AOÇ) Peynir Üretim Tesisi’nden sağlanan peyniraltı suları ile beslenmiştir. Kullanılan peyniraltı suyuna ait özellikler Çizelge 4.2’de verilmiştir. Reaktörlerde granülasyon sağlamak amacıyla Ankara Merkezi Atık Su Arıtma Tesisi’ndeki (ASKİ) 7 anaerobik aktif çamur arıtma reaktörlerinden birinin orta noktasından alınan özümleyici, aşı olarak kullanılmıştır. Aşılama olarak reaktör hacminin yaklaşık %1,5 kadarına (~50 ml) doldurulan anaerobik çamurun özellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Başlangıçta R1 için 1,8 cm ve R2 için 1,6 cm yüksekliklerinde aşı konulmuştur. Aşı reaktörlere doldurulduktan sonra peyniraltı suyu alıştırma ve granül oluşturma devresinde 1/10 oranında seyreltilerek 0,8 L/gün’lük debi ile beslenmiştir. Yüksek miktarda organik

madde içeren (~ 70000 mg KOİ/L) peyniraltı suyunun organik yükü bu seyreltme oranı ile ortalama 7000 mgKOİ/L'ye düşürülmüş ve organik yükleme hızı $1,75$ kg KOİ/m³gün olarak beslenmiştir. Yatak belli bir yüksekliğe geldikten sonra peyniraltı suyunda $1/20$, $1/5$, $1/4$, $1/3$ ve $1/2$ oranında seyreltmeler yapılarak besleme olarak kullanılmıştır.

Çizelge 4.1. Kullanılan aşı çamurunun özellikleri

pH	7,56
Alkalinite (mg CaCO ₃ /L)	3288
Uçucu asit (mg CH ₃ COOH/L)	165,7

Çizelge 4.2. Kullanılan peyniraltı suyunun bileşimi

pH	6,28–6,70
KOİ (mg/L)	70000
TKA (mg/L)	260,40
TKM (mg/L)	58750
UKM (mg/L)	51750

Ortalama $35\pm 1^\circ\text{C}$ 'de korunan reaktörlere beslenen peyniraltı suyunun pH'ı $7,0$ - $8,0$ aralığında tutulmuştur. pH değerinin bu aralıkta kalmasını sağlamak için peyniraltı suyuna NaHCO₃ ilave edilmiştir. pH'ı $7,8$ 'e ayarlanan peyniraltı suyunda gün boyunca kararlı bir pH dengesi sağlamak amacıyla sisteme vermeden önce 68°C 'de 30 dk ısıtılarak pastörizasyon işlemi uygulanmıştır, böylece beslemede mikrobiyal etkinlik düşürülmüştür. Daha sonra sıcaklığı 35°C 'ye düşürülerek reaktörlere beslenmiştir. Mikroorganizma etkinliklerini önlemek amacıyla peyniraltı suları derin dondurucuda saklanmış ve kullanılacağı zaman günlük olarak çıkarılmıştır.

Sodyum bikarbonat ile pH'ı ayarlandıktan sonra pastörizasyon işlemi uygulanan beslemedeki azot eksikliğini gidermek için de NH₄Cl kullanılmıştır. Anaerobik arıtımda biyolojik ayrışmanın gerçekleşebilmesi için gerekli olan KOİ/N/P ($300/5/1$)

oranında, beslemedeki azottan ileri gelen eksiklik seyreltme oranına bağlı olarak değişik miktarlarda NH_4Cl kullanılarak giderilmiştir. Çalışmada, azot ilavesi 1/20 seyreltme oranı ile hazırlanan besleme sisteme verildiği andan itibaren yapılmıştır. Ancak değişen her bir organik yükte, PAS önce azot eklenmeden birkaç gün, sonra azot eklenerek birkaç gün sisteme beslenmiştir. Ayrıca granül oluşumunu hızlandırmak amacıyla, besleme çözeltisine KOİ değeri 1/2 seyreltme oranı ile ortalama 35000 mgKOİ/L 'ye artırıldığı zaman demir elementi ilave edilmiştir. Granülleşme için 1 mg/L demir ilavesi yeterli olup bu amaçla $\text{FeCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ kullanılmıştır.

Çalışmada kullanılan peyniraltı suyunun KOİ konsantrasyonu çok yüksek olduğundan debi değiştirilemediği için farklı seyreltme oranları ile organik yük değiştirilmiştir. Alıştırma ve granül oluşturma devresinde sisteme 1/10 seyreltme oranı ile organik yükü ~7000 mgKOİ/L olan PAS 50 gün boyunca beslenmiştir. 75 günlük bir periyod süresince yürütülen çalışmanın kalan kısmında sırası ile 1/20, 1/5, 1/4, 1/3 ve 1/2 seyreltme oranları ile organik yükü ~ 3500 mgKOİ/L , 14000 mgKOİ/L , 17500 mgKOİ/L , 23000 mgKOİ/L ve 35000 mgKOİ/L olan peyniraltı suları kullanılmıştır. Her bir organik yük için reaktörlerin arıtma verimleri belirlenmiş ve buna bağlı olarak da çamur yatağı yükseklikleri ve oluşan gazdaki metan yüzdeleri tespit edilmiştir.

Alıştırma-granül oluşturma devresi ve işletme süresince kullanılan farklı organik yüklemelerde, reaktörlerin giriş ve çıkışından alınan numunelerde pH, kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), alkalinite ve uçucu asit analizleri yapılmıştır.

4.2. Yapılan Analizler ve Yöntemleri

Kullanılan peyniraltı suyunun karakterizasyonunu belirlemek amacıyla KOİ tayini spektrofotometrik yöntemle, toplam kjeldahl azotu (TKA), alkalinite ve uçucu asit analizleri titrimetrik yöntemle, toplam katı madde (TKM), uçucu katı madde (UKM), sabit katı madde (SKM) analizleri ise gravimetrik yöntemle yapılmıştır. Belirli

zaman aralıklarında çıkış suyundan alınan örneklerde yine KOİ, alkalinite ve uçucu asit analizleri yapılmıştır. Analizlerin birçoğunda standart yöntemlerden yararlanılmıştır. Oluşan gazdaki metan yüzdesini belirlemek amacıyla Madur marka GA-21 plus model gaz ölçüm cihazı kullanılmıştır. Ayrıca düzenli olarak çıkış suyu pH'ları Metrohm marka 744 model pH metre ile günlük olarak ölçülmüştür.

4.2.1. Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) tayini (Spektrofotometrik yöntem)

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

Kullanılan cihazlar

- Spektrofotometre (WTW marka pHotoFlex model)
- Reaktör (WTW marka CR 2200 model)

Kullanılan çözeltiler (1-1000 mg/L için)

1. Potasyum dikromat, civa sülfat ($K_2Cr_2O_7$ -HgSO₄) çözeltisi: 20 g HgSO₄, 200 mL saf su ve 25 mL derişik H₂SO₄ 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 (H₂SO₄-AgSO₄) 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.

Deneyin yapılışı

Deney tüpünün içine $K_2Cr_2O_7$ -HgSO₄ çözeltisinden 1 mL, H₂SO₄-AgSO₄ çözeltisinden 2 mL alınarak karıştırılır ve bir gün bekletilir. Böylece deney tüpü hazırlanmış olur. Hazırlanmış deney tüpünün üzerine örneğin alındığı yer yazılarak

olası bir karışıklık önlenir. Aynı işlemler tanık örnek (2 mL saf su) için de yapılır. Spektrofotometre açılarak cihazın ısınması beklenir. İçine 2 mL örnek eklenen deney tüpünün kapağı kapatılarak iyice çalkalanır. Reaktöre konularak 148°C’de 2 saat ısıtılır. Süre bitiminde alınan deney tüpleri oda sıcaklığında soğutulur. Reaktörden çıktıktan sonra tüplerin görünümü Resim 4.2’de gösterilmiştir. Örnek hacmi azalmışsa değerlendirmeye alınmaz. Bunun önlenmesi için deney tüplerinin kapağı sıkı kapatılır. Önce tanık örnek okutularak spektrofotometrenin “0” ayarı yapılarak diğer tüpler okutulur ve kaydedilir [35].



Resim 4.2. KOİ ölçümünde kullanılan reaktör ve deney tüpleri [50]

Hesaplama

110°C’de sabit tartıma getirilen 0,85034 g. KHP 100 mL saf suda çözülerek potasyum hidrojen ftalat stok çözeltisi hazırlanır. Bu çözeltiden KOİ değerleri bilinen farklı derişimlerde çözeltiler hazırlanarak 610 nm dalga boyunda spektrofotometrede

okutulur. Spektrofotometrede okunan değerler absorbans (x) değerleridir. Elde edilen bu absorbans değerlerine karşı KOİ değerleri grafiğe geçirilerek kalibrasyon eğrisi oluşturulur. Elde edilen kalibrasyon eğrisinin eğimi hesaplatılarak $y = A \cdot x + B$ şeklindeki denklik elde edilir. Bu denklemden yararlanarak, 610 nm dalga boyunda ölçülen x (absorbans) değerlerini yerine koyup istediğimiz numunenin y (KOİ) değerini bulmuş oluruz.

4.2.2. Toplam kjeldahl azotu (TKA) tayini

Kullanılan çözeltiler

1. Parçalama çözeltisi: 13,4 g K_2SO_4 ve 0,73 g $CuSO_4$ 'ı 80 mL suda çözülür. 13,4 mL konsantre H_2SO_4 dikkatlice eklenir. Oda sıcaklığına gelince, çözelti 100 mL'ye seyreltilir ve iyice karıştırılır. Kristallenmenin önlenmesi için, sıcaklığı $20^\circ C$ civarında tutulur.
2. Sodyum hidroksit-sodyum tiyosülfat çözeltisi: 50 g NaOH ve 2,5 g $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ suda çözülür, 100 mL'ye seyreltilir.
3. Borik asit çözeltisi: 2 g H_3BO_3 suda çözülür, 100 mL'ye seyreltilir.
4. İndikatör borik asit çözeltisi: 2 g H_3BO_3 suda çözülür ve 1 mL karışık indikatör çözeltisi eklenir ve 100 mL'ye seyreltilir. Her ay yeniden hazırlanır.
5. Karışık indikatör çözeltisi: 20 mg metil-kırmızısı indikatörü 10 mL %95'lik etil veya izopropil alkolde çözülür. 10 mg metilen-mavisi 5 mL %95'lik etil ya da izopropil alkolde çözülür. Karışımlar birleştirilir. Aylık olarak hazırlanır.

Deneyin yapılışı

10 mL örnek kjeldahl balonuna alınır ve üzerine dikkatlice 10 mL parçalama çözeltisi eklenir. Balonun içine 5-6 adet cam boncuk atılır. SO_3 buharlarını uzaklaştırmak için balon ısıtılır. Ateş önce orta dereceye ayarlanır; çözelti saydam, açık yeşil hale gelene kadar ve çok miktarda buhar gözlenene kadar kaynatmaya devam edilir. Daha sonra ateş en yüksek aya getirilerek 30 dakika daha parçalama

Deneyin yapılışı

Eğer uçucu katılar ölçülecekse temiz porselen kroze fırında 550°C’de 1 saat bekletilir. Eğer sadece kuru katılar ölçülecekse temiz kroze 103-105°C arasında 1 saat ısıtılır. Kroze ihtiyaç duyulana kadar desikatörün içinde soğutulur ve saklanır. Kullanmadan önce hızlı bir şekilde tartılır. Önceden ağırlığı tartılan kroze, pipetle iyi karışmış örnekten 30 mL çekilir. Örneğin homojen olması için, karıştırma kabının en uygun orta noktasından bir magnetik karıştırıcıyla karıştırılarak çekilir. Örnek, etüvde 103-105°C’de en az 1 saat kurutulur, kurutma işleminden sonra etüvden çıkarılan kroze desikatörde soğutulur ve tartılır. Sabit tartıma gelene kadar veya ağırlık değişimi bir öncekinin %4’ünden az olana kadar yada ağırlık değişimi 0,5 mg’dan daha az olana kadar; kurutma, soğutma, desikatörde bekletme ve tartma evreleri tekrarlanır. Kurutulmuş numune tartılacağı zaman, hava alma veya numune bozunması gibi nedenlerden oluşabilecek ağırlık değişimlerine dikkat edilir[51].

Hesaplama

$$\text{mg toplam katılar/L} = (A - B) \times 1000 / \text{örnek hacmi, mL}$$

A = kurutulmuş atık + kroze ağırlığı, mg

B = kroze ağırlığı, mg

4.2.4. Uçucu ve sabit katı madde (UKM, SKM) tayini

Kullanılan aletler

- Porselen kroze
- Hassas terazi; 0,1 mg’a duyarlı
- Fırın; 550°C’de çalışan
- Desikatör

Deneyin yapılışı

Toplam katı tayininden elde edilen atık fırında 550°C’de sabit tartıma gelene kadar yakılır. Örneği koymadan önce fırın belli bir sıcaklığa getirilir. Genellikle 15-20 dk yakma yeterlidir. Ancak birden fazla örnek için veya daha yoğun atıklar için uzun süreli yakma gerekmektedir. Fırından çıkarılan kroze, biraz soğutmak için açık havada bırakılır. Sonra desikatöre yerleştirilen kroze soğutur soğutmaz tartılır. Sabit tartıma gelene kadar veya ağırlık değişimi bir öncekinin %4’ünden az olana kadar yada ağırlık değişimi 0,5 mg’dan daha az olana kadar; yakma, soğutma, desikatörde bekletme ve tartma evreleri tekrarlanır [51].

Hesaplama

$$\text{mg uçucu katılar/L} = (A - B) \times 1000 / \text{örnek hacmi, mL}$$

$$\text{mg sabit katılar/L} = (B - C) \times 1000 / \text{örnek hacmi, mL}$$

A = yakmadan önceki atık + kroze ağırlığı, mg

B = yaktıktan sonraki atık + kroze ağırlığı, mg

C = kroze ağırlığı, mg

4.2.5. Alkalinite tayini

Kullanılan aletler

- 250 mL’lik erlen
- 50 mL’lik beher
- Huni
- Manyetik balık (küçük boy)
- Manyetik karıştırıcı (Heidolph marka MR 3003 model)
- 20 mL’lik pipet

- Üç yollu puvar
- pH metre (Metrohm marka 744 model)
- 50 mL'lik otomatik büret (Bürette Digital III marka Brand model)
- Adi filtre kağıdı

Kullanılan çözeltiler

1. 0,1N H₂SO₄ çözeltisi: 4,9 g H₂SO₄ bir miktar saf suda çözülür ve 1 litreye tamamlanır.

Deneyin yapılışı

Katlanarak süzme işlemine uygun hale getirilmiş olan filtre kağıdı huni ile birlikte 250 mL'lik erlen içine yerleştirilir. Örnek iyice çalkalanarak filtre kağıdından taşmayacak şekilde huniye boşaltılır. Süzme işleminin daha hızlı gerçekleşmesi için gereğinden daha fazla örnek süzülür. Çamurun pH'ı ölçülür ve kaydedilir. Süzüntüden pipet yardımı ile 20 mL çekilerek içine manyetik balık konulmuş 50 mL'lik behere aktarılır. Süzüntünün pH'ı ölçülür ve kaydedilir. Manyetik karıştırıcı üzerinde titrasyona başlanır. pH; 5,0 civarında kararlı hale gelir. Bu tampon içeriğinden kaynaklanmaktadır. pH'ın 5,0'de sabit kaldığı noktaya kadar kullanılan 0,1N H₂SO₄ hacmi kaydedilir [52-53].

Hesaplama

$$\text{mg CaCO}_3/\text{L} = A \times \text{CaCO}_3 (\text{eş.ağ.}) / \text{süzüntü hacmi, L}$$

$$A = \text{pH } 5,0 \text{ olana kadar kullanılan H}_2\text{SO}_4 \text{ hacmi, mL}$$

$$\text{CaCO}_3 (\text{eş.ağ.}) = 1 \text{ mL } 0,1\text{N H}_2\text{SO}_4 = 5 \text{ mg CaCO}_3$$

4.2.6. Uçucu asit (UA) tayini

Kullanılan aletler

- 250 mL'lik erlen
- 50 mL'lik beher
- Huni
- Manyetik balık (küçük boy)
- Manyetik karıştırıcı (Heidolph marka MR 3003 model)
- 20 mL'lik pipet
- Üç yollu puvar
- pH metre (Metrohm marka 744 model)
- 50 mL'lik otomatik büret (Bürette Digital III marka Brand model)
- Adi filtre kağıdı

Kullanılan çözeltiler

1. 0,1N H_2SO_4 çözeltisi: 4,9 g H_2SO_4 bir miktar saf suda çözülür ve 1 litreye tamamlanır.

Deneyin yapılışı

Katlanarak süzme işlemine uygun hale getirilmiş olan filtre kağıdı huni ile birlikte 250 mL'lik erlen içine yerleştirilir. Örnek iyice çalkalanarak filtre kağıdından taşmayacak şekilde huniye boşaltılır. Süzme işleminin daha hızlı gerçekleşmesi için gereğinden daha fazla örnek süzülür. Çamurun pH'ı ölçülür ve kaydedilir. Süzüntüden pipet yardımı ile 20 mL çekilerek içine manyetik balık konulmuş 50 mL'lik behere aktarılır. Süzüntünün pH'ı ölçülür ve kaydedilir. Manyetik karıştırıcı üzerinde titrasyona başlanır. pH'ın 5,0'de sabit kaldığı noktaya kadar kullanılan 0,1N H_2SO_4 hacmi kaydedilir. Daha sonra süzüntüye 0,1N H_2SO_4 eklenmeye devam edilir. pH yaklaşık 4,4 dönüm noktası olduğundan titrasyon dikkatli ve ağır bir şekilde

gerçekleştirilir. pH'ın 4,4'de sabit kaldığı noktaya kadar kullanılan 0,1N H₂SO₄ hacmi kaydedilir [52-53].

Hesaplama

$$\text{mg CH}_3\text{COOH/L} = [((B - A) \times 1,66) \times 0,15] \times 500$$

A = pH 5,0 olana kadar kullanılan H₂SO₄ hacmi, mL

B = pH 4,4 olana kadar kullanılan H₂SO₄ hacmi, mL

4.2.7. Gaz ölçüm yöntemi

Kullanılan cihazlar

- Gaz ölçüm cihazı (Madur marka GA-21 plus model)

Ölçüm yöntemi

Cihaz açılır ve cihazın ısınması için 5 dk, probunun ısınması için 15 dk beklenir. Cihazın menüsünden biyogaz bileşimini gösteren seçenek ayarlanır. Gaz toplama kolonlarının üst kısmındaki vanalar kapatılarak Na₂SO₄-H₂SO₄ çözeltisinin içine daldırılmış olan hortum çıkarılır ve cihazın probu hortumun ucuna tutturulur. Kararlı hale geldikten sonra oluşan gazdaki O₂, CO₂, CH₄, CO ve H₂S yüzdeleri cihaz ekranından okunur. Ölçüm bittikten sonra hortumdan çıkarılan probun içindeki gazın tamamen boşalması için belli bir süre beklenir.

5. BULGULAR

Yukarı akışlı çamur yataklı anaerobik reaktörlerde sistemin kararlı hale gelmesi ve aşı çamurunda kullanılan mikroorganizmaların ortam koşullarına uyum sağlamaları için alıştırma devresine ve granül oluşumuna gerek vardır. Bu amaçla reaktörler 50 gün boyunca alıştırma ve granül oluşturma devresinde çalıştırıldıktan sonra işletmeye alma aşamasına geçilmiştir.

Çamur yatağı, çamur bölgesi, çamur örtüsü, çökelme bölgesi ve gaz-katı-sıvı ayırma bölgesi olmak üzere 4 bölümden oluşan reaktörler sıcaklığı 30°C olan kapalı bir odada tutulmuş ve reaktörlerdeki 35°C sıcaklık ceketteki sıcak su döngüsüyle sağlanmıştır. Reaktörlerin tabanında çökelmiş olan yoğun mikroorganizmaların bulunduğu çamur yatağı, başlangıç aşamasında ASKİ'deki özümleyicilerden alınan aşı çamuru ile oluşturulmuştur. Başlangıçta R1 için 1,8 cm ve R2 için 1,6 cm aşı çamuru kullanılmıştır.

Çalışmada kullanılan ve AOC'deki beyaz peynir üretim tesislerinden sağlanan peyniraltı suyunun KOİ derişimi ortalama olarak 70000 mg/L, TKA derişimi 260,4 mg/L, TKM derişimi ise 58750 mg/L'dir. Arıtılabilirliği araştırılan peyniraltı suyunun KOİ derişimi çok fazla olduğundan düşük akış hızlarında çalışılmıştır. Alıştırma ve granül oluşturma aşamasında; 1/10 seyreltme oranı ile ~7000 mgKOİ/L organik yükteki peyniraltı suyu, reaktörlere 4 günlük hidrolik alıkoyulma süresinde ve 0,56 mL/dk yukarı akış hızıyla beslenmiştir. Daha sonra gaz debisindeki ve çamur yatağı yüksekliğindeki değişime bağlı olarak organik yük artırılmıştır.

Mikroorganizma etkinliklerinden korumak amacıyla kullanılıncaya kadar derin dondurucuda saklanan peyniraltı sularının pH'ı 7,80'e ve sıcaklığı 35°C'ye ayarlanmış, KOİ değerleri ölçülerek sisteme günlük olarak hazırlanıp verilmiştir. Çizelge 5.1'den de görüldüğü gibi, hazırlanan atık su yapay olmadığından besleme pH'larında gün içerisinde düşmeler olduğu gözlenmiştir. Bunu engellemek amacıyla pH'ı NaHCO₃ ile 7,80'e ayarlanan beslemeye pastörizasyon işlemi uygulanmıştır.

Peyniraltı suyunun pH'ını daha kararlı hale getirebilmek amacıyla uygulanan pastörizasyon işlemi, 70-100°C arasında değişen sıcaklıklarda ve 10-90 dk arasında değişen ısıtma sürelerinde denenmiştir. Buna göre ayarlanan besleme pH'ının uzun süre korunabilmesi için en kararlı yapının, 65°C'de 30 dk ısıtılmasının ardından sıcaklığın 35°C'ye düşürülerek sisteme verilmesi ile sağlandığı görülmüştür. Bu şekilde hazırlanan PAS'nun gün içerisinde sık sık pH denetimleri yapılmış ve 7M NaOH kullanılarak pH 7,80'de tutulmaya çalışılmıştır.

Belirli zamanlarda ölçülen besleme ve çıkış suları pH değerlerini gösteren Çizelge 5.1'de; 1 ile ifade edilen değerler sabah saatlerinde, 2 ile ifade edilenler öğle saatlerinde ve 3 ile gösterilenler de akşama doğru alınan değerleri temsil etmektedir.

Çizelge 5.1. Belirli zamanlarda ölçülen günlük pH değerleri

Zaman (gün)	No	Besleme	R1	R2	Zaman (gün)	No	Besleme	R1	R2
01	1	7,50	6,39	6,63	56	1	6,32	6,52	6,72
	2	7,12	5,81	6,13		2	7,00	6,65	6,92
	3	6,57	5,78	6,18		3	7,11	6,72	6,79
07	1	6,91	7,15	7,17	60	1	5,53	5,22	5,29
	2	7,18	7,00	7,06		2	6,17	5,17	5,27
	3	7,02	7,22	7,17		3	6,15	5,11	5,22
15	1	5,85	7,42	7,33	61	1	5,84	5,24	5,29
	2	7,51	7,21	7,10		2	6,84	5,26	5,26
	3	7,40	7,26	7,17		3	6,51	5,21	5,25
18	1	6,38	6,76	6,66	62	1	5,78	5,13	5,12
	2	7,15	7,10	6,67		2	7,04	5,13	5,12
	3	7,20	7,00	6,76		3	6,72	5,12	5,12
19	1	6,34	7,44	7,44	69	1	6,68	6,27	6,34
	2	7,08	7,11	7,13		2	6,93	6,50	6,55
	3	7,53	7,19	7,09		3	7,37	6,58	6,74
25	1	6,86	6,47	5,36	71	1	5,69	6,46	6,55
	2	6,83	6,60	5,40		2	7,04	6,55	6,70
	3	6,65	6,36	5,47		3	7,67	6,78	6,95
51	1	6,25	6,37	6,51	72	1	6,77	6,02	6,39
	2	7,06	6,15	6,08		2	6,94	6,27	6,11
	3	6,73	6,36	6,56		3	7,66	6,12	6,27
53	1	6,48	6,50	6,77	73	1	7,00	6,05	6,25
	2	7,13	6,60	6,86		2	6,92	6,12	6,22
	3	7,30	6,75	6,87		3	6,94	6,11	6,18
54	1	6,69	6,62	6,93	74	1	6,92	6,22	6,30
	2	6,97	6,67	6,82		2	6,91	6,31	6,61
	3	6,84	6,55	6,75		3	6,75	6,28	6,70

Başlangıçta, reaktörlerin kararlı hale gelmesi ve çamur yatağının büyümesi için 1/10 seyreltme oranı ortalama 7000 mgKOİ/L derişimindeki düşük organik yüklemelerle 50 gün boyunca çalışılmıştır. Bu seyreltme oranındaki organik yükleme hızı 4 günlük hidrolik alıkoyulma süresi için 1,75 kgKOİ/m³gün'e karşılık gelmektedir. Literatüre göre anaerobik reaktörlerde alıştırma devresinin 1-2 kgKOİ/m³gün'lük bir organik yükle başlatılması gerektiğinden seyreltik PAS kullanılmıştır. Gaz debisi arttıkça organik yük de kademeli olarak artırılmalıdır. Şartlar uygun olduğu takdirde organik yükleme her hafta %50 artırılabilir [32]. Bu nedenle, yapılan bu çalışmada yatak yüksekliğı ancak belli bir düzeye ulaştıktan sonra seyreltme oranları değıştirilmiştir. Böylece sabit hidrolik bekleme süresinde değışen organik yükleme hızlarının arıtma verimine etkisi incelenmiştir. Çizelge 5.2'de kullanılan peyniraltı suyunun organik yükü sırası ile 1/10, 1/20, 1/5, 1/4, 1/3 ve 1/2 seyreltme oranları ile ~7000 mgKOİ/L, 3500 mgKOİ/L, 14000 mgKOİ/L, 17500 mgKOİ/L, 23000 mgKOİ/L ve 35000 mgKOİ/L olarak artırıldığında, R1 ve R2 çıkış suları için ölçülen KOİ değeri vermiştir. Bu değerielerden yararlanarak hesaplanan % KOİ giderimleri aynı çizelgede gösterilmiştir.

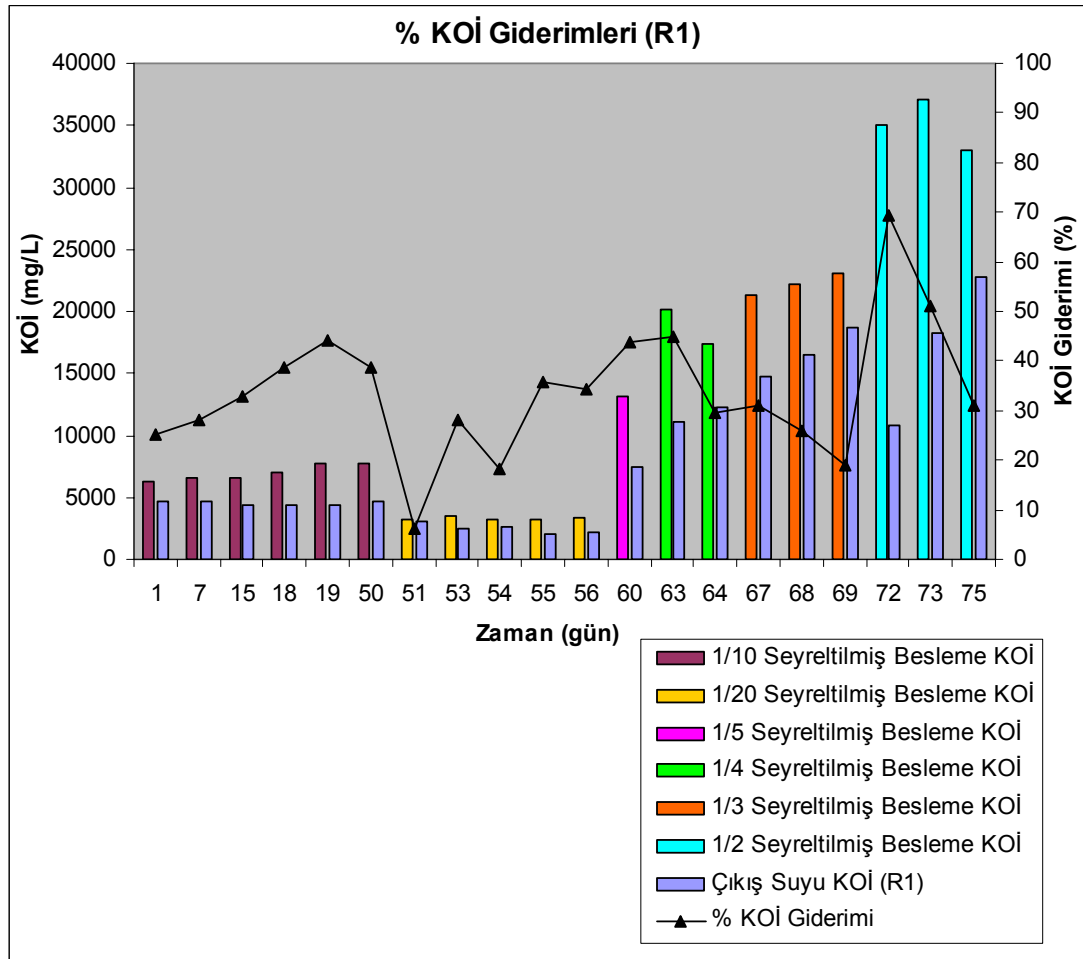
Anaerobik arıtmada biyolojik ayrışmanın gerçekleşebilmesi için gerekli olan KOİ/N/P oranı 300/5/1'dir. Beslemedeki azottan ileri gelen eksiklik seyreltme oranına bağılı olarak değışik miktarlarda NH₄Cl kullanılarak giderilmiştir. Çalışmada, azot 55.günden itibaren 1/20 seyreltme oranı ile hazırlanan besleme sisteme verildiğinde ilave edilmeye başlanmıştır. Ancak azot eklenmesinin KOİ giderimine etkisini gözleyebilmek amacı ile değışen her bir organik yükte, PAS önce azot eklenmeden birkaç gün, sonra azot eklenerek birkaç gün sisteme beslenmiştir. Buna göre 55. ve 56. günlerde 1/20 oranında seyreltilmiş beslemeye, 60. günde 1/5 oranında seyreltilmiş beslemeye, 68. ve 69. günlerde 1/3 oranında seyreltilmiş beslemeye ve 75. günde 1/2 oranında seyreltilmiş beslemeye NH₄Cl katılmıştır. Bu günlerin dışındaki çalışma süresince besleme azot eklenmeden sisteme verilmiştir.

Çizelge 5.2. Farklı organik yüklemelerde elde edilen % KOİ giderimleri

Zaman (gün)	Besleme KOİ (mg/L)	Reaktör 1			Reaktör 2		
		Çıkış Suyu KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (mg/L)	% KOİ Giderimi	Çıkış Suyu KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (mg/L)	% KOİ Giderimi
1	6293,50	4712,53	1580,97	25,12	4955,80	1337,70	21,26
7	6567,20	4712,53	1854,67	28,24	4818,94	1748,26	26,62
15	6627,98	4446,77	2181,21	32,91	4812,64	1815,34	27,39
18	7018,92	4313,73	2705,19	38,54	4236,12	2782,80	39,65
19	7728,50	4313,70	3414,80	44,18	4380,25	3348,25	43,32
50	7.700,00	4.735,03	2.964,97	38,51	4.757,21	2.942,79	38,22
51	3260,48	3060,92	199,56	6,12	3038,74	221,74	6,80
53	3503,92	2517,19	986,73	28,16	2578,17	925,75	26,42
54	3260,01	2661,32	598,69	18,36	2622,51	637,50	19,56
55	3226,75	2073,71	1153,04	35,73	2495,01	731,74	22,68
56	3304,36	2173,49	1130,87	34,22	2506,10	798,26	24,16
60	13173,07	7407,91	5765,16	43,76	7319,22	5853,85	44,44
63	20125,00	11089,22	9035,78	44,90	10479,44	9645,56	47,93
64	17408,72	12275,07	5133,65	29,49	12419,64	4989,08	28,66
67	21289,59	14704,00	6585,59	30,93	16233,99	5055,60	23,75
68	22220,89	16500,08	5720,81	25,75	16899,20	5321,69	23,95
69	23085,66	18695,27	4390,39	19,02	16034,43	7051,23	30,54
72	34928,31	10758,98	24169,33	69,20	12311,14	22617,17	64,75
73	37145,68	18187,17	18958,51	51,04	16967,62	20178,06	54,32
75	33043,55	22843,65	10199,90	30,87	23397,99	9645,56	29,19

Ayrıca granülleşme hızını artırmak ve oluşan granüllerin çökmesini sağlamak amacıyla demir elementi de besleme çözeltisine seyreltme oranı 1/2'ye düşürüldüğünde eklenmiştir. Buna göre organik yükü artırılan beslemeye 73. günden itibaren $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ilave edilmiştir.

Deneysel çalışma boyunca 4 gün olarak sabit tutulan hidrolik alıkoyulma süresinde, kademeli olarak artırılan organik yükler ile % KOİ giderimi arasındaki ilişki R1 için Şekil 5.1'de gösterilmiştir.

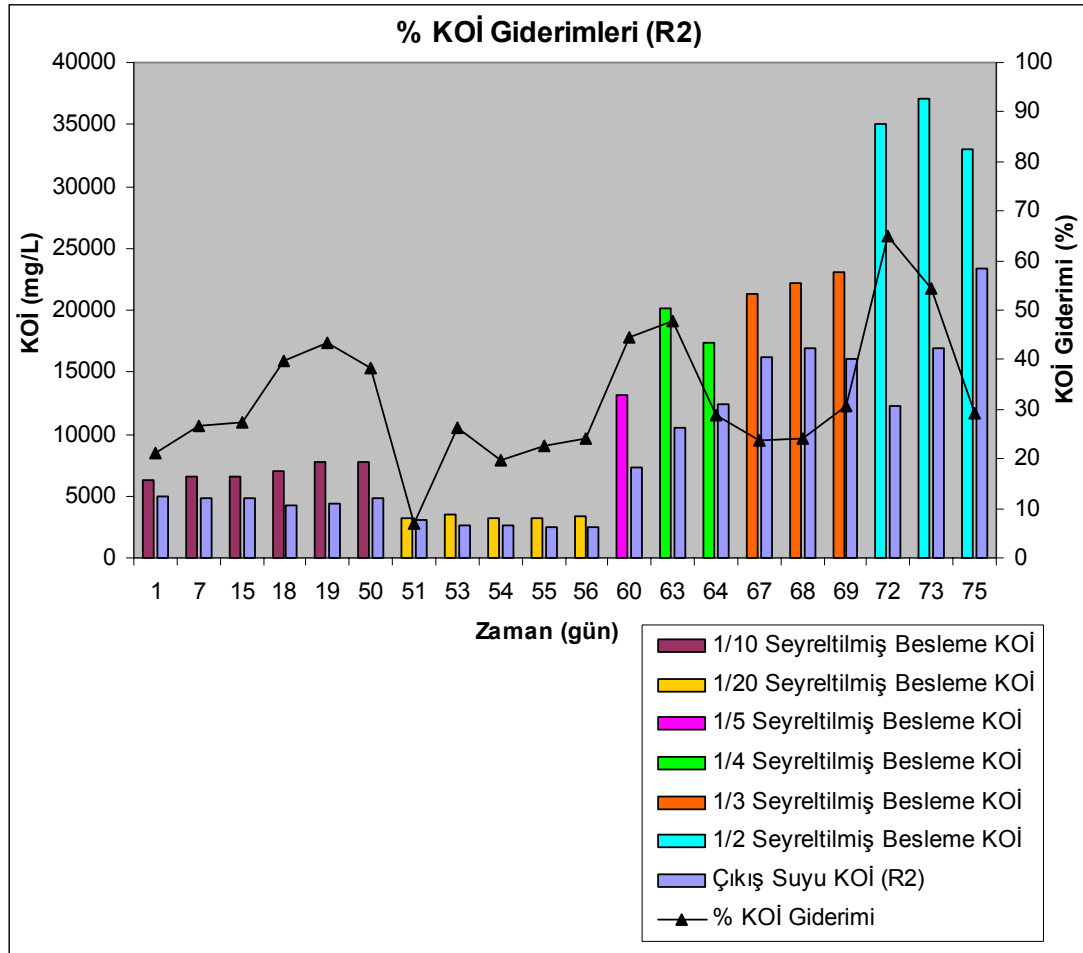


Şekil 5.1. Reaktör 1’de organik yük ile % KOİ giderimi arasındaki ilişki

Beslemenin organik yükü arttıkça KOİ giderimleri de artmıştır. Şekil 5.1’den de görüldüğü gibi R1 için en yüksek KOİ giderimi; 72. günde, 1/2 seyreltme oranı ile 34928,31 mgKOİ/L değerindeki organik yüke sahip PAS kullanıldığında elde edilmiştir. Çıkış suyu KOİ’sinin 10758,98 mgKOİ/L değerine kadar arıtıldığı bu noktada verim %69,20’dir. R1’de 18.günde 0,56 mL/dk akış hızıyla geri döngü çalıştırılmıştır. 31. günde de geri döngü akış hızı 1,87 mL/dk olarak artırılmıştır. Ancak geri döngü çalıştırılmaya başladığında çamur yatağı yükseklikleri henüz çok fazla olmadığından (R1 için 4,4 cm; R2 için 3,9 cm) yataktan çamur kaçıışı başlamıştır. Çünkü granüller fiziksel olarak güçlü hale gelemediklerinden ve yeteri kadar büyümediğinden geri döngü etkisiyle yatak hareketlenmeye başlamıştır. Kaçan granüller nedeniyle gaz-katı-sıvı ayırıcı sistemde tıkanmalar olduğu ve yataktan

mikroorganizma kaçıışı başladığı için R1'in arıtma veriminde düşmeler gözlenmiştir. Geri döngü R1'de biyokütle yüzmesine neden olmuştur. Bu nedenle granüllerin zamanla sertleşmesi ve çökmesini sağlamak ve mikroorganizmaların geri döngü ile daha fazla zarar görmesini engellemek amacıyla geri döngü pompası 37.günde devre dışı bırakılmıştır.

2. reaktör için organik yükün KOİ giderimi üzerine etkisi Şekil 5.2'de gösterilmiştir. Buna göre en yüksek % KOİ giderimi yine 72. günde ve çıkış suyunun organik yükü 12311,14 mgKOİ/L olduğu durumda %64,75'dir.



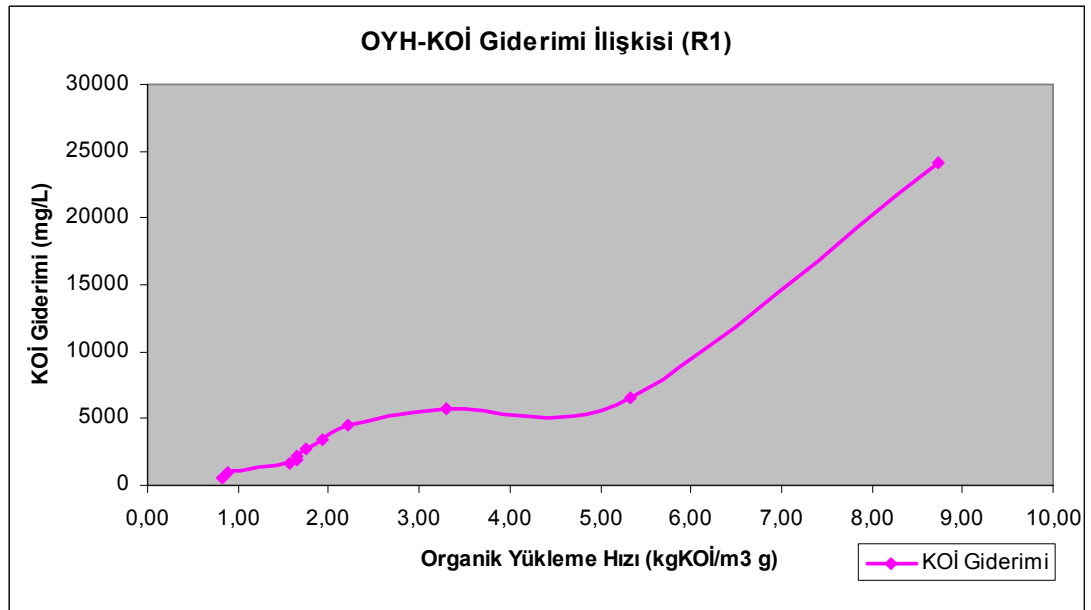
Şekil 5.2. Reaktör 2'de organik yük ile % KOİ giderimi arasındaki ilişki

Çalışma süresince kullanılan en düşük ve en yüksek organik yükleme hızlarının (OYH) her iki reaktör için de KOİ giderimine olan etkisi Çizelge 5.3’de verilmiştir.

Çizelge 5.3. Değişen organik yükleme hızlarındaki KOİ giderimleri

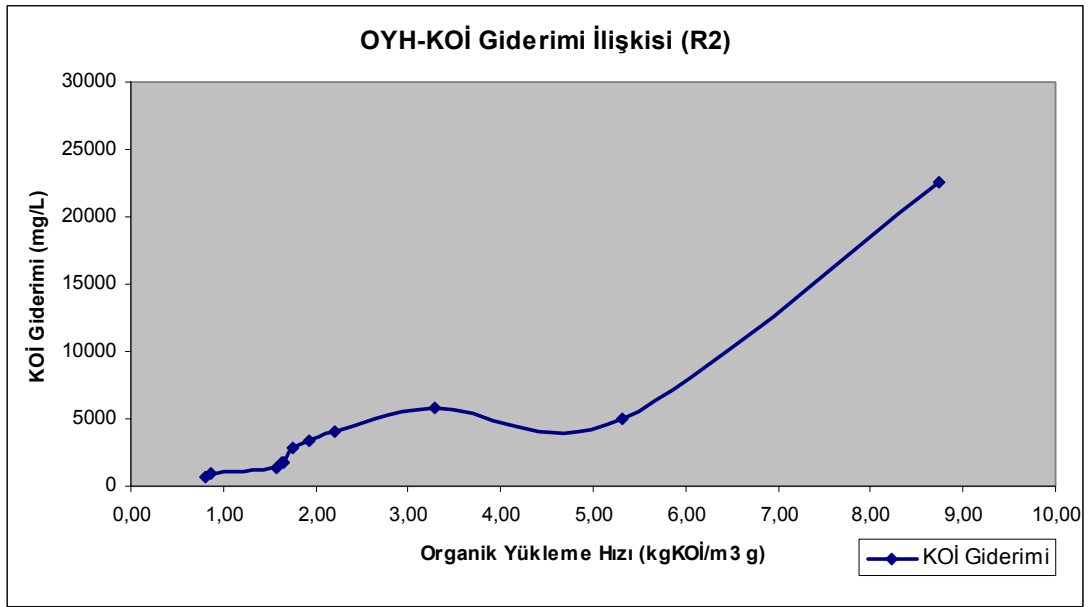
Besleme KOİ (mg/L)	Organik Yükleme Hızı (kg KOİ /m ³ g)	Reaktör 1 KOİ Giderimi (mg/L)	Reaktör 2 KOİ Giderimi (mg/L)
3260,01	0,82	598,69	637,50
3503,92	0,88	986,73	925,75
6293,50	1,57	1580,97	1337,70
6567,20	1,64	1854,67	1748,26
6627,98	1,66	2181,21	1815,34
7018,92	1,75	2705,19	2782,80
7728,50	1,93	3414,80	3348,25
8848,25	2,21	4479,08	4035,61
13173,07	3,29	5765,16	5853,85
21289,59	5,32	6585,59	5055,60
34928,31	8,73	24169,33	22617,17

Sistem 50 gün boyunca alıştırma ve granül oluşturma devresinde çalıştırıldıktan sonra sabit hidrolik alıkoyulma süresinde (4 gün) beslemenin seyreltme oranı değiştirilerek uygulanan organik yükleme hızlarının KOİ giderimine olan etkileri 1. reaktör için Şekil 5.3’de, 2. reaktör için ise Şekil 5.4’de verilmiştir.



Şekil 5.3. Reaktör 1’de organik yükleme hızının KOİ giderimi üzerine etkisi

Organik yükleme hızı başlangıçta düşük tutulmuş ve daha sonra giderek artırılmıştır. Buna göre OYH arttıkça, KOİ gideriminde artmalar olduğu görülmüştür. Organik yükleme hızının 8,73 kg KOİ/m³gün olduğu 72. günde her iki reaktör için de en yüksek KOİ giderimi sağlanmıştır. Buna göre R1 için 24169,33 mgKOİ/L değerinde, R2 için de 22617,17 mgKOİ/L değerinde bir KOİ giderimi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.4. Reaktör 2’de organik yükleme hızının KOİ giderimi üzerine etkisi

Sistemde başlangıç aşamasından sonra gelişen yatak yüksekliği zaman zaman ölçülmüştür. Buna göre yatak yüksekliği ilk başta reaktör hacminin %1,5 kadarı (50 ml) iken Resim 5.1’den de görüldüğü gibi zamanla arttığı gözlenmiştir. Alıştırma ve granül oluşturma aşamasında 1. reaktöre 1,8 cm, 2. reaktöre ise 1,6 cm yüksekliğinde aşı çamuru koyulmuştur. Yatak belli bir yüksekliğe geldikten sonra (50 günde R1 6,5 cm ve R2 8,0 cm yüksekliğe ulaşınca) organik yükler değiştirilerek bunun yatak yüksekliğine ve oluşan gazdaki metan yüzdesine olan etkileri incelenmiştir. Çizelge 5.4’de farklı organik yüklemelerde besleme kullanıldığında zamanla metan yüzdesi ve çamur yatağı yüksekliğinde oluşan değişimin sonuçları verilmiştir.



Resim 5.1. Reaktörlerde gelişen çamur granülleri [50]

Çizelgedeki değerlere bakıldığında yatak yüksekliği arttıkça % metan miktarının da arttığı görülmüştür. Ayrıca giderek artırılan organik yükün de yataktaki granüllerin gelişimi üzerinde olumlu bir etkisi olduğu sonucuna varılmıştır. Çünkü yük artırıldıkça yatakta yüksekliğinde hızlı şekilde artışlar gözlenmiştir.

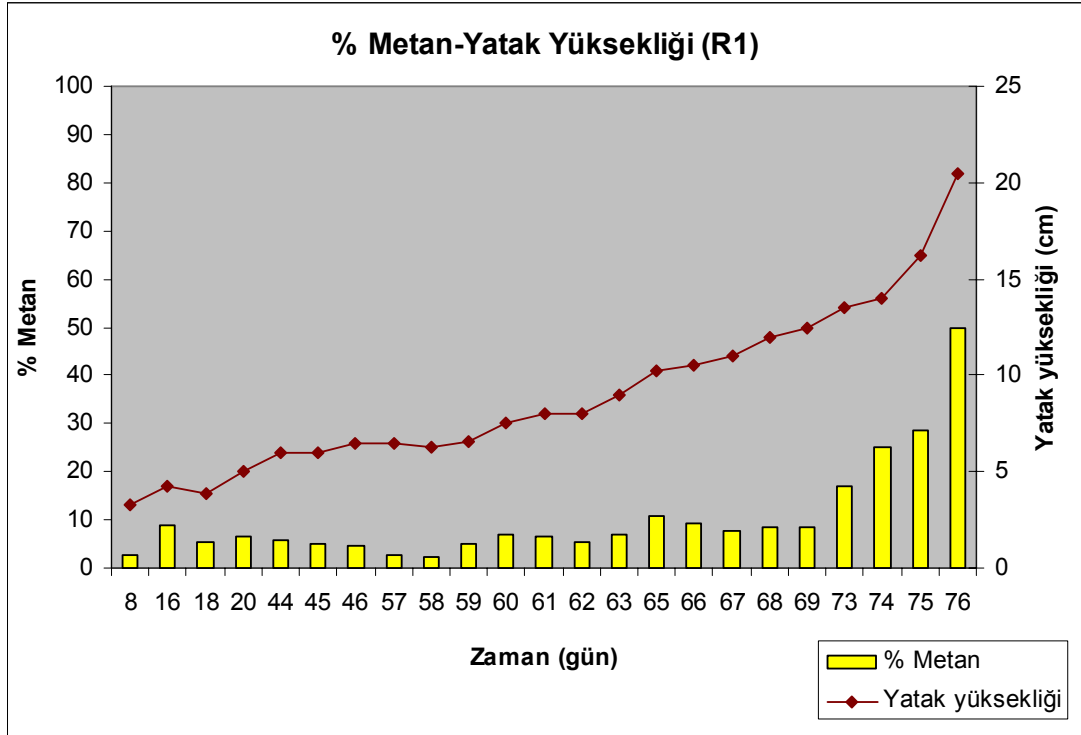
Ancak geri döngünün etkisiyle 18.günde R1'in yatak yüksekliğinde düşme olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni, granüllerin henüz yeterince büyüüp olgunlaşmaması nedeniyle sistemden kaçmasıdır. Deneysel çalışmanın 18. ve 37. günleri arasında geri döngü ile mikroorganizmaların zarar görmesi nedeniyle bir müddet yatak oluşumu olumsuz etkilenmiştir. Ancak çalışmanın ilerleyen günlerinde, geri döngünün oluşan gazdaki metan yüzdesi üzerine olumlu etkileri olduğu gözlenmiştir. Çünkü çıkış suyu sisteme geri döndürülerek aslında metanojenlerin yatağın alt kısımlarına da yerleşmeleri sağlanmıştır. R2'de metanojen ağırlıklı granüller reaktördeki çamur yatağının sadece üst kısımlarında yoğun iken R1'de geri döngü ile bu durum

değiştirilmiştir. R1’de metan, çamur yatağının alt kısımlarındaki metanojenlerin varlığı nedeniyle de R2’den daha fazla oluşmuştur.

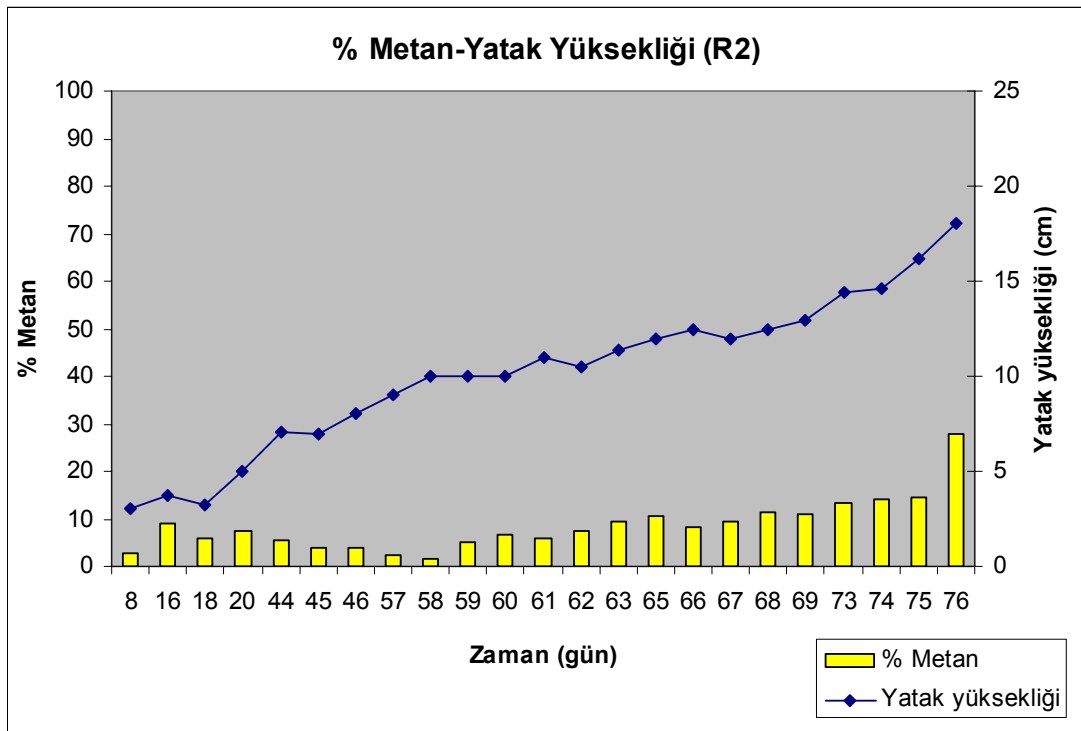
Çizelge 5.4. Zamanla artan çamur yatağı yüksekliğinin metan yüzdesi üzerine etkisi

Zaman (gün)	Besleme KOİ (mg/L)	Reaktör 1 % Metan	Reaktör 1 Yatak Yüksekliği (cm)	Reaktör 2 % Metan	Reaktör 2 Yatak Yüksekliği (cm)
8	7570,51	2,83	3,30	2,83	3,00
16	7163,05	8,91	4,20	9,11	3,70
18	7018,92	5,47	3,90	6,07	3,20
20	6741,75	6,68	5,00	7,49	5,00
44	6896,97	5,87	6,00	5,47	7,10
45	7207,40	5,06	6,00	3,85	7,00
46	6963,49	4,45	6,50	3,85	8,00
57	3204,57	2,83	6,50	2,23	9,00
58	12685,25	2,43	6,30	1,62	10,00
59	13838,28	4,86	6,60	5,26	10,00
60	13173,07	7,09	7,50	6,68	10,00
61	14470,71	6,48	8,00	6,07	11,00
62	15135,92	5,26	8,00	7,29	10,50
63	20125,00	6,88	9,00	9,31	11,40
65	15911,99	10,93	10,20	10,53	12,00
66	22087,85	9,31	10,50	8,10	12,50
67	21289,59	7,69	11,00	9,31	12,00
68	22220,89	8,50	12,00	11,34	12,50
69	23085,66	8,50	12,50	10,93	12,90
73	37145,68	17,00	13,50	13,36	14,40
74	34041,37	25,10	14,00	14,17	14,60
75	33043,55	28,74	16,20	14,57	16,20
76	34928,31	49,79	20,50	27,93	18,00

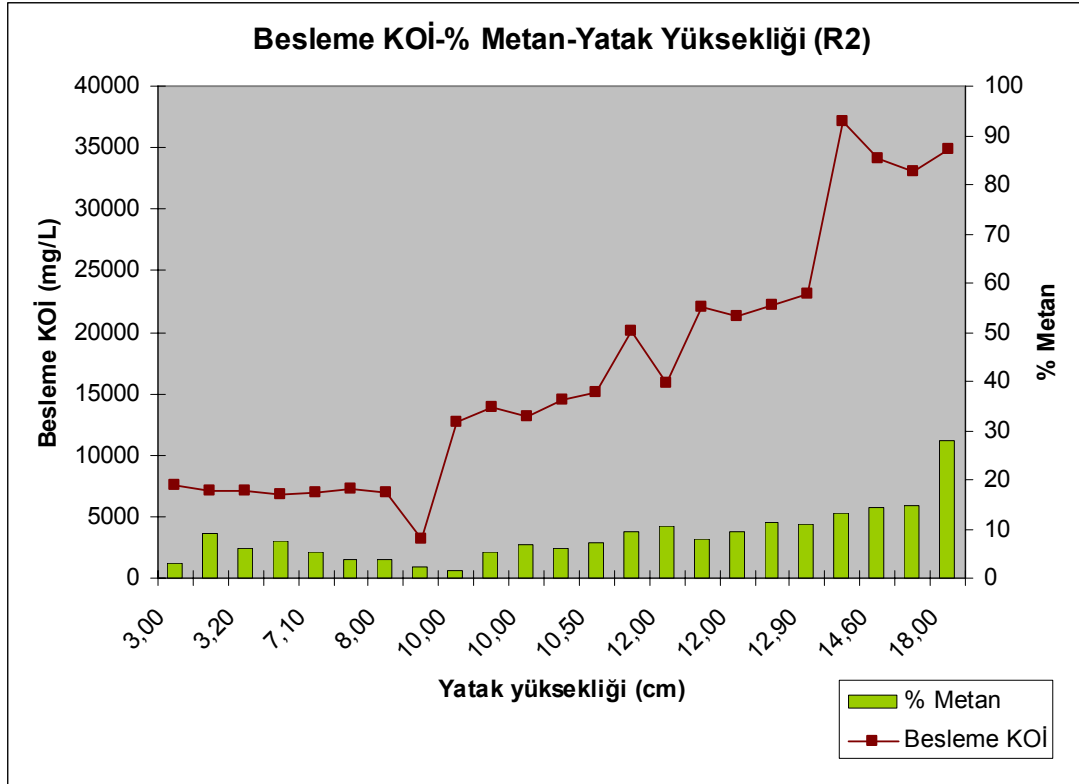
Zamana bağlı olarak gelişen çamur yatağı yükseklikleri ve oluşan gazdaki metan yüzdeleri R1 için Şekil 5.5’de, R2 için Şekil 5.6’da gösterilmiştir. Buna göre her iki reaktörde de zamanla artan çamur yatağı yüksekliğine bağlı olarak oluşan metan yüzdesinde de bir artış olduğu görülmüştür. R1’deki yatak yüksekliği 20,5 cm olduğunda oluşan gazda %49,79 metan, R2’de ise yatak yüksekliği 18,0 cm olduğunda %27,93 metan ölçülmüştür. Çalışma süresince elde edilen en yüksek metan yüzdesi 76. gündeki yatak yüksekliğinde sağlanmıştır. Bu yatak yüksekliklerinde oluşan metan gazının hacimsel akış hızı R1 için 0,68 cm³/dk, R2 için de 0,29 cm³/dk’dır.



Şekil 5.5. Reaktör 1’de zamana bağlı olarak değişen % metan ve yatak yükseklikleri

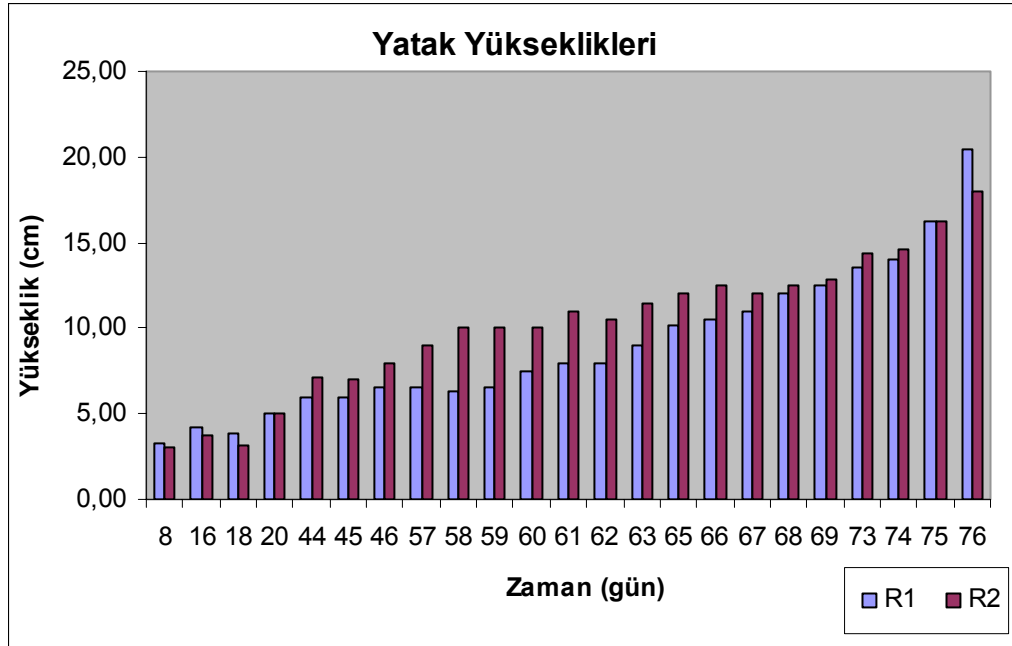


Şekil 5.6. Reaktör 2’de zamana bağlı olarak değişen % metan ve yatak yükseklikleri



Şekil 5.8. Reaktör 2’de uygulanan organik yük ile yatak yüksekliği ve % metan arasındaki ilişki

Şekil 5.9 dikkatle incelenecek olursa 73. günden itibaren yatak yüksekliğinde hızlı bir yükselme söz konusu olmuştur. Bunun nedeni, 1/2 seyreltme oranı ile hazırlanan beslemeye aynı zamanda demir katılmış olmasıdır. Anaerobik mikroorganizmaların hücre gelişimi için ihtiyaç duyduğu iz elementlerinden demir ilavesi ile granül oluşumu hızlandırılmış ve aynı zamanda çökelme özellikleri artırılmıştır. Literatüre göre granül yüzmesi, aktif granüllerin kaybına ve YAÇYA reaktörlerin arıtma veriminde azalmalara neden olarak yüksek organik yüklemelerde meydana gelir. Granüllerin yüzme nedeninin, boşluklarında yakalanan gaz kabarcıklarıyla oluşturulan yüzme kuvvetinden dolayı olduğu bulunmuştur. Granül yüzmesini önlemek için; yüzen granüllerin mekanik aletlerle öğütülmesi ve reaktörlere belirli miktarda Fe eklenmesi önerilmiştir [54].



Şekil 5.9. Zamana bağlı olarak çamur yatağı yüksekliğindeki değişim

Çizelge 5.5. Alıştırma ve granül oluşturma devresinde çıkış suyunda ölçülen alkalinite ve uçucu asit değerleri

Zaman (gün)	Reaktör 1-Çıkış Suyu			Reaktör 2-Çıkış Suyu		
	pH	Alkalinite (mg CaCO ₃ /L)	Uçucu Asit (mg CH ₃ COOH/L)	pH	Alkalinite (mg CaCO ₃ /L)	Uçucu Asit (mg CH ₃ COOH/L)
4	5,80	640,00	2041,50	6,17	821,05	2083,00
5	6,44	1000,00	1867,20	6,72	1109,09	1775,90
6	7,22	1647,50	2373,50	7,17	1890,00	2091,30
7	7,30	2223,33	2348,60	7,29	2267,65	2132,80
16	7,19	1937,50	2539,50	7,17	1843,43	2713,80
17	6,76	1507,50	2448,20	6,66	1057,50	1941,90
18	7,19	2020,51	2464,80	7,09	1847,50	2581,00
19	7,35	2137,14	2182,60	7,24	2032,50	2788,50
20	7,17	2002,56	2356,90	6,94	1943,59	2747,00
21	7,20	2206,67	1419,00	6,43	1500,00	2439,90
23	6,42	1092,00	1327,70	5,35	450,00	3651,70
24	6,36	875,00	1792,50	5,36	491,98	2033,20
25	6,56	1077,50	1850,60	5,93	800,00	2016,60
26	7,05	1532,50	2124,50	6,71	1175,00	2049,80
30	7,71	2350,00	2431,60	7,70	2225,00	2439,90
31	7,48	2055,00	2323,70	7,18	2022,50	2506,30
35	7,14	1682,76	1726,10	6,84	1420,00	2182,60
36	7,10	1262,50	1933,60	7,01	1460,00	2473,10
39	6,55	1255,88	2157,70	6,71	1217,50	2249,00

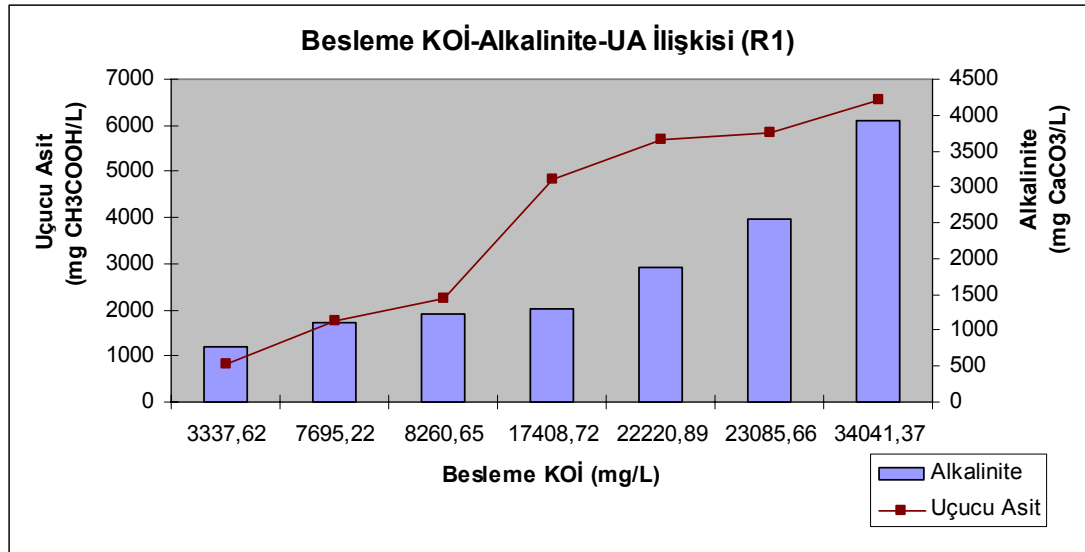
Deneyler süresince çıkış suyunda alkalinite ve uçucu asit analizleri yapılmıştır. Çizelge 5.5'deki veriler sistemin alıştırma ve granül oluşturma aşamasında 1/10 seyreltme oranında PAS kullanıldığında elde edilmiştir. Sistemin çıkış suyunda günlük olarak ölçülen pH değerlerinde düşme meydana geldiğinde alkalinite değerleri de azalmıştır.

Çizelge 5.6'da ise sistemin işletilme süresince organik yükte yapılan değişiklikler sonucu çıkış suyu alkalinite ve uçucu asit analizlerinden elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Çizelge 5.6. Farklı organik yüklerde elde edilen çıkış suyu alkalinite ve uçucu asit değerleri

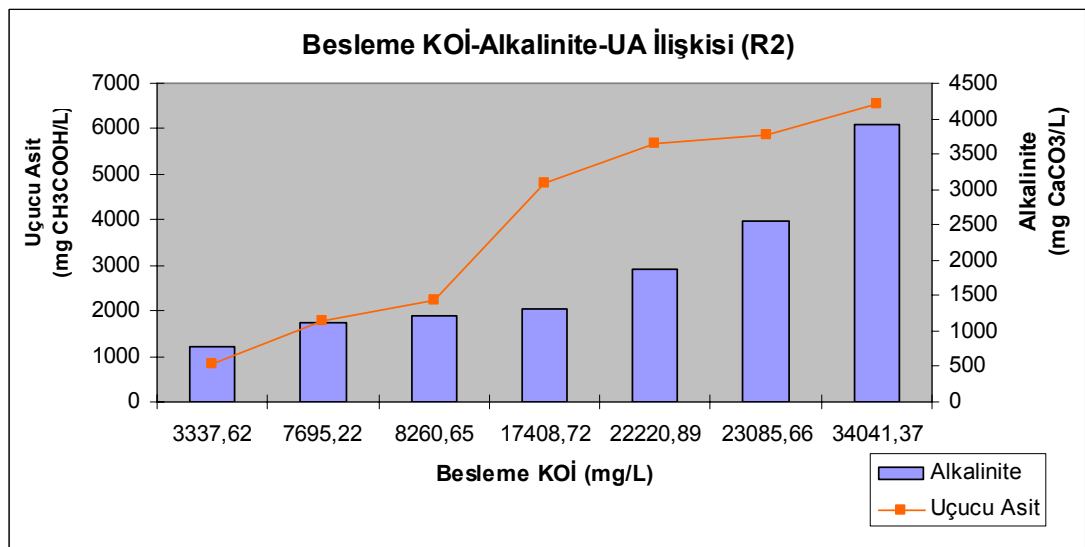
Besleme KOİ (mg/L)	Reaktör 1-Çıkış Suyu		Reaktör 2-Çıkış Suyu	
	Alkalinite (mg CaCO ₃ /L)	Uçucu Asit (mg CH ₃ COOH/L)	Alkalinite (mg CaCO ₃ /L)	Uçucu Asit (mg CH ₃ COOH/L)
3337,62	688,46	804,80	771,43	838,00
7695,22	1092,00	1327,70	1109,09	1775,90
8260,65	1255,88	2157,70	1217,50	2249,00
17408,72	1300,00	4722,40	1307,50	4813,70
22220,89	2003,13	4830,30	1877,50	5685,20
23085,66	2752,94	5344,90	2544,12	5853,20
34041,37	3480,00	8457,40	3928,13	6548,40

Şekil 5.10'dan da görüldüğü gibi 1.reaktörde artan besleme organik yükü ile alkalinite ve uçucu asit değerlerinde de artış olduğu gözlenmiştir.



Şekil 5.10.Reaktör 1’de uygulanan organik yüklerin alkalinite uçucu asit üzerine etkisi

Şekil 5.11’de ise 2.reaktör için beslemedeki organik yüke bağlı olarak çıkış sularının alkalinite ve uçucu asit değerlerinde meydana gelen değişim gösterilmiştir. Bu reaktör için de aynı şekilde organik yükteki artışa bağlı olarak çıkış suyu alkalinite ve uçucu asit değerlerinde artış gözlenmiştir.



Şekil 5.11. Reaktör 2’de uygulanan organik yüklerin alkalinite uçucu asit üzerine etkisi

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmada, yüksek organik madde içeriğine sahip peyniraltı suyunun yukarı akışlı çamur yataklı anaerobik reaktörlerde arıtımı incelenmiş ve biyogaz üretimi için en uygun koşullar belirlenmeye çalışılmıştır. Peyniraltı suları kirlilik derişimi yüksek ancak biyolojik parçalanabilirliği kolay bir atık sudur. Bu tür atık sular için uygulanabilecek tek arıtım tekniği anaerobik arıttır.

Peynir yapımında kullanılan sütün türüne ve yapılan peynirin çeşidine göre kirlilik derişimleri değişmektedir. Çalışmada kullanılan peyniraltı suyu AOC beyaz peynir üretim tesislerinden alınmış olup ortalama olarak 70000 mgKOİ/L değerindeki organik yüke sahiptir. TKA derişimi 260,4 mg/L, TKM derişimi ise 58750 mg/L'dir. Anaerobik sistemlerde biyolojik ayrışmayı gerçekleştirmek için gerekli olan KOİ/N oranının 300/5 olması gerektiğinden 70000 mgKOİ/L konsantrasyonu için 1167mg/L azota ihtiyaç vardır. Oysa çalışmada kullanılan peyniraltı suyunda mevcut olan azot derişimi 260 mg/L'dir. Bu nedenle 907 mg/L derişiminde azot eksikliği vardır. Bu nedenle kullanılan peyniraltı suyunun seyreltme oranına bağılı olarak azot NH₄Cl eklenerek sağlanmıştır. Ancak azotun etkisini gözlemleyebilmek için 55. günden itibaren reaktörlere aynı seyreltme oranındaki besleme önce azot eklenmeden 1-2 gün daha sonra azot eklenerek 1-2 gün verilmiştir. Azot eklenmesinin mikroorganizmaların büyüebilmeleri için olumlu etkileri olduğu görülmüştür.

Anaerobik mikroorganizmaların granül oluşumunu hızlandırmak amacıyla demir gibi iz elementlere de ihtiyacı vardır. Bu çalışmada demir ilavesi, 1/2 seyreltme oranı ile organik yük 35000 mgKOİ/L değerine artırıldığı andan itibaren, atık suda 1mg Fe/L olacak şekilde FeCl₃6H₂O katılarak sağlanmıştır. Demirin etkisi ile yatak yüksekliğinde hızlı bir artış gözlenmiştir. 73.günde demir eklenmiştir ve o gün yatak yüksekliği R1'de 13,50 cm ve R2'de 14,40 cm iken 76. günde sırası ile 20,50cm ve 18,00 cm olarak hızlı bir şekilde artmıştır.

Ayrıca istenilen alkalinite değerini sağlamak için NaHCO_3 ile pH'ı ayarlanan PAS pastörizasyon işleminden geçirilerek sisteme verilmiştir. Atık su yapay olarak hazırlanmadığından besleme kabının içinde oluşabilecek mikroorganizma etkinlikleri tam olarak engellenememiş ancak pastörizasyon ile biraz olsun durdurulabilmiştir. Reaktörün içinde daha kararlı bir tampon kapasitesi oluşturabilmek amacıyla iki kademeli bir ön arıtım sistemi kurulabilir. YAÇYA reaktörler yüksek organik yükleri büyük oranda arıtılmasına rağmen parçalanma mekanizmasının 4 aşamadan oluşması ve bu aşamalardaki reaksiyon hızlarının birbirinden farklı olması, yüksek organik yüklerde bu sistemin en önemli dezavantajıdır. Yüksek organik yüklerde, asidojenik fazla metanojenik faz arasında hız farkı olması asıl problemin sebebidir. Asidojenik fazdaki reaksiyon hızı metanojenik fazdan 5-6 kat daha yüksektir. Asidojenik fazda oluşan asetik asit, propiyonik asit gibi organik asitlerin artması, artan organik asitlerin metanojenik fazda aynı hızda tüketilmemesi, tek fazlı reaktörlerde pH düşmesine ve düşük pH'da metanojen bakteri faaliyetinin durmasına neden olur. Bu problemin ortadan kaldırılması için iki fazlı reaktör kullanılması bir alternatif yoldur.

İki adet aynı boyutlarda paralel bağlı YAÇYA reaktörler kullanılmıştır. Başlangıçta reaktör hacminin %1,5'u aşı çamuru ile doldurulmuştur. Daha sonra atık su seyreltmesi yapılarak farklı organik yüklemelerdeki KOİ giderim verimleri ve oluşan gazdaki metan yüzdeleri incelenmiştir. Ama reaktörler önce belirli bir süre alıştırma ve granül oluşturma devresinde tutulmuştur. Aşı çamurunda bulunan mikroorganizmaların ortam koşullarına uyum sağlamaları amacıyla PAS 1/10 seyreltme oranında 50 gün boyunca beslenmiştir. Bu süre sonunda başlangıçta R1 için 1,8cm ve R2 için 1,6cm yüksekliğinde olan çamur yatağı sırası ile 6,5 ve 8,0 cm olmuştur. Ortalama 7000 mgKOİ/L organik yük ile bu yatak yüksekliklerinde oluşan gazdaki metan yüzdesi R1 için %4,05 ve R2 için %3,24'tür. Ardından organik yük kademeli olarak artırılmıştır. Ancak ondan önce seyreltme oranı belli bir süre 1/20'ye düşürülerek azalan KOİ değerinin etkisini görmek amaçlanmıştır. Bu organik yük ile hem %KOİ giderimi azalmış hem yatağın büyüme hızı düşmüş hem de %metan miktarında azalmalar meydana gelmiştir. Daha sonra sırası ile 1/5, 1/4, 1/3 ve 1/2

seyreltme oranlarındaki organik yüklemenin sistem performansına olan etkileri incelenmiştir. Organik yük artırıldıkça çamur yatağı yüksekliğinde de artışlar olmuştur. Yatak yüksekliğine bağlı olarak metan yüzdesinde de artışlar sağlanmıştır.

Örneğin 1/5 seyreltme oranı ile 13173,07 mgKOİ/L değerindeki organik yük ile R1 için yatak yüksekliği 7,5 cm iken metan yüzdesi 7,09'dur. R2 için de yatak yüksekliği 10,0 cm iken metan yüzdesi 6,68'dir. 1/4 seyreltme oranı ile beslemenin organik yükü 15911,99 mgKOİ/L iken R1 için yatak yüksekliği 10,20 cm, metan yüzdesi 10,93'dür. R2 için de yatak yüksekliği 12,0 cm ve metan yüzdesi 10,53'dür. 1/3 oranında seyreltme yapıldığında 23085,66 mgKOİ/L değerindeki organik yükte R1 için 12,50 cm yüksekliğinde yatak ile %8,50 metan ve R2 için de 12,90 cm yatak yüksekliğinde %10,93 metan elde edilmiştir. Beslemede 1/2 oranında seyreltme yapılarak organik yükü 34928,31 mgKOİ/L'ye artırıldığında R1'de 20,50 cm yatak yüksekliği ile %49,79 metan, R2'de 18,0 cm yatak yüksekliği ile %27,93 metan elde edilmiştir.

Reaktörlerin arıtma verimi ve yatağın büyüme hızı üzerine geri döngünün etkisini incelemek amacıyla sistem başlatıldıktan 18 gün sonra sadece 0,56 mL/dk hızla R1'de çıkış suyu bir süreliğine geri devrettirilmiştir. 31. günde geri döngü hızı 1,87mL/dk olarak artırılmıştır. Ancak geri döngü çalıştırıldığında yatak yüksekliği henüz 4,4 cm olduğundan sağlam, dayanıklı ve belli büyüklüğe ulaşmış bir mikrobiyal topluluk sağlanamadığından reaktörün üst kısmındaki gaz-katı-sıvı ayırıcı kısımdan çamur kaçıışı başlamıştır. Böylece yataktaki granüllerin dağılıp reaktör içinde yüzmesiyle sistemin verimi olumsuz yönde etkilenmiştir bu nedenle geri döngü 37. günde durdurulmuştur. Ancak yataktaki mikroorganizmalar çıkış suyu geri devrinin etkisiyle kaçamayacak yoğunlukta ve büyüklükte olunca, sistem verimi üzerinde olumlu yönde sonuçlar alınmaya başlanacaktır. Bu amaçla granülleşmenin hızlandırılması için Tween-80 gibi bazı maddeler eklenebilir. Bu maddeler ile granüllerin büyümesi ve olgunlaşması sağlanırsa sistemin pH'ı da dengeye gelir ve böylece pH'a karşı daha hassas olan metan bakterilerinin etkinliği ve metan üretimi artar.

Bu sonuçlardan yararlanarak giderek düşürülen seyreltme oranlarına bağlı olarak artan organik yüklemelerde hem % KOİ giderimi artmış, hem yatak hacmi büyümüş hem de oluşan gazdaki metan yüzdesi artmıştır. R1 için en yüksek KOİ giderimi 1/2 seyreltme oranı ile 34928,31 mgKOİ/L değerindeki organik yüke sahip PAS kullanıldığında elde edilmiştir. Çıkış suyu KOİ'sinin 10758,98 mgKOİ/L değerine kadar artıldığı bu noktada verim %69,20'dir. R2 için en yüksek % KOİ giderimi yine 72. günde ve çıkış suyunun organik yükü 12311,14 mgKOİ/L olduğu durumda %64,75'dir. Aynı organik yüke sahip besleme (1/2 oranında seyreltme ve 34928,31 mgKOİ/L) ile her iki reaktör için de en yüksek metan yüzdesi ve en yüksek çamur yatağı yüksekliği elde edilmiştir. R1'deki yatak yüksekliği 20,5 cm olduğunda oluşan gazda %49,79 metan, R2'de ise yatak yüksekliği 18,0 cm olduğunda %27,93 metan ölçülmüştür. Çalışma süresince elde edilen maksimum metan yüzdesi bu yatak yüksekliğinde sağlanmıştır. Bu yatak yüksekliklerinde oluşan metan gazının hacimsel akış hızı R1 için 0,68 cm³/dk, R2 için de 0,29cm³/dk'dır.

KAYNAKLAR

1. Işık, F., “Peyniraltı sularının yukarı akışlı anaerobik çamur örtü reaktörü ile arıtılabilirliği”, Doktora Tezi, **Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Adana, 16 (1999).
2. Yenigün, O., Mutlutürk, G., “Peyniraltı suyu atık giderimi ve peyniraltı suyundan biyogaz eldesi”, **Türkiye’de Çevre Kirlenmesi Öncelikleri Sempozyumu**, İstanbul, 536-549 (1991).
3. Pala, A., Sponza, D., “Bir süt endüstrisi atık sularının karakterizasyonu ve arıtma sisteminin incelenmesi”, **İTÜ 4. Endüstriyel Kirlenme Sempozyumu 94**, İstanbul, 55-65 (1994).
4. Siso, G.M.I., “The biotechnological utilization of cheese whey: a review”, **Bioresearch Technology**, 57: 1-11 (1996).
5. Kalyuzhnyi, S.V., Martinez, E.P., Martinez, J.R., “Anaerobic treatment of high-strength cheese-whey wastewaters in laboratory and pilot UASB-reactors”, **Bioresearch Technology**, 60: 59-65 (1997).
6. Otlı, B., “Peyniraltı suyu ve alkol fabrikası atık sularının arıtımı ve değerlendirilmesi”, Yüksek lisans tezi, **İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Malatya, 5-6 (2002).
7. Aktaş, N., “Akışkan yatak biyofilm reaktörde (AYBR) peyniraltı atık suyunun arıtılması ve sistem performansının modellenmesi”, Doktora Tezi, **Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 12-21 (2003).
8. Mawson, A.J., “Bioconversions for whey utilization and waste abatement”, **Bioresearch Technology**, 47: 195-203 (1994).
9. Farizoğlu, B., “Peyniraltı sularının membran filtrasyonlu püskürtme çevrimli biyoreaktörde arıtımı”, Doktora tezi, **Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Erzurum, 4-9 (2003).
10. Kurt, A., “Süt Teknolojisi”, **Atatürk Üniversitesi Gıda Bilimi ve Teknolojisi Bölümü Yayınları**, Erzurum, 353 (1996).
11. Ergüder, T.H., Tezel, U., Güven, E., Demirer, G.N., “Anaerobic biotransformation and methane generation potential of cheese whey in batch and UASB reactors”, **Waste Management**, 21: 643-650 (2001).

12. Malaspina, F., Cellamare, C.M., Tilche, A., “Anaerobic treatment of cheese whey with a downflow-upflow hybrid reactor”, *Bioresearch Technology*, 55: 131-139 (1996).
13. Yan, J.Q., Lo, K.V. & Liao, P.H., “Anaerobic digestion of cheese whey using upflow anaerobic sludge blanket reactor”, *Biol. Wastes*, 27: 289-305 (1989).
14. Malaspina, F., Stante, L., Cellamare, C.M. & Tilche, A., “Cheese whey and cheese factory wastewater treatment with a combined biological anaerobic-aerobic plant”, In Proc. *III Int. Symp. on Waste Management Problems in Agro-industries*, Mexico, 63-76 (1995).
15. Poompavai, S., “Treatment of different industry wastewaters”, MPhil thesis, *Pondicherry University*, Pondicherry, 103 (2002).
16. Gupta, P.R., “Dairy India 5th ed.”, *National Dairy Development Board*, Anand, 345 (1997).
17. Ramasamy, E.V., Gajalakshmi, S., Sanjeevi, R., Jithesh, M.N., Abbasi, S.A., “Feasibility studies on the treatment of dairy wastewaters with upflow anaerobic sludge blanket reactors”, *Bio. Tech.*, 93: 209-212 (2004).
18. Franklin, R.J., “Full scale experience with anaerobic treatment wastewater”, *Water Sci. Technol.*, 44(8): 1-6 (2001).
19. Leitao, R.C., Haandel, A.C., Zeeman, G., Lettinga, G., “The effects of operational and environmental variations on anaerobic wastewater treatment systems: A review”, *Bio. Tech.*, 5: 1-14 (2005).
20. Tchobanoglous, G. & Burton, F.L., “Wastewater Engineering. 3rd ed.”, *McGraw-Hill Inc.*, New York, 1315 (1991).
21. Cohen, A., Thiele, J.H., Zeikus, J.G., “Pilot scale anaerobic treatment of cheese whey by substrate shuttle process”, *Water Sci. Technol.*, 30(12): 433-442 (1994).
22. Mendez, R., Blazquez, R., Lorenzo, F., Lema, J.M., “Anaerobic treatment of cheese whey: start-up and operation”, *Water Science and Technology*, 21(12): 1857-1860 (1989).
23. Barford, J.P., Cail, R.G., Callander, I.J., Floyd, E.J., “Anaerobic digestion of high-strength cheese whey utilizing semicontinuous digesters and chemical flocculant addition” *Biotechnology and Bioengineering*, 28(11): 1601-1607 (1986).

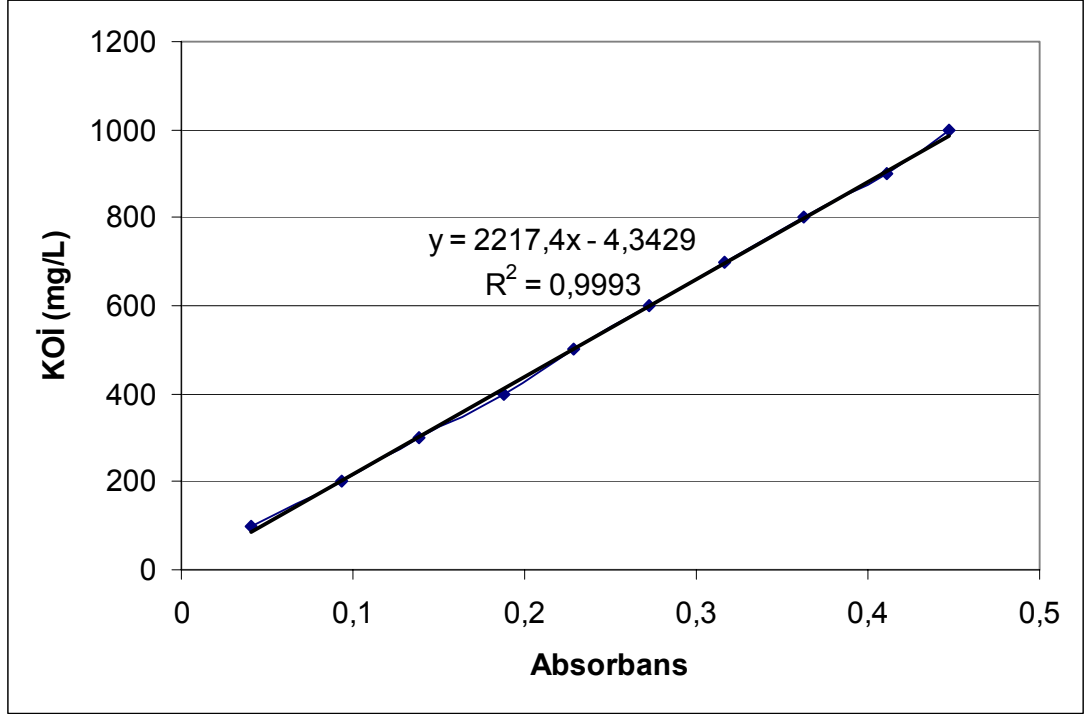
24. Fang, H.H.P., “Treatment of wastewater from a whey processing plant using activated sludge and anaerobic processes”, *Journal of Dairy Science*, 74: 2015-2019 (1991).
25. Lettinga, G., Field, J., Van Lier, J., Zeeman, G. And Hulshoff Pol, L.W., “Advanced anaerobic wastewater treatment in the near future, *Wat.Sci.Tech.*, 35(10): 5-12 (1997).
26. Schmidt, J.E. And Ahring, B.K., “Granular sludge formation in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors”, *Biotechnol.Bioeng.*, 49: 229-246 (1996).
27. Kato, M.T., Field, J.A., Versteeg, P. And Lettinga, G., “Feasibility of expanded granular sludge bed reactors for the anaerobic treatment of low strength soluble wastewaters”, *Biotechnol.Bioeng.*, 44: 469-479 (1994).
28. Zoutberg, G.R. And de Been, P., “The biobed EGSB (expanded granular sludge bed) system covers shortcomings of the upflow anaerobic sludge blanket reactor in chemical industry”, *Wat.Sci.Tech.*, 35(10): 183-188 (1997).
29. Arcand, Y., Guiot, S.R., Desrochers, M. And Chavarie, C., “Impact of the reactor hydrodynamics and organic loading on the size and activity of anaerobic granules”, *Chem.Eng.J.*, 56: 23-35 (1994).
30. Gökçay, C., Demirer, G.N., Ergüder, T.H., Uzal, N.V., Tezel, U., “Anaerobik arıtım teorik altyapı ve uygulamalar eğitim semineri notları”, *TMMOB Çevre Mühendisleri Odası*, Ankara, 1-37, 41-45 (2002).
31. İleri, R., “Çevre Biyoteknolojisi”, *Değişim Yayınları*, Adapazarı, 341-351 (2000).
32. Öztürk, İ., “Anaerobik Biyoteknoloji ve Atık Arıtımındaki Uygulamaları”, *İ.T.Ü İnşaat Fakültesi*, İstanbul, 6-16, 26-48 (1999).
33. İnternet: Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü “Biyogaz Üretiminde Kullanılan Organik Atık/Artık Hammaddeler”
<http://www.eie.gov.tr/biyogaz/artik.html> (2007).
34. Jeris, J.S. And Mc Carty, P., “Biochemistry of methane fermentation using C14 tracers”, *JWPCF*, 37: 178 (1965).
35. Öztürk, E., “Peyniraltı suyunun anaerobik arıtma çamuru reaktöründe arıtımında en uygun koşulların belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 34, 48-49, 76-79 (2007).

36. Hwu , C.S., Van Lier, J.B. & Letting, G., “Physicochemical and biological performance of expanded granular sludge bed reactors treating long-chain fatty acids”, *Process Biochemistry*, 33: 75-81 (1998).
37. Quarmby, J., Forster, C.F., “An examination of the structure of UASB granules”, *Water Res.*, 29(11): 2439-2452 (1995).
38. Batstone, D.J., Keller,J., “Variation of bulk properties of anaerobic granules with wastewater type”, *Water Res.*, 35(7): 1723-1729 (2001).
39. Fang, H.H.P., “Treatment of wastewater from a whey processing plant using activated sludge and anaerobic processes”, *Journal of Dairy Science*, 74: 2015-2019 (1991).
40. Hulshoff Pol, L.W., Castro Lopes, S.I., Lettinga, G., Lens, P.N.L., “Anaerobic sludge granulation”, *Water Research*, 38: 1376-1389 (2004).
41. Hickey, R.F., Wu, W.M., Veiga, M.C. And Jones, R., “Start-up, operation, monitoring and control of high rate anaerobic treatment systems”, *Water Science and Technology*, 24(8): 213-225 (1991).
42. Aslan, S., “Yüksek organik madde içeren atık suların havasız çamur yataklı reaktörlerde arıtılması”, Yüksek lisans tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 7-10, 17-21 (2002).
43. Fang, H.H.P., Chui, H.K., Li, Y.Y. And Chen,T., “Performance and granule characteristic of UASB process treating wastewater with hydrolyzed proteins”, *Water Science and Technology*, 30(8): 55-63(1994).
44. İnternet: Tarım ve Köy İşleri Bakanlığı Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü “Biyogaz Nedir?”
[http://www.khgm.gov.tr/kutuphane/BIYOGAZ/BIGAZ.HTM\(2007\)](http://www.khgm.gov.tr/kutuphane/BIYOGAZ/BIGAZ.HTM(2007)).
45. Gavala, H.N., Kopsinis, H., Skiadas, I.V., Stamatelatou, K., Lyberatos, G., “Treatment of dairy wastewater using an upflow anaerobic sludge blanket reactor”, *J.Agric.Engng Res.*, 73: 59-63 (1998).
46. Pufial, A., Mhdez-Pampin, R.J., Lema, J.M, “Characterization and comparison of biomasses from single- and multi-fed upflow anaerobic filters”,*Bioresource Technology*, 68: 293-300 (1998).
47. Ince, B.K. & Ince, O., “Changes to bacterial community make-up in a two-phase anaerobic digestion system”, *J.Chem.Technol.Biotechnol.*, 75: 500-508 (2000).

48. Nadais, H., Capela, I., Arroja, L., Duarte ,A., “Optimum cycle time for intermittent UASB reactors treating dairy wastewater”, *Water Research*, 39: 1511-1518 (2005).
49. Jeong, H.S., Kim, Y.H., Yeom, H.S., Song, B.K., Lee, S., “ Facilitated UASB granule formation using organic-inorganic hybrid polymers”, *Process Biochemistry*, 40: 89-94 (2005).
50. Yiğit, N., Arşivinden, (2007).
51. APHA, “Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater”, *American Public Health Association*, 20th edition, Washington D.C., 2.54-2.59, 4.125, 5.13 (1998).
52. Leschber, R., Loll, U., “ATV-Handbuch-Klearschlamm 4th ed.”, *Ernst & Sohn*, Berlin, 98 (1996).
53. Stier, E., Baumgart, H., Fischer, M., “Handbuch für ver-und Entsorger 5th ed.”, *F. Hirthammer Verlag*, München, 331 (1994).
54. Yoda, M. And Nishimura, S., “Controlling granular sludge floatation in UASB reactors”, *Water Science and Technology*, 36: 165-173 (1997).

EKLER

EK-1 KOİ kalibrasyon eğrisi



Şekil 1.1. Kalibrasyon Eğrisi

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : YİĞİT, Nurgül
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 11.05.1980 Samsun
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (312) 231 74 00
Faks : 0 (312) 230 84 34
e-mail : nyigit@gazi.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Gazi Üniversitesi/ Kimya Müh.Böl.	2004
Lise	Tülay Başaran Anadolu Lisesi	1998

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2004-	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Müzik, seyahat etmek, kitap okumak