

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**YÜKSEK ORGANİK KİRLİLİKLİ ENDÜSTRİYEL LAKTOZ ÜRETİM
PROSESİ ATIKSUYUNUN ARITIMI VE ENERJİ ÜRETİMİ AMAÇLI
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Sina AZIZI

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EKİM 2024

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**YÜKSEK ORGANİK KİRLİLİKLİ ENDÜSTRİYEL LAKTOZ ÜRETİM
PROSESİ ATIKSUYUNUN ARITIMI VE ENERJİ ÜRETİMİ AMAÇLI
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Sina AZIZI

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EKİM 2024

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK ORGANİK KİRLİLİKLİ ENDÜSTRİYEL LAKTOZ ÜRETİM
PROSESİ ATIKSUYUNUN ARITIMI VE ENERJİ ÜRETİMİ AMAÇLI
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Sina AZIZI
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

EKİM 2024

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Yüksek Organik Kirlilikli Endüstriyel Laktoz Üretim Prosesi Atıksuyunun Arıtımı
ve Enerji Üretimi Amaçlı Değerlendirilmesi**

Sina AZIZI

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS

Bu tez 28/10/2024 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Dr. Öğretim Üyesi Fatih YILMAZ (Danışman)

Prof. Dr. Nuriye Altınay PERENDECİ

Doç. Dr. Emine Gözde ÖZBAYRAM

ÖZET

YÜKSEK ORGANİK KİRLİLİKLİ ENDÜSTRİYEL LAKTOZ ÜRETİM PROSESİ ATIKSUYUNUN ARITIMI VE ENERJİ ÜRETİMİ AMAÇLI DEĞERLENDİRİLMESİ

Sina AZIZI

Yksek Lisans Tezi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Fatih YILMAZ

Ekim 2024; 41 sayfa

Bu çalışmanın temel amacı, peynir üretimi sırasında oluşan ve yüksek organik kirlilik içeren PAS'tan elde edilen delaktoz atıksuyunun, yukarı akışlı çamur yataklı anaerobik reaktör (UASB) sisteminde farklı organik madde yükleme hızlarında arıtılması ve optimum proses koşullarının belirlenmesidir. Bu kapsamda, UASB reaktörünün delaktoz arıtım verimliliği ve metan üretimi, çeşitli organik madde yükleme (OLR) oranlarında incelenmiştir. Çalışma, UASB reaktörünün çalışma koşulları (pH, HRT gibi) ve anaerobik sistemin tepkimeleri (uçucu organik asitleri, toplam alkalinite, gaz üretimi, KOİ giderimi vb.) açısından değerlendirme yapmayı içermektedir.

Tez kapsamında, delaktoz atıksu olarak kullanılarak kapsamlı bir karakterizasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Delaktozun asidik bir pH değeri (5,12) gösterdiği, %22,5 katı madde ve %14,28 laktoz içerdiği tespit edilmiştir. Toplam ve çözünmüş Kimyasal Oksijen İhtiyacı değerleri sırasıyla $235 \pm 3,4$ g/L ve $213 \pm 1,1$ g/L olarak belirlenmiştir. Delaktozun yüksek kirlilik yükü, onu anaerobik arıtma süreçleri için etkili bir substrat olarak konumlandırmaktadır. Çalışmada 1, 2, 3 ve 4 kgKOİ/m³ olmak üzere 4 farklı artan organik yükleme hızında UASB sistemi işletilmiştir. 143 gün süreyle işletilen UASB'de elde edilen KOİ giderim verimleri artan organik yükleme hızları için sırasıyla %97,4, %97,4, %98,0 ve %99,3 olarak belirlenmiştir. Ayrıca, metan üretim verimleri sırasıyla 181,2, 147, 196,5 ve 189 mL CH₄/gKOİ_{giderilen} olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, sistemin yüksek organik içerikli delaktoz atıksuyunun etkili bir şekilde arıtılabildiğini ve önemli metan üretim potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

ANAHTAR KELİMELEER: Anaerobik parçalanma, Biyogaz, Biyoreaktör, Delaktoz, Peynir altı suyu, Süt endüstrisi

JÜRİ: Dr. Öğretim Üyesi Fatih YILMAZ

Prof. Dr. Nuriye Altınay PERENDECİ

Doç. Dr. Emine Gözde ÖZBAYRAM

ABSTRACT

TREATMENT OF INDUSTRIAL LACTOSE PRODUCTION PROCESS WASTEWATER WITH HIGH ORGANIC POLLUTION AND EVALUATION FOR ENERGY PRODUCTION PURPOSES

Sina AZIZI

MSc Thesis in Environmental Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Fatih YILMAZ

October 2024; 41 pages

The primary aim of this study is to investigate the treatment of delactose wastewater, which is produced from whey protein concentrate (WPC) during cheese production and contains high organic pollution, in a Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) process under different organic loading rates, and to determine the optimum process conditions. In this context, the efficiency of delactose treatment and methane production in the UASB system has been examined at various organic loading rates (OLR). The study assesses the operating conditions of the UASB reactor (pH, HRT, etc.) and the responses of the anaerobic system (volatile fatty acids, total alkalinity, gas production, COD removal, etc.).

In this thesis work, delactose was utilized as an wastewater source, and a comprehensive characterization analysis was conducted. It was determined that delactose has an acidic pH value (5,12) and contains 22,5% total solids and 14.28% lactose. The total and dissolved Chemical Oxygen Demand values were found to be $235 \pm 3,4$ g/L and $213 \pm 1,1$ g/L, respectively. The high organic content level of delactose, which has a high pollution load, demonstrates its suitability as a substrate for anaerobic treatment processes. In this study, four different organic loading rates were examined in the UASB system. System operation was started with 1 kg COD/m³ organic loading rate and increased to 2,3 and 4 kg COD/ m³ in time. Over a period of 143 days of operation, the COD removal efficiencies obtained in the UASB were recorded as 97,4%, 97,4%, 98,0%, and 99.3%, respectively. The methane production efficiencies were obtained as 181,2, 147,0, 196,5, and 189 mL CH₄/gCOD_{removed}, respectively. These results indicate that the system can effectively treat high organic content delactose wastewater and has significant methane production potential.

KEYWORDS: Anaerobic digestion, Biogas, Bioreactor, Dairy industry, Delactose, Whey

COMMITTEE: Asst. Prof. Dr. Fatih YILMAZ

Prof. Dr. Nuriye Altınay PERENDECI

Assoc. Prof. Dr. Emine Gözde ÖZBAYRAMLI

ÖNSÖZ

Bu çalışma, Yüksek Organik Kirlilikli Endüstriyel Laktoz Üretim Prosesi Atıksuyunun Arıtımı ve Enerji Üretimi Amaçlı Değerlendirilmesi konusunda yapılan araştırmanın bir ürünüdür. Bu tez çalışması, Akdeniz üniversitesinde çevre mühendiliği bölümünde yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Sayın danışmanım Dr. Fatih YILMAZ değerli yönlendirmeleri, bilgi birikimi ve destekleri olmadan bu çalışmanın tamamlanması mümkün olmazdı. Kendisine bu süreçteki sabrı ve yardımları için içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, çalışmam sırasında beni destekleyen Prof. Dr. N. Altınay PERENDECİ'ye teşekkür etmek isterim. Katkıları ve desteği olmadan bu çalışmanın başarıya ulaşması mümkün olmazdı.

Son olarak, aileme ve sevdiklerime, her zaman beni destekleyip cesaretlendirdikleri için teşekkür ederim. Onların sevgisi ve inancı olmasaydı bu çalışmanın tamamlanması bu kadar anlamlı olmazdı.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
AKADEMİK BEYAN	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	3
2.1. Anaerobik Parçalanma	3
2.1.1. Anaerobik Parçalanmanın Aşamaları	3
2.1.1.1. Hidroliz	4
2.1.1.2. Asidojenesis	5
2.1.1.3. Asetojenesis	6
2.1.1.4. Metanojenesis	6
2.1.2. Anaerobik parçalanma prosesinin değerlendirilmesinde kullanılan parametreler	7
2.1.2.1. Biyokimyasal oksijen ihtiyacı.....	7
2.1.2.2. Kimyasal oksijen ihtiyacı.....	7
2.1.2.3. pH ve alkalinite	8
2.1.2.4. Karbon/Azot oranı	8
2.1.2.5. Teorik metan verimi.....	9
2.1.2.6. Uçucu katılar	9
2.1.3. Anaerobik parçalama prosesinin tasarımında dikkat edilecek hususlar ...	10
2.1.3.1. Hidrolik bekletme süresi	10
2.1.3.2. Organik yükleme hızı.....	10
2.1.3.3. Toplam katılar	10

2.1.3.4. Sıcaklık	11
2.1.4. Anaerobik Parçalanma Prosesinin Avantaj ve Dezavantajları	11
2.2. Süt Endüstrisi Atıkları	12
2.2.1. Süt endüstrisi atıklarının anaerobik parçalanmasının biyokimyası	14
2.2.1.1. Yağların anaerobik parçalanması.....	14
2.2.1.2. Laktozun anaerobik parçalanması	14
2.2.1.3. Proteinlerin anaerobik parçalanması.....	15
2.2.2. Delaktoz.....	16
2.2.3. Literatürde PAS'ın anaerobik arıtımına ilişkin çalışmalar	17
2.3. Tez Çalışmasının Amacı ve Özgünlüğü	19
3. MATERYAL VE METOT	21
3.1. Delaktozun Temini	21
3.2. Delaktoz Karakterizasyonu	22
3.2.1. Toplam katı madde (TKM) ve uçucu katı madde (UKM) analizleri.....	23
3.2.2. Toplam Kjeldahl azotu (TKN) analizi.....	24
3.2.3. Toplam kimyasal oksijen ihtiyacı (tKOİ) analizi	24
3.2.4. Çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı (çKOİ) analizi	24
3.2.5. Toplam fosfat (TP) analizi.....	24
3.2.6. Alkalinite (ALK) analizi.....	25
3.2.7. pH analizi.....	25
3.2.8. Ekstrakte olabilen madde ve yağ analizi	25
3.2.9. Protein analizi	25
3.3. Anaerobik Aşı Çamurunun Temini	25
3.4. Yukarı Akışlı Anaerobik Çamur Yatağı (UASB) Reaktör Sistemi ve İşletme Koşulları	25
3.4.1. UASB sisteminin izlenmesinde ve değerlendirilmesinde kullanılan parametreler	27

3.4.1.1. Toplam katı madde (TKM) ve uçucu katı madde (UKM) analizi	27
3.4.1.2. Toplam Kimyasal Oksijen İhtiyacı (tKOİ)	28
3.4.1.3. UOA ve alkalinite analizleri	28
3.4.1.4. Biyogaz miktarı ve kompozisyonu	29
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	31
4.1. pH	31
4.2. Alkalinite ve UOA	32
4.3. TKM ve UKM	32
4.4. KOİ	33
4.5. Metan üretimi	34
5. SONUÇLAR	37
6. KAYNAKLAR	39
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Yüksek Organik Kirlilikli Endüstriyel Laktoz Üretim Prosesi Atıksuyunun Arıtımı ve Enerji Üretimi Amaçlı Değerlendirilmesi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

28/10/2024

Sina AZIZI

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

% : Yüzde

°C : Santigrat derece

cm : Santimetre

dk : Dakika

g : Gram

kg : Kilogram

L : Litre

m : Metre

m³ : Metreküp

ml : Mililitre

mm : Milimetre

rpm : Dakikada devir sayısı

sn : saniye

Tez yazımında ondalık ayracı olarak nokta (,) kullanılmıştır.

Kısaltmalar

çKOİ	: Çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı
GC	: Gaz kromatografisi
HEMI	: Hemiselüloz
KOİ	: Kimyasal oksijen ihtiyacı
TKM	: Toplam katı madde
TKN	: Toplan kjeldahl azotu
TKOİ	: Toplam kimyasal oksijen ihtiyacı
TUKM	: Toplam uçucu katı madde
TP	: Toplam fosfor
UASB	: Yukarı akışlı anaerobik reaktör
UKM	: Uçucu katı madde
UOA	: Uçucu organik asit

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Anaerobik parçalanma prosesinin aşamaları (Yılmaz, 2020).....	4
Şekil 2.2. Laktozun metana anaerobik dönüşümündeki muhtemel yollar (Hassan ve Nelson 2012)	15
Şekil 2.3. Süt proteinlerinin anaerobik parçalanması (Hassan ve Nelson 2012)	16
Şekil 2.4. Delaktoz üretimi akış şeması (Çakmak, 2021)	17
Şekil 3.1. PAS'tan protein tozu ve laktoz üretimi sırasında oluşan atık akımının (delaktoz) proses akış diyagramı.....	21
Şekil 3.2. UASB reaktör sistemi ve bileşenleri.....	26
Şekil 3.3. UASB sisteminin boş görünümü	27
Şekil 3.4. Lange LT200 ısıtıcı blok ile KOİ analizi.....	28
Şekil 3.5. UOA analizinde kullanılan distilasyon düzeneği	29
Şekil 3.6. Biyogaz miktarının ölçümünde kullanılan gaz debimetre	29
Şekil 3.7. Gaz kromatografi cihazı	30
Şekil 3.8. Gaz kromatografi analizi sonucu elde edilen kromatogram örneği.....	30
Şekil 4.1. UASB sisteminde ölçülen pH değerlerinin zamanla değişimi	31
Şekil 4.2. UASB sisteminde ölçülen alkalinite ve UOA değerlerinin zamanla değişimi	32
Şekil 4.3. UASB sisteminde ölçülen KOİ değerlerinin zamanla değişimi	34
Şekil 4.4. UASB sisteminde elde edilen KOİ giderim veriminin zamanla değişimi	34
Şekil 4.5. UASB sisteminde elde edilen metan veriminin zamanla değişimi.....	35
Şekil 4.6. UASB sisteminde elde edilen biyogazın metan içeriğinin zamanla değişimi	36

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Delaktoz karakterizasyonu.....23

Çizelge 4.1. UASB sisteminde ölçülen TKM ve UKM değerlerinin zamanla değişimi 33



1. GİRİŞ

Hızlı sanayileşmenin bir sonucu olarak, uygun şekilde arıtıldığı takdirde katma değerli bir enerji kaynağına dönüşebilme potansiyeli olan yüksek organik içeriğe sahip büyük miktarlarda atık ve atıksular ortaya çıkmaktadır. Çevresel açıdan probleme neden olabilecek bu atık ve atıksuların olumsuz etkilerini en aza indirmek için kullanılabilir bertaraf yöntemlerinden biri de anaerobik parçalanma prosesi ile bu atıklardan enerji elde edilmesidir. Spesifik olarak, süt endüstrisi faaliyetleri sonucu, anaerobik parçalanma yoluyla metana dönüştürülebilecek, yüksek miktarlarda organik içerikli atıksular oluşmaktadır.

Süt endüstrisi, süt ve süt ürünleri talebindeki sürekli artış nedeniyle, dünyanın birçok ülkesinde istikrarlı bir şekilde büyümektedir. Avrupa Birliği (AB), yılda 143 MT ile dünya üretiminin %23'üne karşılık gelen bir süt üretim hacmine sahiptir. Hindistan (88 MT), Amerika Birleşik Devletleri (77 MT) ve Çin diğer önemli üreticilerdir. Süt endüstrisi atıksuyundaki organik madde miktarı önemli ölçüde üretilecek mamül maddeye göre değişmektedir (Shete ve Shinkar 2013). Süt ürünleri endüstrisinden kaynaklanan atıksuyun kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), biyolojik oksijen ihtiyacı (BOİ) ve uçucu katı madde konsantrasyonları da yüksektir (Demirel vd. 2005). Bu yüksek KOİ temel olarak süt ürünlerinden kaynaklanan atıksudaki ana bileşen olan laktozdan kaynaklanmaktadır.

Peynir üretimi sırasında, 3 farklı sıvı atık oluşabilmektedir. Bunlar; peynir altı suyu (PAS), ikincil peynir altı suyu (İPAS) ve peynir altı atıksuyudur (PAAS). PAS yüksek organik kirliliğe sahip başlıca süt endüstrisi atıksularından biridir. PAS, süt kazeininin çöktürülmesi ve uzaklaştırılması sonucunda kalan sarımsı bir sıvıdır. Tipik PAS kompozisyonu ağırlıkça %4,5-6 laktoz, %0,6-1,1 protein, %0,8-1 mineral, %0,05-0,9 laktik asit, %0,06-0,5 yağ ve %93-94 su içermektedir. Literatürde PAS'ın KOİ ve BOİ değerleri sırasıyla 50-100 ve 27-60 g/L olarak bildirilmiştir (Ebrahimi vd. 2010; Ferchichi vd. 2005; González Siso 1996; Janczukowicz vd. 2008). PAS, farklı bileşikler (protein, yağ, laktoz, mineral elementler) açısından değerli bir kaynaktır. Bu kapsamda son yıllarda PAS'ın arıtımından ziyade içerisinde bulunan değerli kimyasalların ayrılması ve yeni ürünlerin üretilmesine odaklanılmıştır. PAS, laktik asit, tek hücre proteini, ekmek mayası, başlangıç kültürü, fermente peynir altı suyu içecekleri, enzimler, antibiyotikler, organik asitler, vitaminler, katkı maddeleri gibi çeşitli ürünlerin üretiminde kullanılmaktadır.

PAS içerisindeki yüksek laktoz ve protein nedeniyle katma değere sahip bir atık olduğundan endüstriyel olarak PAS'tan laktoz üretimi gerçekleştirilmektedir. Bununla birlikte, PAS veya PAS ürünlerinin geri kazanımının yeni atık akımlarının oluşumuna neden olduğu dikkate alınması gereken bir konudur. PAS'tan laktoz ve protein üretim prosesi sonucunda delaktoz adı verilen atık akımı oluşmaktadır. Delaktoz yüksek miktarda laktoz, tuz ve düşük miktarda protein ve yağ içeren organik bir sıvıdır. Delaktoz PAS'tan daha az miktarda oluşmasına rağmen, kirlilik yükü PAS'tan oldukça yüksektir. Delaktoz, çok yüksek organik kirlilik içerdiğinden arıtılmadan alıcı ortama deşarj edilmesi alıcı su ortamlarında önemli derecede kirlilik yaratma potansiyeline sahiptir ve arıtılmadan deşarj edilmesi mümkün değildir. Bu nedenle günümüze kadar delaktoz hayvan yemlerine katkı materyali olarak kullanılmış ve aerobik proseslerle arıtmaya çalışılmıştır. Ancak, bu atıksuyun aerobik proseslerle arıtımı oldukça güç ve ekonomik

olarak fizibil değildir. Bunun sonucu olarak son birkaç yıldır anaerobik artıma prosesleri ile arıtılması ve enerji üretilmesi konusunda çalışmalar yapılmaktadır.

Bu çalışmanın amacı peynir üretiminde oluşan PAS'tan laktoz üretimi sonucunda kalan, yüksek organik kirlilik içeren ve delaktoz olarak isimlendirilen atıksuyun yukarı akışlı çamur yataklı anaerobik reaktör (UASB) prosesinde farklı organik madde yükleme hızlarında arıtılması ve optimum proses koşullarının belirlenmesi ile prosesin arıtma ve metan üretim performansının incelenmesidir.

Bu kapsamda;

- Yukarı akışlı anaerobik çamur yatağı (UASB) sistemi ile farklı organik madde yükleme (OLR) oranlarında delaktoz arıtım verimi ve metan üretimi incelenmiştir,

- UASB reaktör çalışma koşulları (pH, HRT vb.) ve anaerobik sistem cevapları (Uçucu organik asit, toplam alkalinite, gaz üretimi, KOİ giderimi vb.) açısından değerlendirilmiştir.

2. KAYNAK TARAMASI

2.1. Anaerobik Parçalanma

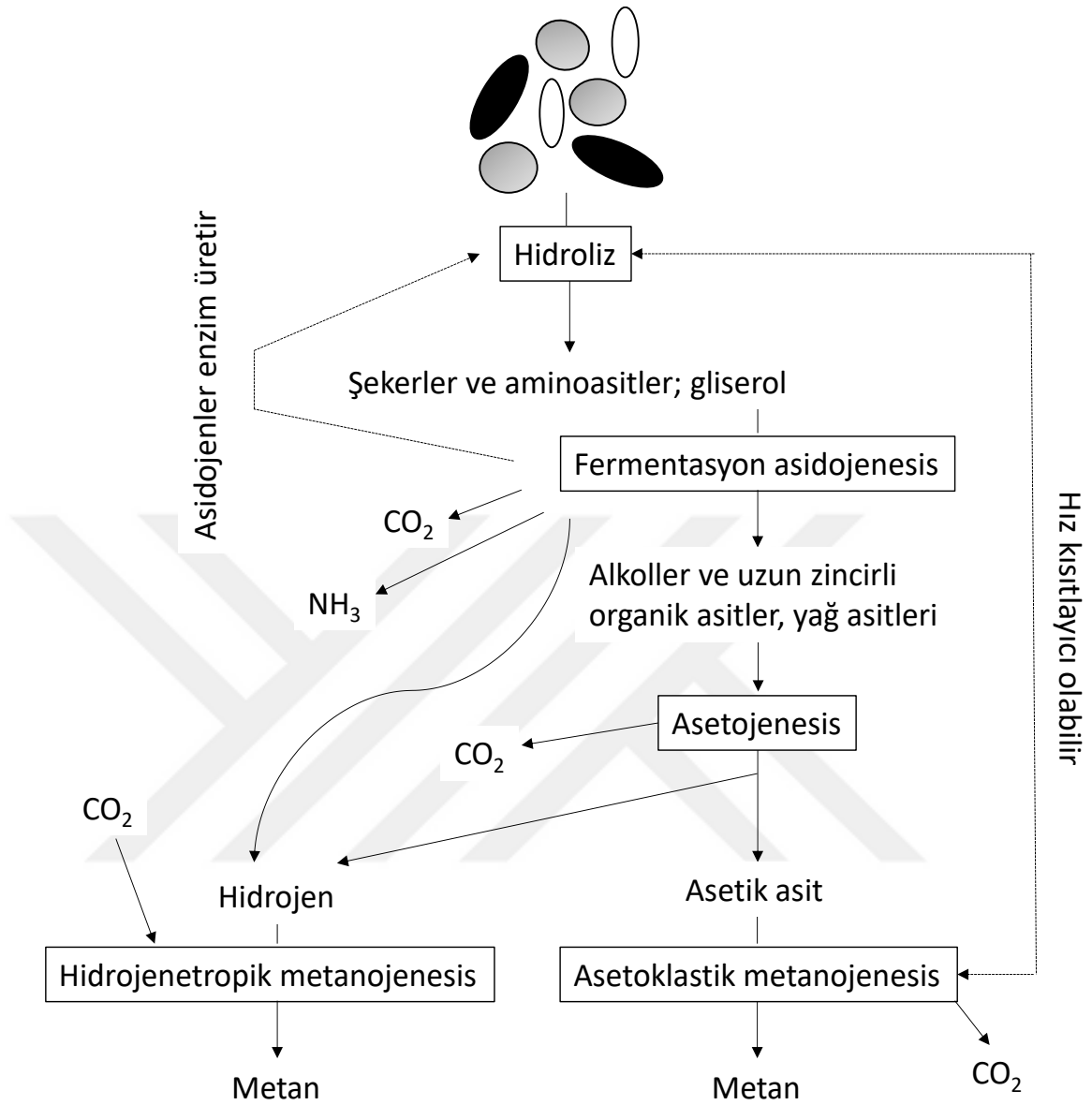
Biyogazın, anaerobik parçalanma süreciyle elde edilen bir ürün olarak insanlık tarafından yüzyıllardır bilindiği belirtilmiştir. Tarihî kanıtlar, biyogazın M.Ö. 10. yüzyılda Asur ve Pers medeniyetlerinde banyo suyu ısıtma amacıyla kullanıldığını ve 16. yüzyılda bu konuda bilgilerin mevcut olduğunu göstermektedir. Biyogaz üretiminin organik madde çürümesi sonucu ortaya çıktığını ilk keşfeden kişi ise 17. yüzyılda Jan Baptista Van Helmont'tur. 1808 yılında Sir Humphry Davy ise üretilen gazın içinde metan bulunduğunu ilk kez tespit etmiştir. Anaerobik parçalanma tesislerinin Güney Asya'da 18. yüzyılda inşa edilmesi ve teknolojinin olgunlaşmasıyla birlikte Avrupa'ya aktarıldığı belirtilmiştir. Ancak biyogazın organik madde çürümesiyle nasıl oluştuğu 1930'lara kadar bilinmemiştir.

Birçok alternatif enerji teknolojisi gibi, II. Dünya Savaşı anaerobik parçalanma teknolojisini geliştirmiş ve o zamandan beri birçok ülke, özellikle de Avrupa ülkeleri, anaerobik parçalanma tesisleri kurmuştur. Yıllar boyunca anaerobik parçalanma, alternatif bir enerji kaynağı olarak hizmet vermiştir. Ancak tarımsal ve kentsel atık yönetimindeki uygulamalar sadece enerji üretimiyle sınırlı kalmamış, aynı zamanda koku kontrolü, atık hacminin azaltılması ve atık işleme kapasitesinin artırılması gibi çeşitli faydalar sağlamıştır. Belediye atıksu arıtma tesisleri, anaerobik parçalanma kullanarak organik katı atıkları biyogaza dönüştürerek insan sağlığı, çevre ve ekonomi üzerinde olumlu etkiler yapmaktadır. Endüstriyel atıkların daha verimli yönetilmesi için birçok endüstri, anaerobik çürütücüleri kullanmaktadır. Mevcut biyogaz uygulamaları enerji üretimine odaklansa da, biyogazdan elde edilen değerli kimyasalların ekonomik ve çevresel potansiyelleri genişlemektedir.

Anaerobik parçalanma, bakterilerin serbest oksijen olmadığı ortamlarda herhangi bir substratın organik maddelerini gazlı bir karışıma (CH_4 , CO_2 , H_2 , H_2S vb.) parçaladığı bir dizi biyokimyasal reaksiyonlar dizisidir. Parçalanma sürecine dahil olan bazı bakteri grupları oksijen varlığında hayatta kalamazlar, bu nedenle süreç için anaerobik bir ortam gereklidir. Anaerobik parçalanma süreci genellikle kapalı bir kap içinde gerçekleşir. Üretilen biyogaz geçici olarak depolanır ve daha sonra enerji üretimi veya ısıtma gibi çeşitli kullanım alanlarına yönlendirilir. Anaerobik parçalanma sonrasında reaktör içerisinde kalan katılar ve organik maddeye digestat denir. Digestat sıvı ve katı akımlara ayrılabilir ve her iki akım da değerli bitki besin maddeleri içerir, bu nedenle tarımsal uygulamalarda gübre olarak kullanılabilir.

2.1.1. Anaerobik Parçalanmanın Aşamaları

Anaerobik parçalanma prosesi 4 aşamadan oluşmaktadır. Bunlar; hidroliz asitojenesis, asetojenesis ve metanojenesisdir. Şekil 2.1'de anaerobik parçalanmanın aşamaları gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Anaerobik parçalanma prosesinin aşamaları (Yılmaz, 2020)

2.1.1.1. Hidroliz

Anaerobik çürütücüler tipik olarak, hidroliz veya ön işlemler yoluyla daha fazla parçalanmadan mikroorganizmaların erişemeyeceği karmaşık polimerler içeren organik biyokütle ile karşılaşır (Gujer and Zehnder, 1983). Sonuç olarak hidroliz işlemi, organik makromoleküllerin daha küçük bileşenlerine dönüştürülmesi amacına hizmet eder ve bu bileşenler de asidojenik bakteriler tarafından kullanılabilir.

Hidroliz elektrokimyasal bir süreç olarak mevcut olsa da, anaerobik parçalanmada çoğunlukla biyolojik bir süreç olarak mevcuttur. Hidroliz sürecinde hidrolitik bakteriler, karbonhidratları, lipitleri ve proteinleri sırasıyla şekerlere, uzun zincirli yağ asitlerine (LCFA'lar) ve amino asitlere dönüştürebilen hücre dışı enzimler salgılayabilirler.

Enzimatik bölünmeden sonra hidroliz ürünleri, asidojenik mikroorganizmaların hücre zarlarından yayılabilir. Bununla birlikte, lignin, selüloz ve hemiselüloz gibi bazı substratların parçalanmasının zor olabileceğini ve karmaşık yapıları nedeniyle mikroplar için erişilemez olabileceğini unutmamak önemlidir; Bu karbonhidratların hidrolizini arttırmak için sıklıkla enzimler eklenir (Lin et al., 2010).

Hidroliz, hız belirleyici bir adım olabilir, ancak önceki araştırmalar, metanojenezin, hidrolitik ve metanojenik mikroorganizmaların oranına bağlı olarak hız belirleyici bir adım olarak var olabileceğini de göstermiştir (Luo et al., 2012; Ma et al., 2013). Anaerobik çürütücülerin kinetiğinde hidrolizin önemi nedeniyle, anaerobik çürütücülerde hidrolizi hızlandırmaya yönelik yöntemlere büyük ilgi gösterilmiştir. Özellikle ağır lignoselülozik atıkları sindiren çürütücüler için hidrolizi optimize etmek amacıyla çeşitli atık ön arıtma seçenekleri araştırılmakta ve kullanılmaktadır (Kumar and Sharma, 2017).

Genel olarak konuşursak, hidroliz kendi başına 30-50 °C arasında bir optimum sıcaklığa ve 5-7 optimum pH'a sahiptir, ancak 7 pH'ın altında hidrolitik aktivitenin arttığına dair hiçbir kanıt yoktur (Azman, 2016).

2.1.1.2. Asidojenezis

Asitojenik mikroorganizmalar, hidroliz ürünlerini hücre zarları yoluyla emerek, ara uçucu organik asitleri (UOA'lar) ve diğer ürünleri üretebilirler. UOA'lar, tipik olarak 75:15:10 ila 40:40:20 arasında değişen oranlarda, asetatlar gibi organik asitlerin ve propiyonat ve bütirat gibi daha büyük organik asitlerin bir sınıfını oluşturur (Meegoda et al., 2018). O zaman bile daha küçük miktarlarda etanol ve laktat mevcut olabilir. Asidojenez aşamasında üretilen ara maddelerin spesifik konsantrasyonları, çürütücünün koşullarına bağlı olabilir; farklı pH'larda çalışan çürütücüler için UOA konsantrasyonlarının önemli ölçüde dalgalanabileceği, farklı çalışmaların görünüşte çelişkili sonuçlar sunduğu rapor edilmiştir (Huang, 2015).

Diğer aşamaların aksine, asidogenezin genellikle anaerobik parçalanmanın tüm diğer aşamalarından daha hızlı ilerlediğine inanılır; asitojenik bakterilerin rejenerasyon süresi 36 saatten daha azdır. Bu aşamanın hızlılığı göz önünde bulundurulduğunda, UOA'ların üretimi metanogenezin son aşaması için doğrudan öncüller oluştururken, UOA asitlenmesinin çürütücü arızasının bir nedeni olduğu yaygın olarak bildirilmektedir. Bir dereceye kadar benzer bir anaerobik süreç, gıda atıklarının ve mikrobiyal aşılama ürününün anaerobik olarak ayrışmaya bırakıldığı ve sıvı ve kuru gübre olarak kullanılacak oldukça asidik bir nihai ürün oluşturduğu bir kompostlama uygulaması olan bokashi kompostlamada da mevcuttur (Meegoda et al., 2018).

Son olarak, kanalizasyon atıksuları gibi protein açısından zengin atıklarda, amino asitlerden UOA üretim sürecini incelemek uygundur. Amino asitler genellikle Stickland reaksiyonu yoluyla çiftler halinde UOA'lara bozunur; hidrojenotrofik bakteriler mevcut olduğunda tek amino asit bozunması da mümkündür, ancak bu son sürecin Stickland reaksiyonundan daha yavaş olduğu bilinmektedir. Amino asit parçalanmasının önemli bir ürünü, yeterince yüksek konsantrasyonlarda aynı zamanda anaerobik parçalanmanın bir inhibitörü olduğu da bilinen deaminasyondan amonyak üretimidir (Meegoda et al., 2018).

2.1.1.3. Asetojenesis

Asetojenesis yoluyla asetat üretimiyle, orijinal substratın bir kısmı zaten asetoklastik metanojenez için uygun bir substrata dönüştürülmüştür. Bununla birlikte, üretilen diğer yüksek UOA'lar henüz metanojenik mikroorganizmalar için erişilebilir hale getirilmemiştir. Asetojenesis, bu yüksek UOA'ların ve diğer ara maddelerin asetata dönüştürüldüğü ve hidrojenin de üretildiği süreçtir (Meegoda et al., 2018).

Asetojenesis sırasında üretilen hidrojen, anaerobik parçalanmada mevcut olan ilginç bir sentrofik ilişki olan hidrojenin türler arası aktarımı hakkındaki tartışmayı başlatmaktadır. Asetogenez bir hidrojen üreticisi olsa da, aşırı kısmi basıncın asetojenik mikroorganizmalar için zararlı olduğu kanıtlanmıştır. Bununla birlikte, hidrojenotrofik metanojenlerin varlığından dolayı, ekzergonik bir reaksiyon yaratarak hidrojen kısmi basınçlarını asetogenez için uygun bir seviyede tutarken hidrojen hızla tüketilebilir (Stams and Plugge, 2009).

Aynı zamanda, lipitler, asidogenez ve β -oksidasyon yoluyla ayrı bir asetogenez yoluna girer; burada asidogenez, gliserolden asetat üretir ve β -oksidasyon, LCFA'lardan asetat üretir. Bunu akılda tutarak, yalnızca eşit miktarda karbon içeren LCFA'ların asetata bozunabileceğini akılda tutmak yararlı olacaktır; Tek miktarda karbon içeren LCFA'lar ilk önce propiyonata parçalanır (Cirne et al., 2007).

2.1.1.4. Metanojenesi

Metanojenesi, metan üretmek için erişilebilir ara maddelerin metanojenik mikroorganizmalar tarafından tüketildiği anaerobik parçalanmanın son aşamasını işaret eder. Metanojenik mikroorganizmalar bir grup zorunlu anaerobik arkeyi temsil eder; Metanojenik mikroorganizmaların oksijene karşı akut duyarlılığının bir kanıtı olarak, *Methanococcus voltae* ve *Methanococcus vannielli* hücrelerinin %99'unun oksijene maruz kaldıktan sonra on saat içinde öldüğü bulunmuştur (Meegoda et al., 2018).

Oksijene duyarlılığın yanı sıra metanojenik mikroorganizmalar küçük bir substrat seçimiyle sınırlıdır. Tipik olarak, asetattan gelen asetoklastik metanojenez, metan üretiminin yaklaşık $\frac{2}{3}$ 'ünü oluştururken, hidrojenotrofik metanojenez, metan üretiminin yaklaşık olarak geri kalan $\frac{1}{3}$ 'ünü oluşturur; ancak metanol, metilaminler ve formattan metanojenez de gözlemlenmiştir (Meegoda et al., 2018).

Metanojenesisin çevresel ihtiyaçları ile ilgili olarak, metanojenik mikroorganizmalar, daha düşük bir redoks potansiyeline ek olarak, anaerobik parçalanmanın önceki aşamalarına göre daha yüksek bir pH'a ihtiyaç duyma eğilimindedir; bu ikinci gereklilik, laboratuvar ekimi için önemli sorunlara neden olmuştur. Aynı zamanda, metanojenlerin anaerobik parçalanmada diğer mikroorganizmalara göre 5-16 güne kadar önemli ölçüde daha yavaş bir yenilenme süresine sahip olduğu görülmektedir. Ancak *Methanococcus maripaludis* gibi bazı hidrojenotrofik türlerin yalnızca iki saatlik iki katına çıkma süresine sahip olduğu rapor edilmiştir (Meegoda et al., 2018).

Metanojenik türler muhtemelen anaerobik parçalanmada bulunan mikrobiyal grupların en hassasını oluştururken, son araştırmalar *Methanosarcina* spp. nispeten sağlam olma eğilimindedirler ve aksi takdirde diğer metanojenik mikroorganizmalar için zararlı olabilecek seviyelerdeki pH şoklarına ek olarak amonyak, sodyum ve asetat konsantrasyonlarına dayanma kapasitesine sahiptirler.

Kesikli reaktörlerde Metanojenesisin sonu, biyogaz üretiminin durmasıyla belirlenir ve bu yaklaşık 40 gün sürebilir. Bir çamurun parçalanma derecesinin değerlendirilmesi, uçucu katı madde içeriğinden ve susuzlaştırma yeteneğinden yapılabilir.

2.1.2. Anaerobik parçalanma prosesinin değerlendirilmesinde kullanılan parametreler

Anaerobik parçalanma prosesinin verimi pH, alkalinite, sıcaklık, nütrient içeriği, toksisite, organik yükleme hızı, hidrolik bekletme süresi ve çamur yaşı gibi parametrelerden etkilenmektedir. Bu parametrelerdeki değişimler her zaman doğrudan etki etmeyebilmekte, fakat sistemde yaşanabilecek problemlere karşı indikatör görevi görerek işletmeye yardımcı olmaktadır (Meegoda et al., 2018).

2.1.2.1. Biyokimyasal oksijen ihtiyacı

Biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ), çamurda bulunan biyolojik olarak parçalanabilen organiklerin bir ölçüsünü sağlar ve anaerobik çürütücünün genel etkinliği için bir ölçü olarak kullanılabilir. BOİ, belirli bir çamur numunesindeki çözünmüş oksijenin mikrobiyal metabolizmasından beş gün boyunca elde edilen değerleri yansıtır. Sonuçta BOİ, beş günlük bir deneysel süre boyunca bir çamur numunesinde aerobik mikroorganizmaların varlığını sürdürmek için gereken çözünmüş oksijen miktarını belirlemek için kullanılabilen bir değerdir ve bu da, biyolojik olarak parçalanabilen organiklerin konsantrasyonunu ölçmek için kullanılabilir (APHA, 2005).

BOİ testi, fotosentezden kaynaklanan herhangi bir çözünmüş oksijen üretimini önlemek için, önceden belirlenmiş bir sıcaklıkta ve karanlık bir odada kapalı şişelerde gerçekleştirilir. Böylece BOİ, çözünmüş oksijen farkından elde edilebilir ve inkübasyonun seyreltme sonrası başlangıç ve bitişi dikkate alınır. Alternatif olarak, BOİ'nin bir varyasyonu olan karbonlu BOİ (cBOİ), amonyak, azot ve nitritin oksidasyonunu önlemek için bir nitrifikasyon inhibitörünün eklenmesi dışında benzer bir protokolle belirlenir. Kanalizasyon atık suları gibi yüksek protein içeriğine sahip çamurlar için cBOİ'un mevcut organiklerin daha doğru bir ölçümünü sağlayabileceği tahmin edilebilir. Kanalizasyon atıklarının aerobik çürütülmesi için kullanılan benzer bir ölçüm, belirli bir deney süresi boyunca aerobik çamurdaki oksijen tüketiminden biyolojik aktivitenin bir ölçüsünün elde edildiği oksijen alım hızıdır (Meegoda vd. 2018).

2.1.2.2. Kimyasal oksijen ihtiyacı

BOİ gibi, kimyasal oksijen ihtiyacı da (KOİ), oksitleyici maddelerle reaksiyonda tüketilebilen bir çamur numunesinde mevcut olan oksijenin bir ölçüsünü sağlar (APHA, 2005). Anaerobik çürütmede KOİ tipik olarak çamurda bulunan organik madde sayısını

yansıtır. Anaerobik çürütmenin verimliliği KOİ kullanılarak da değerlendirilebilir; KOİ azalması, organik tüketimini yansıttığı için anaerobik çürütücüde meydana gelen bozunma miktarını yansıtabilir.

KOİ testlerinde çamur, fazla miktarda potasyum dikromat ve sülfürik asit çözeltisiyle geri akıtılır. Potasyum dikromatın kullanımı, amonyağı nitrata oksitleyemediği için nitrifikasyonun dikkate alınması ihtiyacını ortadan kaldırır. Geri akışın tamamlanmasından sonra, fazla potasyum dikromatın miktarı, demirli amonyum sülfata karşı yapılan bir titrasyonla belirlenebilir; Nihai KOİ değeri, ilk geri akışta tüketilen potasyum dikromat miktarından belirlenebilir (APHA, 2005).

2.1.2.3. pH ve alkalinite

Anaerobik parçalanma prosesinde bir çok farklı mikroorganizma grubu yer almaktadır ve bu farklı gruplar da farklı pH değerlerinde etkin olmaktadır. Hidroliz aşamasında aktif olan bakteriler ve asidojenler için optimum pH 5-6 aralığında iken, metanojenesis aşamasında etkin olan arkeler için optimum pH değeri 6,7-7,5 aralığındadır (Khanal vd. 2010). Bu farklı etkin pH aralıkları anaerobik parçalanmada ortam pH'nın kontrolünü önemli kılmaktadır. pH değerinin stabil olması prosesinde stabil olduğuna işaret etmektedir. pH değerinin 5'in altına düşmesi durumunda metanojenesis aşamasında inhibisyon oluşması muhtemeldir. anaerobik parçalanmadaki pH düşüşlerinin en yaygın nedeni sistemde hidroliz aşamasında oluşan uçucu organik asitlerin birikimidir. Reaktörlerde uçucu organik asit (UOA) birikimine bağlı ani pH düşüşlerini engellemek amacıyla ortamda yeterli alkalinite olması önemlidir. Stabil bir proses için UOA/Alkalinite değerinin 0,1'in altında olması hedeflenmektedir. Reaktör içerisinde nötral seviyelerde bir pH değerinin sağlanması için 2000-4000 mgCaCO₃/l aralığında bir alkalinite değeri sağlanmalıdır (Metcalf&Eddy vd. 2004). Sadece pH düşüşü değil aynı zamanda artışı da sistemi inhibe edebilmektedir. Sisteme beslenen organik maddeden kaynaklı metabolik alkalinite olarak adlandırılan alkalinite kaynakları bulunmaktadır. Protein gibi azot içeren organik bileşikler parçalanarak ortamda metabolik alkalinite oluşumuna sebep vermektedir. Yüksek amonyak konsantrasyonlarında pH değeri 8'in üzerine çıkabilmekte ve asidojenlerin inhibisyonuna sebep olabilmektedir. Bu sebeple, anaerobik parçalanma prosesinde pH değerinin kontrolünde ortamdaki azotlu organiklerin, sülfatlı bileşiklerin ve uçucu organik asitlerin konsantrasyonunun tespiti önemlidir (Speece, 1996). Alkalinite pH kontrolünde en önemli parametredir. Sistemde bakiye alkalinite bulunması ani pH değişimlerini engellemektedir. Gelen substratta yeterli alkalinite bulunmaması durumunda sisteme dışarıdan ilave alkalinite sağlanmalıdır. Ekonomik olması sebebiyle kireç, sodyum hidroksit ve amonyak en yaygın kullanılan ticari alkalinite kaynaklarıdır (Öztürk, 2007).

2.1.2.4. Karbon/Azot oranı

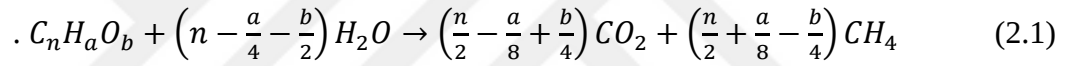
Bir substratın karbon/azot oranı (C/N oranı), besinlerin yaygın olarak kullanılan bir karakterizasyonudur. Karbonhidratların, lipidlerin ve proteinlerin bileşimi göz önüne alındığında, anaerobik bir çürütücüde en fazla azot kaynağının proteinlerin parçalanmasından kaynaklanacağı mantıklıdır. Parçalanma için uygun bir substrat sağlamak için belirli bir konsantrasyonda karbonun gerekli olması gibi, mikroorganizmaların protein oluşumunu tehlikeye atmaması için belirli bir

konsantrasyonda azot da gereklidir. Süt gübresi üzerinde yapılan bir çalışmada, artan C/N oranlarının biyogazdaki metan konsantrasyonlarının azalmasına yol açtığı, optimum C/N oranının 25:1 olduğu bulunmuştur.

Birden fazla substratın birlikte parçalanmasında giderek daha fazla kullanılması nedeniyle C/N oranı da dikkat konusu olmuştur. Örneğin, kümes hayvanı gübresinin muhtemelen üre nedeniyle yüksek amonyak içeriği nedeniyle nispeten düşük bir C/N oranına sahip olduğu bilinmektedir; bu nedenle saman gibi karbon açısından zengin substratlar, amonyak inhibisyonu olasılığını ortadan kaldırmak için birlikte parçalanabilir (Meegoda et al., 2018).

2.1.2.5. Teorik metan verimi

Anaerobik parçalanmanın dört aşamasını özetlerken, belirli bir substrat için teorik metan verimini ölçmeye yönelik girişimlerde bulunulmuştur. Tüm substratın karbondioksit veya metana dönüştüğü ve substratın karbon, hidrojen ve oksijen bileşiminin bilindiği varsayımı altında çalışarak, teorik molar ve hacimsel bir denklem bulmak için aşağıdaki denklem ve genel gaz denklemi kullanılabilmektedir (Meegoda et al., 2018).



2.1.2.6. Uçucu katılar

Uçucu katılar (UKM), genellikle toplam katıların organik fraksiyonunun bir ölçümü olarak ele alınır, ancak daha doğru bir tanım, çamurdaki tutuşma sırasında kaybolan madde miktarı olacaktır. UKM içeriği, 550°C'de toplam katı ölçümünden üretilen kalan katıların ateşlenmesiyle belirlenir, ancak toplam katıların ölçümü sırasında bir miktar buharlaşma zaten oluşmuş olabilir (Meegoda et al., 2018).

KOİ gibi UKM de sudaki organiklerin ölçümü olarak ele alınabilir, ancak ilki daha doğru bir ölçümdür. Bununla birlikte, her iki ölçüm de bir çürütücünün organik yükleme oranının belirlenmesi için bir temel olarak kullanılabilir; bu konu daha ayrıntılı olarak tartışılacaktır. BOİ/KOİ gibi UKM azaltımı da kendi başına çürütücü verimliliğinin bir ölçümü olarak ele alınır ve diğer ölçümlerin bir bileşeni olarak da görünebilir (APHA, 2005).

2.1.3. Anaerobik parçalama prosesinin tasarımında dikkat edilecek hususlar

2.1.3.1. Hidrolik bekletme süresi

Hidrolik bekletme süresi (HRT), sıvıların çürütücüde kaldığı ortalama süreyi ifade eder. Literatürde sıklıkla θ olarak görünen HRT, çürütücü hacminin (V) ve çürütücünün akış hızının (Q) bölümü olarak hesaplanabilir.

$$Q = \frac{V}{\theta} \quad (2.2)$$

Yükleme hızıyla ilgili bir ölçü olarak, daha kısa bir HRT daha yüksek bir yükleme hızına karşılık gelir. Bu nedenle, daha kısa HRT'lerin, inhibitör etkiler getirebilecek UOA asitlenmesiyle ilişkili olduğu bilinmektedir. Bununla birlikte, daha kısa HRT'ler proses verimliliğinin artmasına ve sermaye maliyetlerinin azalmasına olanak tanır, ancak lignoselülozik atıkların parçalanması için daha uzun HRT'ler gereklidir. Genellikle mezofilik parçalanma 15-30 gün içinde gerçekleştirilebilir. Ancak belediye atıklarının maliyet-fayda analizleri sonrasında en yüksek faydanın, düşük yükleme hızı ve yüksek HRT ile çalışan çürütücüler için olduğu bulunmuştur (Meegoda et al., 2018).

2.1.3.2. Organik yükleme hızı

Bir çürütücünün yükleme hızı, sürekli çürütücülerde bir çürütücüye günlük olarak beslenen organik madde miktarını ifade eder. Bir çürütücünün aşırı yüklenmesi, atığın hızlı bir şekilde hidrolize edilmesi ve asitleştirilmesi nedeniyle rahatsızlıklara neden olabilir, böylece metanogenezi engelleme potansiyeline sahip olan ve dolayısıyla anaerobik parçalanma sürecini bozan UOA'ların aşırı birikmesine neden olabilir. Örneğin, artan yükleme hızıyla çalışan zeytin değirmeni atık çürütücülerinin azalan pH'ta, KOİ azalmasında ve en önemlisi biyogaz üretim oranlarında bir düşüş gördüğü de gösterilmiştir. Yüksek katı maddeli kesikli çürütücülerde, yükleme oranı diğer tek kademeli reaktörlerin yalnızca yarısı kadar olabilir ve bu da daha büyük bir arazi ayak izi gerektirir (Meegoda et al., 2018).

Aşırı yüklenmiş yağ atık sindiricileri üzerinde yapılan araştırmalar, yükleme hızındaki hızlı şokların, mikrobiyal popülasyonlarda kaymalara neden olabileceğini ve daha yüksek yükleme oranlarına tolerans geliştirdikten sonra metan veriminin normal seviyelere döndüğünü buldu. İlk aşırı yükleme örneğinden sonra çürütücü performansının ve aşırı yüklemeye karşı direncin artmasının, metanojenik mikroorganizmaların artan çeşitliliğinden kaynaklandığı varsayılmıştır (Meegoda et al., 2018).

2.1.3.3. Toplam katılar

Toplam katı madde (TKM), organik veya inorganik yapısına bakılmaksızın çamurdaki kuru maddenin ölçümüdür; literatürde sıklıkla yüzde veya konsantrasyon

olarak ifade edilir. TKM içeriği, bir çamur numunesinin ağırlıkta başka bir değişiklik gözlemlenmeyene kadar art arda 103-105 °C'de kurutulmasıyla belirlenir (APHA, 2005).

Etkinliğin bir değerlendirmesi olmasının yanı sıra TKM, çürütücü işleminin önemli bir özelliğidir. Yüksek TKM'li anaerobik çürütme, daha küçük çürütücü boyutları ve daha düşük ısıtma ihtiyaçları nedeniyle son zamanlarda önemli miktarda ilgi görmüştür. Ayrıca, aynı bekletme süresinde çalışan düşük TKM çürütücülerle karşılaştırıldığında sürekli yüksek TKM çürütücülerde biyogaz verimlerinin arttığı rapor edilmiştir (Meegoda et al., 2018).

2.1.3.4. Sıcaklık

Anaerobik parçalanma için iki ana sıcaklık rejimi mevcuttur: mezofilik (35°C) ve termofilik (55°C). Mezofilik parçalanma daha düşük bir sıcaklıkta çalıştığından, bu sıcaklık rejiminde parçalanma daha yavaştır ve daha az biyogaz üretir; ancak mezofilik çürütücüler, termofilik çürütücülere kıyasla daha düşük ısıtıcı enerji maliyetleri nedeniyle çekici olmaya devam etmektedir.

Termofilik parçalanma ise daha yüksek bir sıcaklıkta çalışır. Sonuç olarak reaksiyon hızları artar, bu da artan biyogaz üretimine ek olarak daha yüksek yükleme oranlarına yol açar. Ek olarak, termofilik parçalanmanın daha yüksek seviyede patojen tahribatına sahip olduğu bilinmektedir; bu, atık sularındaki patojen aktivitesine ilişkin düzenlemelerle bazı yetki alanlarında faydalı olabilir. 53 °C'lik bir çürütücü sıcaklığında, çeşitli patojenler için bir saatten daha az bir %90'lık yok etme süresi rapor edilirken, 35 °C'de çalışan bir çürütücüde aynı patojenler için birkaç güne yayılan %90'lık bir yok etme süresi rapor edilmiştir.

Bazı uygulamalarda ise psikrofilik sıcaklık denen ortam sıcaklığında çalışmalar mevcuttur. Psikrofilik sıcaklıklar ısıtma ihtiyacı olmadığından ekonomik açıdan fizibildir. Ancak bununla birlikte verimleri de düşüktür (Meegoda et al., 2018).

2.1.4. Anaerobik Parçalanma Prosesinin Avantaj ve Dezavantajları

Anaerobik parçalanma prosesinin kullanımının giderek artmasına rağmen, aerobik prosesler hala daha yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu tercihin arkasında, karar vericilerin anaerobik parçalanma prosesi hakkında yeterince bilgi sahibi olmamaları, uygulayıcıların bilgi eksiklikleri ve prosesin ilk yatırım maliyetinin yüksek olması gibi faktörler yer almaktadır. Bu durum, anaerobik parçalanma prosesini dezavantajlı bir seçenek gibi göstermektedir (Meegoda et al., 2018).

Ancak, anaerobik parçalanma prosesi enerji verimliliği açısından oldukça avantajlıdır ve son 30 yılda kabul görmüş ve uygulama alanları genişlemiştir. Anaerobik parçalanma prosesinin avantajları ve dezavantajları şu şekildedir:

Avantajlar:

- Enerji verimliliği yüksektir.
- Organik atıkların biyogaz gibi değerli yan ürünlere dönüşümü sağlanabilir.

- Çevresel etkileri azaltabilir (örneğin, metan gazı emisyonları azalabilir).
- Daha az işletme ve bakım gerektirebilir.

Dezavantajlar:

- İlk yatırım maliyetleri yüksektir.
- Karar vericilerin ve uygulayıcıların bilgi eksikliği olabilir.
- Prosesin karmaşıklığı ve kontrol gereksinimleri vardır.
- Bazı durumlarda proses stabilitesi zor olabilir.

Bu avantajlar ve dezavantajlar, anaerobik parçalanma prosesinin potansiyelini değerlendirirken dikkate alınması gereken önemli faktörlerdir (Meegoda et al., 2018).

2.2. Süt Endüstrisi Atıkları

Süt ve süt ürünleri endüstrisi dünya çapında büyük ölçüde üretilip tüketilmektedir. FAO'ya (2022) göre, 2022 yılında 930 milyon ton süt üretilmiş, bu miktar 2021'e göre %0,6 artmıştır. 2022 yılında en büyük süt üreticileri Asya (419 milyon ton), Avrupa (232 milyon ton), Kuzey Amerika (112,6 milyon ton) ve Güney Amerika (65,6 milyon ton) olmuştur. Güney Amerika'da, Brezilya, Uruguay ve Arjantin gibi bazı ülkelerdeki düşük üretim nedeniyle 2022 ile 2021 arasında süt üretimi yaklaşık %1,7 azalmış, bunun kısmen Kolombiya'daki artışlarla dengelediği görülmüştür (FAO, 2022). Peynir, pıhtılaşmış süt proteinleri, yağ, süt ve tuzlardan oluşan ve taze veya olgunlaştırılmış olarak tüketilen bir üründür. Farklı coğrafi kaynaklardan, tüketim alışkanlıklarından, kimyasal bileşimden, dokudan, tattan, aroma ve raf ömründen etkilenen çeşitli peynir türleri mevcuttur. Süt endüstrisi atıksuları yüksek miktarda organik madde sahiptir. Süt ve süt ürünleri üretiminden kaynaklanan atık hacmi, kirlilik düzeyi ve kullanılan su miktarı bakımından önemli bir çevresel kirlilik yükü oluşturan bir endüstri olarak değerlendirilmektedir.

Süt endüstrisi; ham (çiğ) sütün, ısıtılmış süt, yoğurda, peynire, krema ve tereyağına, dondurma, süt tozu, laktoz, konsantre süt ve çeşitli tatlılara dönüştürüldüğü bir endüstridir. Son yüzyılda gözlenen hızlı sanayileşme ve artan süt üretimi (yıllık artış yaklaşık %2,8), süt işleme endüstrisini özellikle Avrupa'da en büyük atıksu üreten endüstriyel kaynak haline getirmiştir (Kolev Slavov, 2017). Süt endüstrisinde, su kilit rol oynamaktadır. Temizlik dahil yıkama, dezenfeksiyon, ısıtma ve soğutma gibi teknoloji hattının her adımında su kullanılmaktadır.

Atıksu miktarı, işlenen süt birim hacminden yaklaşık 2,5 kat daha fazladır. Üretilen atıksu miktarı ve karakteristiği büyük ölçüde fabrikanın büyüklüğüne, uygulanan teknolojiye, verime, yerinde temizleme (Clean in Place, CIP) yöntemlerinin karmaşıklığına ve iyi üretim uygulamalarına (Good Manufacturing Practices, GMP) bağlıdır (Kolev Slavov, 2017). Süt endüstrisi atıksuları genellikle süt veya teknolojik çevrimlerde kaybedilen süt ürünlerini (dökülen süt, bozulmuş süt, yağsız süt ve lor parçaları gibi), imalatla kullanılan başlangıç kültürlerini, işleme yan ürünlerini (peyniraltı suyu, süt ve peyniraltı suyu permeatları gibi), süt kamyonları, tanklar, tenekeler,

ekipmanlar, şişeler ve yerlerin yıkanması aşamasında oluşan kirleticileri, CIP prosedürlerinde kullanılan reaktifleri, hijyen ürünlerini, süt ve süt ürünlerinin soğutulması, ekipman hasarı veya işletme sorunları için üretimde kullanılan farklı katkı maddelerini içerir.

Süt endüstrisi atıklarının arıtılmasında mekanik, fizikokimyasal veya biyolojik arıtma prosesleri kullanılmaktadır. Mekanik arıtma prosesleri katı ve askıda katı maddelerin ayrılması ve debi ve kirletici konsantrasyonlarının dengelenmesi için gereklidir. Aynı zamanda askıda katı madde miktarı da azaltılmaktadır. Fizikokimyasal arıtma prosesleri emülsiyon halindeki bileşiklerin uzaklaştırılmasında etkilidir, ancak reaktif ilavesi su arıtma maliyetlerini arttırmaktadır. Fizikokimyasal arıtma proseslerinin diğer bir dezavantajı ise kimyasal oksijen ihtiyacı (çKOİ) giderim veriminin çok düşük olmasıdır. Sonuç olarak, süt endüstrisi atıksuları yüksek miktarda biyolojik olarak parçalanabilen kirletici maddeleri içerdiğinden biyolojik atıksu arıtma sistemleri tercih edilmektedir (Kolev Slavov, 2017). Özellikle anaerobik parçalanma prosesleri hem atıksu arıtılması hem de biyogaz yoluyla enerji üretimi açısından tercih edilen proseslerdir.

Sütten peynir üretimi sırasında 3 farklı sıvı atık oluşabilmektedir. Bunlar; peynir altı suyu (PAS), ikincil peynir altı suyu (İPAS) ve peynir altı atıksuyudur (PAAS). PAS yüksek organik kirliliğe sahip başlıca süt endüstrisi atıksularından biridir. PAS, süt hacminin yaklaşık %85-95'ini ve süt bileşenlerinin %55'ini temsil eder. PAS, süt kazeininin çöktürülmesi ve uzaklaştırılması sonucunda kalan sarımsı bir sıvıdır. Tipik PAS kompozisyonu ağırlıkça %4,5-6 laktoz, %0,6-1,1 protein, %0,8-1 mineral, %0,05-0,9 laktik asit, %0,06-0,5 yağ ve %93-94 su içermektedir. Peyniraltı suyu, laktoz, suda çözünen proteinler ve mineraller gibi bileşenlerden oluşmaktadır. PAS, %60 ila %73 arasında değişen oranlarda aşırı doymuş laktoz içeren bir çözeltidir. Bu çözelti soğutulduğunda kristalleşme başlar ve zamanla kristaller büyür. Kristaller sıvı fazdan santrifüjle ayrılır. Gerekli gradiente bağlı olarak, içerdiği yabancı maddeler aktif karbon kullanılarak saflaştırılır ve uzaklaştırılır (Avrupa Komisyonu, 2006). Peyniraltı suyunun asidik ($pH < 5$) ve tatlı ($6 < pH < 7$) olmak üzere iki farklı formu bulunmaktadır. Asidik peyniraltı suyu, yüksek kül içeriğine ve düşük protein içeriğine sahiptir ve sınırlı miktarda üretilir. Peyniraltı suyu, süt gibi hassas bir yapıya sahiptir ve hızla asitlenme eğilimi gösterir. Bu süreçte, peyniraltı suyunun değerini artıran laktoz, mikroorganizmaların faaliyeti sonucu büyük ölçüde laktik aside dönüşmektedir.

Peyniraltı suyunun uzaklaştırılmasıyla çökeltme sonucunda suyun yeşil-sarı renk aldığı gözlemlenmektedir. Bu sarı renk genellikle Ribo flavin vitamininden kaynaklanmaktadır. Süt laktozu yoğunlukla 39-60 kg/m³ arasında değişen yoğunlukta peyniraltı suyu kalıntılarını oluşturmakta ve bu kalıntıların %90'ı kadarı organik yüke sahiptir. Yağ içindeki organik kirletici değerleri 0,99-10,58 kg/m³ arasında değişirken, protein içindeki organik kirletici değerleri 1,4-8 kg/m³ arasındadır. BOİ₅ için değer aralığı 27-60 kg/m³ ve KOİ için değer aralığı 50-102 kg/m³ olarak belirlenmiştir. BOİ₅/KOİ oranı genellikle 0,5'in üzerindedir, bu nedenle biyolojik arıtım prosesi uygun görülmektedir. Peyniraltı suyunda meydana gelen inorganik kirlilik ise mineral tuzlar (%0,46 ila %10 arasında) olarak ortaya çıkmakta olup, bunların başlıcaları NaCl, KCl (>%50) ve kalsiyum tuzlarıdır. Yüksek sodyum içeriği ise işletme için bir sorun teşkil edebilmektedir (Prazeres vd. 2012).

Peyniraltı suyunda en önemli kirlilik unsurlarının besin maddeleri olduğu bilinmektedir. Peyniraltı suyunun %93-94'ü su içeriğine sahip olup, içinde besin maddeleri bulunmaktadır. Süt endüstrisi atıklarından kaynaklanan organik madde düzeyleri nispeten yüksektir ve biyokimyasal oksijen ihtiyacı ile kimyasal oksijen ihtiyacı 0,1-100 kg/m³ aralığında değişmektedir. BOİ₅/KOİ indeksi ise genellikle 0,4-0,8 arasında yer almaktadır. Organik madde içeriğinde ise özellikle karbonhidratlar, proteinler, laktoz ve kazein gibi başlıca bileşenler bulunmaktadır.

2.2.1. Süt endüstrisi atıklarının anaerobik parçalanmasının biyokimyası

2.2.1.1. Yağların anaerobik parçalanması

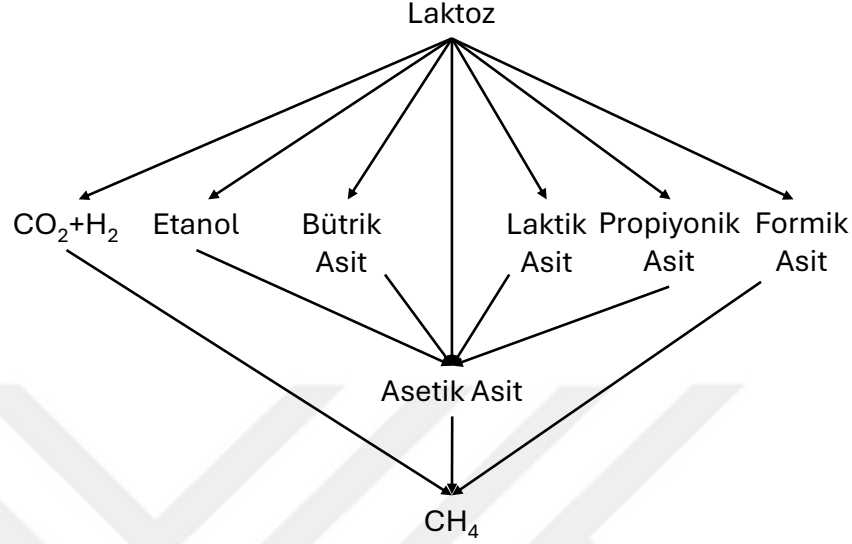
Süt yağı içerisindeki katı madde miktarı, süt fabrikalarından çıkan atık suyun toplam katı maddesinin %4 ile %22'sine karşılık gelmektedir. Süt yağı içerisinde esas olarak trigliseritler ve bunun yanında süt lipidleri, mono ve digliseritler, serbest yağ asitleri, fosfolipitler ve vitaminler (E, D, A ve K) gibi bazı ek bileşikler bulunmaktadır. Sütteki yağ asitlerinin yaklaşık %60'ı doymuş yağ asitleridir ve doymamış yağ asitlerinin büyük bir kısmını oleik ve linoleik asitler oluşturmaktadır. Oleat ve palmitat, süt endüstrisi atıklarındaki en yaygın yağ asitleridir. Anaerobik parçalanma esnasında süt yağı ilk önce klostridia ve mikrokoklar gibi asidojenik bakterilerden gelen lipazlar tarafından gliserol ve uzun zincirli serbest yağ asitlerine hidrolize edilmektedir. Bakteriyel hücrenin içinde, asidogenez gliserolü asetata dönüştürür. Asetil-CoA ve 2 karbon azaltılmış bir yağ asiti, doymuş serbest yağ asitinin β-oksidasyonu ile üretilir. Bu döngü, tüm serbest yağ asitleri tamamen asetil-CoA veya asetil-CoA ve 1 mol propionil-CoA/mol yağ asiti indirgenene kadar tekrarlanır. Propionat daha sonra asetat, CO₂ ve H₂'ye dekarboksile edilir. Bu nedenle, yağ asitinin β-oksidasyonunun son ürünleri asetat, H₂ ve CO₂'dir. β-oksidasyondan sorumlu bakterilere örnek Syntrophomonas wolfei ve Syntrophobacter wolinii'dir (Hassan ve Nelson 2012).

Lipitlerden üretilen metan verimi karbonhidratlar veya proteinlerden üretilenden çok daha yüksektir. Ancak lipitler fiziksel ve kimyasal olarak anaerobik parçalanmayla etkileşime girebilmektedir. Yüksek hidrofobisite nedeniyle süt yağı biyokütleyle adsorbe olmakta, biyoasimilasyonu engellemekte ve diğer substratlara erişimi sınırlamaktadır. Yağın adsorpsiyonu mikrobiyal kütlemin yüzdürülmesine ve özellikle yukarı akışlı anaerobik çamur yatağı veya genişletilmiş granüler çamur yatağı gibi yüksek hızlı anaerobik reaktör sistemlerinde yıkanmaya neden olmaktadır. Literatürde %18'e kadar olan yağ oranlarının metan üretimine bir etkisi olmadığı belirtilmektedir (Hassan ve Nelson 2012).

2.2.1.2. Laktozun anaerobik parçalanması

Laktoz, metana nihai dönüşümünden önce birkaç farklı ara ürüne dönüşmektedir (Şekil 2.2). Çoğu anaerobik bakteri, laktoz metabolizması için Emden Meyerhof-Parnas yolunu kullanmaktadır. Bu yolda, laktat, asetat, etanol ve diğer metabolitlere dönüştürülen pirüvat ve indirgenmiş NAD (NADH) üretilmektedir. Laktozun anaerobik parçalanmasının ana ara metabolitleri asetat, laktat, etanol ve format olmakla birlikte daha düşük seviyelerde propionat ve valerat bulunmaktadır. Asetat, laktozdan üretilen ara metabolitlerin %70'inden fazlasına karşılık gelmektedir. Ana son ürünler arasında

1:0,94:0,25 oranında metan, CO₂ ve hücresel karbon vardır. Ek olarak, son ürünlerde az miktarda asetat, laktat, propiyonat, bütirat, etanol ve H₂ oluşmaktadır belirtilmektedir (Hassan ve Nelson 2012).

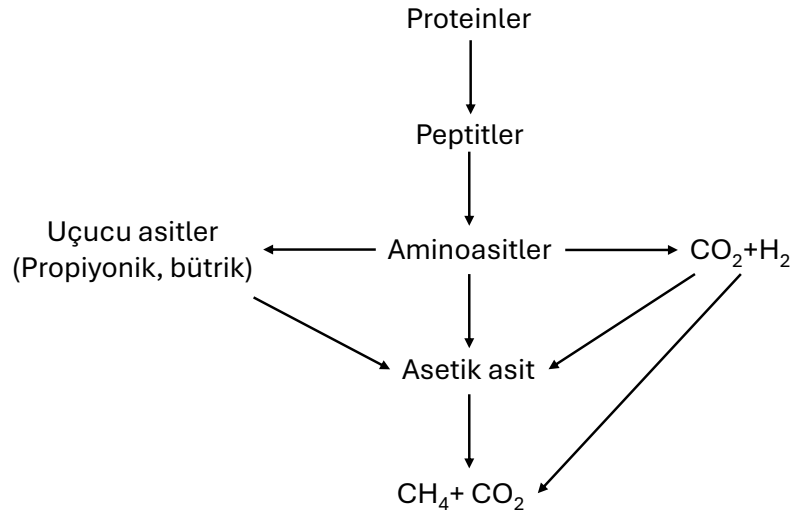


Şekil 2.2. Laktozun metana anaerobik dönüşümündeki muhtemel yollar (Hassan ve Nelson 2012)

Laktoz fermantasyonundan elde edilen ara ürünlerin birikimi, daha düşük metan üretimine sahip mikroorganizmaların inhibisyonuna yol açmaktadır. Devreye alma sırasında, pH değerleri 4,5'in altındaysa, laktoz fermantasyonu CO₂ veya hidrojen üretmektedir. Fermantasyonun erken aşamalarında karbondioksitin varlığı, metan üretimi için gerekli mevcut UOA miktarını azaltmaktadır. Genellikle, metanın yaklaşık %70'i asetik asitten, %30'u ise CO₂ ve hidrojenden üretilmektedir (Hassan ve Nelson 2012).

2.2.1.3. Proteinlerin anaerobik parçalanması

Proteinlerin hidrolizi karbonhidratlara nazaran daha yavaş gerçekleşmekte ve mikroorganizmaların aklımasyonuyla doğrudan ilişkilidir. Peynir altı suyu proteinleri fermantasyonu yavaşlatmasına rağmen, anaerobik parçalanmanın asidojenik aşamasında benzer yan ürünlerin oluşumu tespit edilmiştir. Anaerobik parçalanma esnasında proteinler, hücre dışı proteazlar tarafından peptitlere hidrolize edilmektedir. Peptitler, peptidazlar tarafından amino asitlere parçalanmaktadır. Amino asitler, organik asitler, amonyak, CO₂ ve az miktarda hidrojen ve kükürt içeren bileşikler de dahil olmak üzere farklı yollar ile çeşitli son ürünler oluşmaktadır. Bir amino asidin oksidasyonunda, elektron alıcısı başka bir amino asit (Stickland reaksiyonu) veya hidrojen tüketen bakteriler olabilmektedir (Hassan ve Nelson 2012).

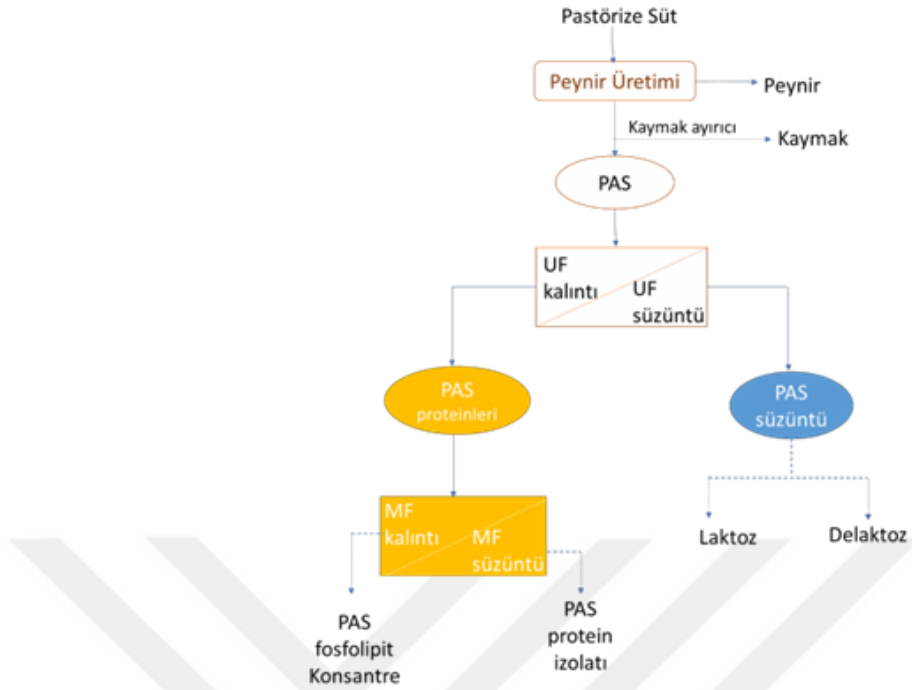


Şekil 2.3. Süt proteinlerinin anaerobik parçalanması (Hassan ve Nelson 2012)

2.2.2. Delaktoz

Delaktoz, PAS süzüntüsü içerisindeki laktozun kristalizasyonu sonucu elde edilen bir yan üründür. Delaktoz içerisinde protein, organik asit ve vitaminlerin yanı sıra PAS süzüntüsüne kıyasla 3 kata kadar daha fazla mineral bulunmaktadır. Peynir yapımında kullanılan 1 kg süt başına tipik olarak 0,5 kg delaktoz üretilebilmektedir. Delaktozun içerdiği yüksek organik kirlilik nedeniyle kontrolsüz deşarjı büyük bir çevre problemi yaratmaktadır. Bu durum delaktozun kontrollü bertarafını zorunlu kılmaktadır. Delaktozun arıtılmasındaki güçlük üretici üzerinde bir ekonomik baskı oluşturmakta ve bu nedenle üretici tarafından hayvan yemi veya gübre olarak kullanılmaktadır. Delaktoz kompozisyonu hammadde ve üretim mekanizmasındaki farklılıklar nedeniyle farklılıklar göstermektedir. Bunun sonucu olarak, delaktoz içerisindeki laktoz ve mineral içeriği de değişmektedir (Çakmak, 2021).

Delaktoz üretimine ait genel akış şeması Şekil 2.4’de verilmektedir.



Şekil 2.4. Delaktöz üretimi akış şeması (Çakmak, 2021)

2.2.3. Literatürde PAS'ın anaerobik arıtımına ilişkin çalışmalar

PAS'ın anaerobik biyolojik arıtımı konusunda literatürde çok sayıda çalışma bulunmaktadır.

Fernández vd. (2015), peynir altı suyunun termofilik anaerobik parçalanmasını, tek ve iki aşamalı ardışık kesikli reaktör (SBR) sistemlerinde değerlendirmiştir. İki aşamalı süreç, hidrojen (H_2) ve metan (CH_4) üretimi için tasarlanmış olup, tuz birikimi nedeniyle kararsızlık yaşanmasına rağmen daha yüksek spesifik metan üretimi (SMP) elde etmiştir ($340,4 \pm 40 \text{ L } CH_4 \text{ kg}^{-1} \text{ COD}_{\text{beslenen}}$). Tek aşamalı süreçte ise, hidrolik bekleme süresi (HRT) 8,3 gün iken $314,5 \pm 6,6 \text{ L } CH_4 \text{ kg}^{-1} \text{ COD}_{\text{beslenen}}$ SMP elde edilmiştir. Bu çalışma, iki aşamalı sistemin daha yüksek metan verimine ulaşabildiğini ancak, tuz konsantrasyonunun kontrol altında tutulmasının önemli olduğunu göstermiştir.

Charalambous vd. (2020), bir süt endüstrisi atık suyu arıtımı için tam ölçekli bir iç sirkülasyon (IC) biyoreaktörünü incelemiş ve mezofilik koşullar altında çalıştırmıştır. Ayrıca, peynir altı suyunun pH 5-6'da anaerobik parçalanmasını laboratuvar ortamında incelemişlerdir. pH 5-6'ya adapte edilmiş granüler çamurun, aynı koşullar altında adapte edilmemiş granüler çamura kıyasla %30 daha fazla metan ürettiği görülmüştür. IC biyoreaktöründe ise ortalama COD giderme verimi %80 ve ortalama biyogaz üretimi $69,8 \text{ m}^3/(\text{gCOD/L})$ olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada ayrıca, pH 5-6'da propionik asidin reaksiyonu sınırlayan faktör olduğu ve metanojenler arasında özellikle Methanolinea cinsinin arttığı belirtilmiştir.

Dareioti and Kornaros (2015), ensile edilmiş sorgum, peynir altı suyu ve sıvı sığır gübresi karışımını kullanarak hidrojen ve metan üretimi için iki aşamalı sürekli

karıştırılmalı tank reaktör (CSTR) sistemini mezofilik koşullar altında araştırmıştır. Farklı hidrolik bekletme sürelerinin (HRT) hem hidrojen hem de metan üretimi üzerindeki etkileri optimize edilmiştir. Hidrojen üretimi için 0,5 günlük HRT de en yüksek biyogaz ve hidrojen üretimi değerleri elde edilmiştir (5,69 ve 2,14 L/L_R gün). Metan üretimi için 24 ve 16 günlük HRT değerlerinde süreç kararlılığı gözlemlenmiştir. 12 günlük HRT değerinde ise, uçucu organik asitleri (UOA) birikimi ile birlikte metan veriminde düşüş gözlemlenmiştir.

Mockaitis vd. (2006), peynir altı suyu arıtımı için anaerobik karıştırılmalı ardışık kesikli reaktör (ASBR) sistemini incelemiş, organik yükleme ve eklenen alkalinitenin etkilerine odaklanmıştır. Çalışma, minimum alkalinite eklenmesi ile kararlı reaktör operasyonu için koşullar belirlemiştir. Çalışmada farklı organik yüklemeler ve alkalinite eklemeleri ile metan üretiminde değişiklikler gözlemlenmiştir.

Rico vd. (2015), bir tek aşamalı yukarı akışlı anaerobik çamur yatağı (UASB) reaktörünün, çiftlik gübresinin sıvı fraksiyonu ile karıştırılmış ve artan peynir altı suyu içeriğine sahip bir atıksu arıtımı üzerine performansını incelemiştir. Sabit bir HRT'de çalışılan bu sistemde, peynir altı suyu içeriğindeki artışın, organik yükleme hızlarını (OLR) ve biyolojik bozunabilirliği artırdığı gözlemlenmiştir. %85 peynir altı suyu içeren beslemede, $45,4 \pm 3,7$ g/L KOİ değerine ulaşılmıştır. Sistem, 2,2 günlük HRT'de karışım beslemede %75 PAS ile kararlı bir çalışma göstermiştir. 1,3 günlük HRT'de besleme karışımında %60 PAS ile 28,7 kg KOİ/m³.d maksimum OLR'ye ulaşılmış olup, %95,1 KOİ giderimi ve 9,5 m³ CH₄/m³.d metan üretim oranı sağlanmıştır. Önerilen bu yeni yüksek yüklü birlikte parçalanma yönteminin, peynir üretim fabrikalarının ve yoğun hayvancılığın kirletici atıkları için çevresel bir çözüm olabileceği vurgulanmıştır.

Dereli vd. (2015), peynir altı suyunu model substrat olarak kullanarak, substrat asitleşmesi ve asidojenik biyokütlenin çamur filtrelenebilirliği üzerindeki etkisine odaklanmıştır. Çalışmada anaerobik sindirim sırasında çamur filtrelenebilirliğini etkileyen parametreler analiz edilmiştir. Bu parametreler arasında katı madde içeriği, besleme/biyokütle oranı gibi etkenler yer almıştır. Çalışmada 290-310 mL CH₄/gKOİ_{giderilen} metan verimi elde edilmiştir.

Gannoun vd. (2008), yukarı akışlı anaerobik filtrede anaerobik parçalanma öncesinde peynir altı suyunun ekolojik arıtımını incelemiştir. Çalışmada *L. paracasei* ile asitleştirme ve kireç eklenerek pıhtılaştırma yöntemi kullanılmıştır ve bu yöntemle KOİ ve toplam askıda katı madde (TAKM) giderimi sağlanmıştır. Çalışmada %80-90 KOİ giderimlerine ulaşılmıştır. İki gün bekletme süresinde ise 280 L/kg KOİ metan verimi elde edilmiştir.

Saddoud vd. (2007), peynir altı suyu arıtımı için faz ayırımına sahip bir anaerobik membran reaktörün arıtımını incelemiştir. Çalışmada, membran reaktörünün yüksek verimlilikle çalıştığı ve peynir altı suyu gibi yüksek organik yüklü atıksuların arıtımında potansiyel taşıdığı belirtilmiştir. Metanojenik reaktöre, 4 günlük bir HRT'ye karşılık gelen 19,78 g KOİ/L.gün'e kadar organik yükleme yapılmıştır. Bu aşamada %79 KOİ ve %83 BOİ₅ giderimi elde edilmiştir. İki fazlı anaerobik parçalanma sürecinde ortalama KOİ, BOİ₅ ve TAKM giderimleri sırasıyla %98,5, %99 ve %100 olmuştur. 4 gün HRT'de

günlük biyogaz üretimi reaktör hacminin 10 katını aşmıştır ve 300 L/kg KOİ metan verimi elde edilmiştir. Üretilen biyogaz %70'in üzerinde metan içeriğine sahiptir.

McHugh vd. (2006), süt endüstrisi atıksularının psikrofilik (düşük sıcaklık) ve mezofilik ortamlardaki anaerobik parçalanma performansını karşılaştırmıştır. Düşük sıcaklıklarda enerji tüketiminin azaltım potansiyeli olduğu belirtilmiştir. 14°C'de 13,3 kg KOİ/m³.gün yükleme oranında %95'in üzerinde KOİ giderim verimi elde edilmiştir.

Ramos vd. (2020), genişletilmiş granüler çamur yataklı (EGSB) bir reaktörde değişen bekletme sürelerinin peynir altı suyundan sürekli hidrojen ve metan üretimi üzerindeki etkisini araştırmış ve hidrolik bekletme süresinin (HRT) performans ve mikrobiyal topluluk kompozisyonu üzerindeki etkilerini incelemiştir. 2 saatlik HRT'de 392 ± 75 mL CH₄/gün.L reaktör metan üretim oranı elde edilmiştir.

2.3. Tez Çalışmasının Amacı ve Özgünlüğü

PAS, farklı bileşikler (protein, yağ, laktoz, mineral elementler) açısından değerli bir kaynaktır ve laktik asit, tek hücre proteini, ekmek mayası, başlangıç kültürü, fermente PAS içecekleri, enzimler, antibiyotikler, organik asitler, vitaminler, katkı maddeleri gibi çeşitli ürünlerin üretiminde kullanılmaktadır. PAS içerisindeki yüksek laktoz ve protein nedeniyle katma değere sahip bir atık olduğundan endüstriyel olarak PAS'tan laktoz üretimi gerçekleştirilmektedir. Bununla birlikte, PAS veya PAS ürünlerinin geri kazanımının yeni atık akımlarının oluşumuna neden olduğu dikkate alınması gereken bir konudur. PAS'tan laktoz ve protein üretim prosesi sonucunda delaktoz adı verilen atık akımı oluşmaktadır. Delaktoz yüksek miktarda laktoz, tuz ve düşük miktarda protein ve yağ içeren organik bir sıvıdır. Delaktoz protein, organik asit ve vitaminlere ek olarak süzüntüden yaklaşık 3 kat daha fazla mineral içermektedir. Peynir yapımında kullanılan 1 kg süt başına tipik olarak 0,5 kg delaktoz üretilmektedir. Her PAS işleme tesisinin, laktoz saflaştırma proseslerine bağlı olarak farklı laktoz kazanım verimi vardır ve proses verimi, delaktoz içerisindeki laktoz ve mineral kompozisyonunda değişikliklere sebep olmaktadır. Genel olarak delaktoz için bir standart veya tanımlanmış bir kompozisyon olmamasına rağmen delaktoz; laktoz kaynaklı yüksek şeker (%40-70), düşük protein (%1-3), yüksek mineral (%9-20) içeriğiyle tanımlanabilmektedir (Çakmak, 2021).

Delaktoz, PAS'tan daha az miktarda oluşmasına rağmen, kirlilik yükü PAS'tan oldukça yüksektir. Delaktoz, çok yüksek organik kirlilik içerdiğinden arıtılmadan alıcı ortama deşarj edilmesi alıcı su ortamlarında önemli derecede kirlilik yaratma potansiyeline sahiptir ve arıtılmadan deşarj edilmesi yasaktır. Delaktozun yüksek organik içeriği nedeniyle bertarafı çevresel sorun yaratmakta ve üreticiler için ekonomik bir yük olarak görülmektedir. Hayvan yemi veya gübre olarak kullanılan değersiz bir ürün olarak kabul edilmektedir.

Yapılan literatür taramasında delaktozun anaerobik arıtımı konusunda tek bir çalışma bulunmuştur. Bu çalışmada, delaktoz mezofilik koşullarda tam karışimli yarı sürekli beslemeli anaerobik reaktör sistemi (s-CSTR) ve anaerobik membran biyoreaktörde (AnMBR) arıtılmış ve metan üretim potansiyeli karşılaştırılmıştır. AnMBR sistemi 1,6, 3,4, 4,3 ve 6,8 kg/m³gün olmak üzere dört farklı OLR'de, sabit proses parametrelerinde (HRT 3 gün, akı 5 LMH ve SRT ∞) toplam 169 gün süresince

alıştırılmıştır. Metan verimi sırasıyla 299,4, 174,9, 305,2 ve 258,8 mLCH₄/KOİ_{giderilen} olarak elde edilmiştir (akmak, 2021).

Bu çalışmanın amacı peynir üretiminde oluşan PAS'tan laktoz üretimi sonucunda kalan, yüksek organik kirlilik içeren ve delaktoz olarak isimlendirilen atıksuyun yukarı akışlı çamur yataklı anaerobik reaktör (UASB) prosesinde farklı organik madde yükleme hızlarında arıtılması ve optimum proses koşullarının belirlenmesi ile prosesin arıtma ve metan üretim performansının incelenmesidir.

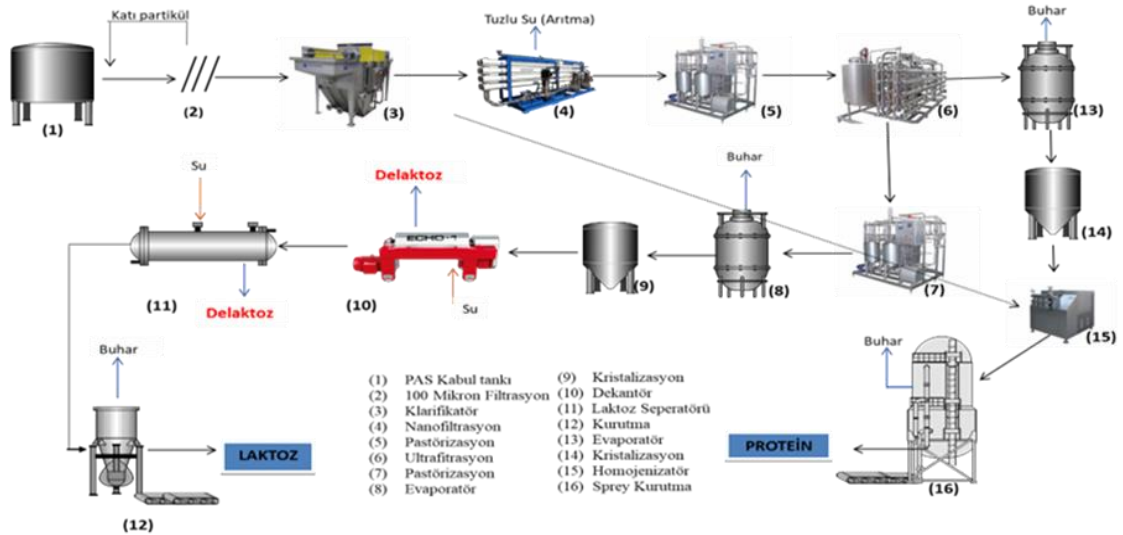
Yapılan literatür taramasında delaktozun anaerobik arıtımı konusunda sadece bir çalışmaya rastlanması bu alanda çalışmaların yapılması ihtiyacını ortaya koymaktadır. Yapılan çalışmanın sonuçlarının delaktoz üreticisi olan saha uygulayıcıları için katma değeri yaratma potansiyeli yüksektir.



3. MATERYAL VE METOT

3.1. Delaktozun Temini

Tez çalışması kapsamında kullanılan delaktoz Tekirdağ'da bulunan Malkara Birlik Süt ve Süt Mamülleri A.Ş. (MAYBİ)'den temin edilmiştir. Numunelerin çalışmanın yapıldığı Akdeniz Üniversitesi'ne transferi soğuk zincir ile yapılmıştır. Çalışma süresince delaktozun karakterizasyonunda bir değişim yaşanmaması için numuneler kullanım öncesine kadar -20°C'de muhafaza edilmiştir. Kullanım öncesi oda sıcaklığına getirilerek gerekli analizler yapılmıştır. Şekil 3.1'de MAYBİ fabrikasında PAS'tan laktoz ve protein tozu üretimi süreci gösterilmektedir. PAS'ın işlenmesi aşamasında laktoz ve protein olarak iki ana ürün elde edilmektedir. İlk olarak tesise gelen PAS tanklara alınmakta ve uygunluğuna bakılmaktadır. Üretim uygunluğuna sahip PAS 100 mikronluk filtrede katı partiküllerinden arındırılır. Ardından klarifikatöre gelen ürün membran filtrasyon ve komojenizatör olmak üzere iki akıma ayrılır. Nanofiltrasyon sonrası katı madde yoğun atık akımı pastörizasyona giderken yüksek tuzluluk içeren süzöntü de arıtmaya gönderilir. Pastörizasyon sonrası ultrafiltrasyon işlemi ile laktoz ve protein akımları ayrılmaktadır. Protein akımı sırasıyla evaporasyon, kristalizasyon, homojenizasyon ve sprey kurutma işlemlerine tabi tutulur ve protein üretimi gerçekleşir. Laktoz akımı ise pastörizasyona tabi tutulur. Pastörizasyon sonrası sırasıyla evaporasyon ve kristalizasyon işlemleri uygulanır. Kristalizasyon sonrası ürün akımının sırasıyla dekantör ve laktoz separatöründe katı madde konsantrasyonu artırılır. Son olarak kurutma işlemi sonrası yüksek saflıkta laktoz ürünü elde edilir. Üretim aşamasında dekantörde reddedilen atık akımı ise delaktoz olarak isimlendirilmektedir.



Şekil 3.1. PAS'tan protein tozu ve laktoz üretimi sırasında oluşan atık akımının (delaktoz) proses akış diyagramı

3.2. Delaktoz Karakterizasyonu

Çalışma kapsamında ilk olarak delaktozun kapsamlı karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamında, toplam katı madde (TKM) ve uçucu katı madde (UKM), toplam kimyasal oksijen ihtiyacı (tKOİ), çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı (çKOİ), toplam Kjeldahl azotu (TKN), toplam fosfat (TP), alkalinite (ALK), pH, yağ, protein ve şeker analizleri yapılmıştır. Karakterizasyon analizleri Akdeniz Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü'nde Çevre Biyoteknolojisi ekibi tarafından ortak olarak yapılmıştır. Delaktoz içeriğindeki metal iyonlarının analizi hizmet alımı yoluyla Orta Doğu Teknik Üniversitesi, AR-GE Eğitim ve Ölçme Merkezi laboratuvarınca yapılmıştır. Delaktoz karakterizasyonu Çizelge 3.1'de verilmektedir.

Çizelge 3.1. Delaktoz karakterizasyonu

Parametre	Kısaltma / Sembol	Birim	Sonuç
pH			5,12±0,12
Toplam Katı Madde	TKM	g/kg	225,15±0,52
Uçucu Katı Madde	UKM	g/kg	176,02±0,60
Kül	-	g/kg	49,1±0,27
Laktoz	-	%(w/w)	14,28
Protein	-	%(w/w)	0,026
Yağ	-	mg/L	T.E.
Toplam Kimyasal Oksijen İhtiyacı	tKOİ	g/L	235±3,4
Çözünmüş Kimyasal Oksijen İhtiyacı	çKOİ	mg/L	213±1,1
Toplam Fosfat	TP	mgPO4-2-P/L	4190±28
Toplam Kjeldahl Azotu	TKN	mgTKN-N/L	3332±39,6
Alkalinite	ALK	mgCaCO3/L	7520±23
Kalsiyum	Ca	%(g/g Numune)	0,15±0,01
Fosfor	P	%(g/g Numune)	0,24±0,02
Potasyum	K	%(g/g Numune)	0,84±0,03
Sodyum	Na	%(g/g Numune)	0,52±0,02
Silika	Si	%(g/g Numune)	T.E.
Alüminyum	Al	%(g/g Numune)	T.E.
Demir	Fe	%(g/g Numune)	T.E.
Magnezyum	Mg	mg/kg Numune	520±10
Krom	Cr	mg/kg Numune	T.E.
Mangan	Mn	mg/kg Numune	T.E.
Kobalt	Co	mg/kg Numune	T.E.
Nikel	Ni	mg/kg Numune	T.E.
Bakır	Cu	mg/kg Numune	T.E.
Çinko	Zn	mg/kg Numune	T.E.
Arsenik	As	mg/kg Numune	T.E.
Gümüş	Ag	mg/kg Numune	T.E.
Kadmiyum	Cd	mg/kg Numune	T.E.
Kalay	Sn	mg/kg Numune	T.E.
Civa	Hg	mg/kg Numune	T.E.
Kurşun	Pb	mg/kg Numune	T.E.

3.2.1. Toplam katı madde (TKM) ve uçucu katı madde (UKM) analizleri

Toplam katı madde (TKM) analizleri ve uçucu katı madde (UKM) analizleri Standart Metot 2540-C prosedürüne göre yapılmıştır. Numune 105°C’de etüvde 24 saat

tutularak su içeriği uzaklaştırılmıştır. Ardından 550°C’de 2 saat kül fırınında tutularak organik içeriği belirlenmiştir (APHA, 2005).

3.2.2. Toplam Kjeldahl azotu (TKN) analizi

Toplam Kjeldahl azotu, numune içerisindeki organik azot ve amonyak azotunun toplamını ifade etmektedir. TKN analizi “BUCHI 191/2015 nolu Su ve Atıksularda TKN Tespiti” isimli uygulama prosedürü takip edilerek yapılmıştır. Prosedüre göre 25 ml numune hacmi kullanılmıştır. İlk olarak BUCHI Digest Automat K-438 parçalama ünitesi kullanılarak numune içerisindeki organik azotun amonyağa parçalanması sağlanmıştır. İkinci aşamada BUCHI Auto Kjeldahl Unit K-379 distilasyon ünitesi ile amonyak distilasyonu gerçekleştirilmiştir. Son olarak ise distilat titrasyona tabi tutulmuştur. Titrasyon çözeltisi olarak 0,01 mol/L H₂SO₄ çözeltisi kullanılmıştır. Titrasyon yeşil renkten titrasyon dönüm noktasını olan mor renk elde edilene kadar sürdürülmüş ve sarfiyattan TKN içeriği hesaplanmıştır.

3.2.3. Toplam kimyasal oksijen ihtiyacı (tKOİ) analizi

tKOİ analizleri Standart Metot 5220-B’ye göre yapılmıştır. Kullanılan metot 100-700 mgKOİ/L konsantrasyonları için uygundur. Bu nedenle numune analiz öncesinde seyreltilmiştir. 20 ml numuneye sırasıyla 10 ml 0,25N K₂Cr₂O₇ çözeltisi, 0,4 g HgSO₄, 0,4 g Ag₂SO₄ ve 40 ml derişik H₂SO₄ eklenmiştir. Metotda yüksek miktarda H₂SO₄ ilavesi ile reaksiyon süresi 2 saatten 15 dakikaya indirilmiştir (Çakmak, 2021). Reaksiyon sonrası soğutulan numune 200 mL saf su ilave edilerek titrasyona tabi tutulmuştur. 3-4 damla ferroin indikatörü ilave edilerek 0,25 N Fe(NH₄)₂(SO₄)₂ çözeltisi ile titre edilmiştir (APHA, 2005).

3.2.4. Çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı (çKOİ) analizi

Numune 13000 rpm’de 10 dk santrifüjlendikten sonra üst faz analiz edilmiştir. Analiz Hach- Lange hazır test kitleri kullanılarak yapılmıştır. Analizde Lange LT200 marka ısıtıcı blok kullanılmıştır. Reaksiyon sonrası oda sıcaklığına getirilen numunenin çKOİ (mg/L) değeri Hach- Lange DR5000 spektrofotometre kullanılarak belirlenmiştir.

3.2.5. Toplam fosfat (TP) analizi

Numune 2000 rpm’de 60 saniye santrifüjlendikten sonra üst faz analiz edilmiştir. Analizler Hach-Dr. Lange hazır test kitleri kullanılarak yapılmıştır. Analizde Lange LT200 marka ısıtıcı blok kullanılmıştır. Reaksiyon sonrası oda sıcaklığına getirilen numunenin TP (mg/L) değeri Hach- Lange DR5000 spektrofotometre kullanılarak belirlenmiştir.

3.2.6. Alkalinite (ALK) analizi

Alkalinite analizi, Standart Metot 2320-B'ye göre yapılmıştır. Numune 4000 rpm'de santrifüjlendikten sonra 50 ml üst faz 0,1N H₂SO₄ ile pH 4,5 dönüm noktasına kadar titre edilmiştir. Alkalinite değeri CaCO₃ cinsinden hesaplanmıştır (APHA, 2005).

3.2.7. pH analizi

pH analizi, WTW inoLab Multi 9310 model pH metre kullanılarak yapılmıştır.

3.2.8. Ekstrakte olabilen madde ve yağ analizi

Ekstrakte olabilen madde ve yağ analizinde soxhlet metodu kullanılmıştır. Numune petrolü eter ekstraksiyonuna tabi tutulmuştur. Ekstraksiyon sonrası 70-80°C sıcaklıkta Heidolph 4000 rotary evaporatör cihazı kullanılarak petrolü eter ortamdan uzaklaştırılmıştır. Evapore edilen numuneler 105°C'de 24 saat etüvde tutularak kurutulmuş ve yağ içeriği tespit edilmiştir (Bridoux vd. 1994).

3.2.9. Protein analizi

Numune içerisindeki toplam ve çözünmüş protein konsantrasyonu analizi Lowry metoduna göre yapılmıştır (Lowry vd. 1951). Numune 2 saat süresince karanlık ortamda tuz ve folin çözeltilisi reaksiyonuna tabi tutulmuştur. Reaksiyon sonrası numunenin absorbansı daha önce kalibrasyon metodu oluşturulmuş spektrofotometre kullanılarak 750 nm'de tespit edilmiştir.

3.3. Anaerobik Aşı Çamurunun Temini

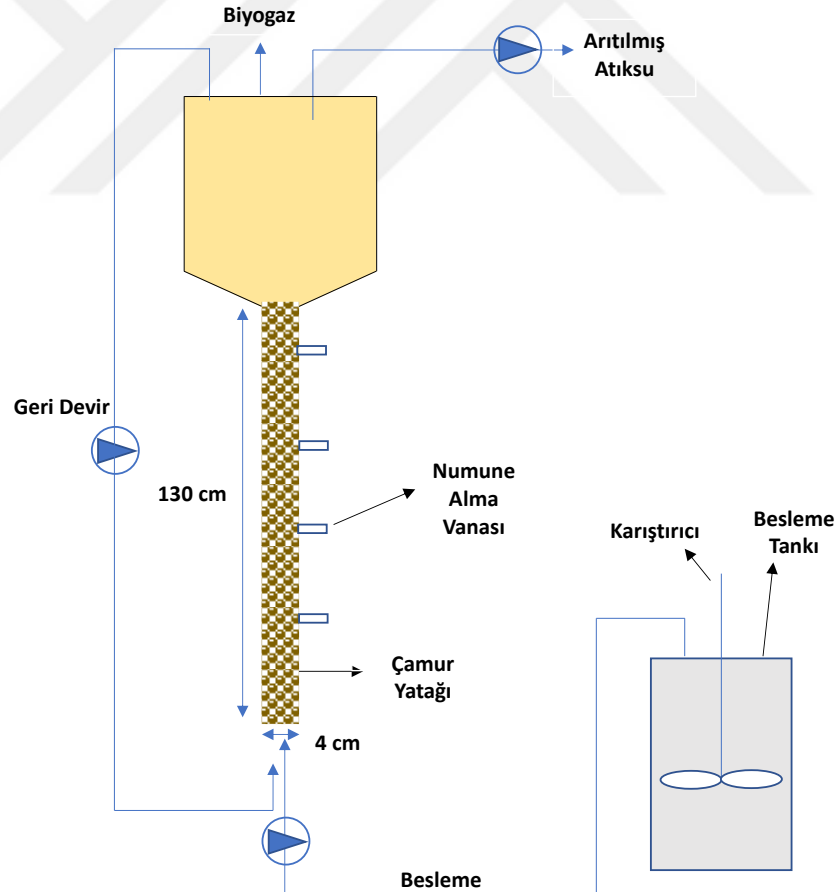
Anaerobik sistemlerde uygun aşı çamurunun kullanımı sistemin verimi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle aşı çamurunun arıtılacak atıksu ile benzer karakterdeki atıksuların beslendiği bir tesisten temin edilmesi sistemin devreye alma süresini önemli ölçüde azaltmakta ve efektifliğini artırmaktadır. Bu doğrultuda çalışma kapsamında kullanılacak anaerobik aşı çamuru Burdur Şeker Fabrikası'na ait atıksu arıtma tesisindeki anaerobik çürütücüden temin edilmiştir.

3.4. Yukarı Akışlı Anaerobik Çamur Yatağı (UASB) Reaktör Sistemi ve İşletme Koşulları

Çalışma kapsamında delaktozun arıtımı ve metan üretimi amacıyla kullanılan UASB sistemi Şekil 3.2'de verilmektedir. Sistem plexiglass malzemeden imal edilmiştir. UASB sistemi toplamda 9 litre aktif hacme sahiptir. UASB sisteminin çamur yatağının mevcut olduğu alt bölmesi 4 cm genişliğinde ve 130 cm uzunluğundadır. Sistemde delaktozun sisteme beslenmesi ve arıtılmış atıksuyun sistemden uzaklaştırılması amacıyla iki adet peristatik pompa (Longer BT101, Çin) kullanılmaktadır. Besleme atıksuyu içeriğindeki katı maddelerin çökmesini engellemek ve homojen bir atıksu beslemesi sağlamak amacıyla tankın alt kısmından manyetik olarak karışma tabi

tutulmuştur. Reaktör içerisinde sirkülasyonun sağlanması amacıyla peristaltik pompa (Longer BT101, Çin) kullanılmıştır. Üst kısımdan alınan atıksu en alt kısımdan tekrar sisteme verilmiştir. Çamur yatağındaki akış hızı 1-1,5 m/saat olacak şekilde ayarlanmıştır. Sistemde oluşan biyogaz üst kısımda bulunan port vasıtasıyla ilk olarak gaz debimetreden geçerek gaz miktarı tespit edilmiş, ardından gaz toplama torbasında biriktirilmiştir. Oluşan biyogaz miktarının ölçülebilmesi amacıyla 1000 mL/saat kapasiteli Bioprocess marka gaz debimetresi kullanılmıştır. Gaz toplama torbasında biriken biyogazın aralıklarla gaz kompozisyonu belirlenmiştir.

Delaktozun anaerobik arıtımı için UASB sistemi sırasıyla 1, 2, 3 ve 4 kgKOİ/m³ (OLR 1, OLR 2, OLR 3, OLR 4) olmak üzere 4 farklı organik yükleme hızında (OLR) işletilmiştir. Toplam işletme süresi 143 gündür. UASB sistemi OLR 1, OLR 2, OLR 3 ve OLR 4'te sırasıyla 14, 42, 68 ve 9 gün işletilmiştir. OLR 4'te 143. günde sistemde oluşan arıza nedeniyle çalışma sonlandırılmıştır. Çalışma süresince hidrolik bekletme süresi 3 günde sabit tutulmuş olup artan OLR oranı sisteme beslenen delaktoz konsantrasyonunun artırılması ile sağlanmıştır. Sistem ortam sıcaklığında işletilmiş olup herhangi bir ısıtma uygulanmamıştır.



Şekil 3.2. UASB reaktör sistemi ve bileşenleri



Şekil 3.3. UASB sisteminin boş görünümü

3.4.1. UASB sisteminin izlenmesinde ve değerlendirilmesinde kullanılan parametreler

UASB sisteminin delaktoz arıtma performansının belirlenmesi amacıyla TKM, UKM, pH, alkalinite, uçucu organik asit, tKOİ, toplam üretilen biyogaz miktarı ve biyogaz kompozisyonu tespit edilmiştir.

3.4.1.1. Toplam katı madde (TKM) ve uçucu katı madde (UKM) analizi

Toplam katı madde (TKM) ve uçucu katı madde (UKM) analizleri, Standart Metot 2540-C'deki prensibe göre yapılmıştır. TKM darası alınmış krozedeki belirli miktarda numunenin 105°C'deki etüvde 24 saat tutulması sonrasında nem muhtevasının uzaklaştırılması sonrası sabit tartımdaki ağırlık kaybı ile tespit edilmiştir. UKM ise TKM analizi sonrası numunenin 2 saat süresince 550°C'de kül fırınında tutulması sonrasında

organik maddenin uzaklaştırılması sonrası sabir tartımdaki ağırlık kaybı ile tespit edilmiştir (APHA, 2005).

3.4.1.2. Toplam Kimyasal Oksijen İhtiyacı (tKOİ)

UASB besleme ve çıkış suyundaki tKOİ analizleri Hach-Dr. Lange hazır KOİ test kitleri kullanılarak yapılmıştır. Numuneler Lange LT200 marka ısıtıcı blok kullanılarak 148°C'de 2 saat reaksiyona tabi tutulmuştur. Reaksiyon sonrasında oda sıcaklığına gelen kitler 605 nm dalga boyunda Hach-Lange DR5000 spektrofotometre ile ölçülmüştür. Besleme akımına uygulanan tKOİ analizinde çıkış suyundan farklı olarak reaksiyon öncesi numune 2000 rpm'de 60 sn süresince vortekslenerek homojenize edilmiştir.



Şekil 3.4. Lange LT200 ısıtıcı blok ile KOİ analizi

3.4.1.3. UOA ve alkalinite analizleri

Uçucu organik asit (UOA) ve alkalinite değerleri, anaerobik sistemlerde oluşabilecek problemleri belirlemede önemli indikatör parametrelerdir. Anaerobik parçalanma sürecinde, UOA/alkalinite oranının 0,1'in altında olması hedeflenir. Bu oranın artması, sistemde metanojenesis veriminde yetersizlik ve asit birikimi olduğunu gösterebilir. Bu nedenle, UOA ve alkalinite analizlerinin düzenli olarak yapılması gerekmektedir.

Çalışma kapsamında, alkalinite analizi Standart Metot 2320-B'ye göre titrasyon yöntemiyle, UOA analizi ise Standart Metot 5560-C'ye göre distilasyon ve titrasyon yöntemleriyle belirlenmiştir. UOA sonuçları genellikle asetik asit cinsinden ifade edilir. Bu analiz yöntemi genellikle kontrol amaçlı kullanılır çünkü ampirik bir yöntemdir ve katı içerik, ısıtma hızı ve nihai distilat hacmi gibi parametreler geri kazanımı etkileyebilir. Bu nedenle, geri kazanım faktörünün hesaplanması önemlidir (APHA, 2005).



Şekil 3.5. UOA analizinde kullanılan distilasyon düzeneği

3.4.1.4. Biyogaz miktarı ve kompozisyonu

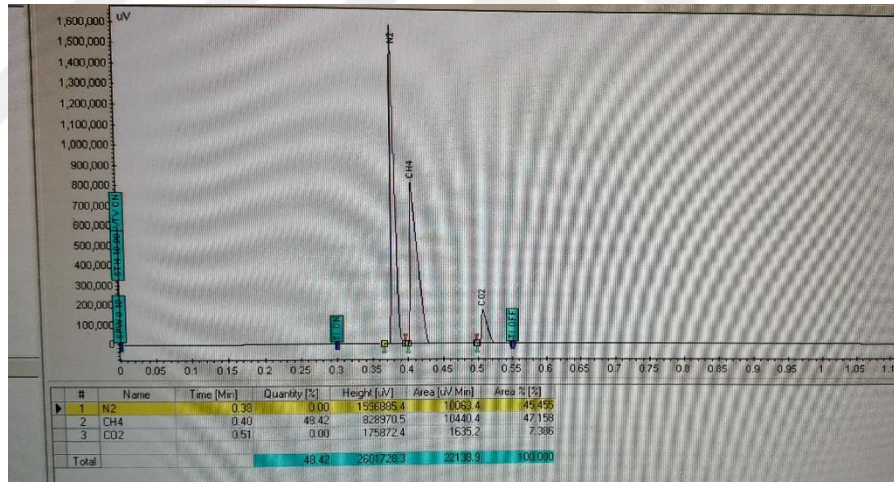
UASB sisteminde üretilen biyogazın miktarı Bioprocess marka gaz debimetre kullanılarak belirlenmiştir. Gaz debimetre sonrasında yerleştirilen gaz torbası içerisinde biriktirilen biyogazın içerisindeki metan (CH_4), karbondioksit (CO_2) ve azot (N_2) gazlarının kompozisyonu Varian CP-4900 Mikro gaz kromatografisi (GC) cihazı ile tespit edilmiştir. Kullanılan gaz kromatografisi cihazı, mobil bir cihazdır. Gaz kompozisyonu termal iletkenlik dedektörü (online-TCD) ile PPQ kolon kullanılarak belirlenmektedir. Kullanılan analiz metodunda enjektör ve kolon sıcaklıkları sırasıyla 110°C ve 70°C 'dir. Taşıyıcı gaz olarak helyum (25 mL/dk) kullanılmaktadır. Gaz kromatografisi cihazı ile ölçülen biyogaz kompozisyonuna örnek bir kromatogram Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.6. Biyogaz miktarının ölçümünde kullanılan gaz debimetre



Şekil 3.7. Gaz kromatografi cihazı



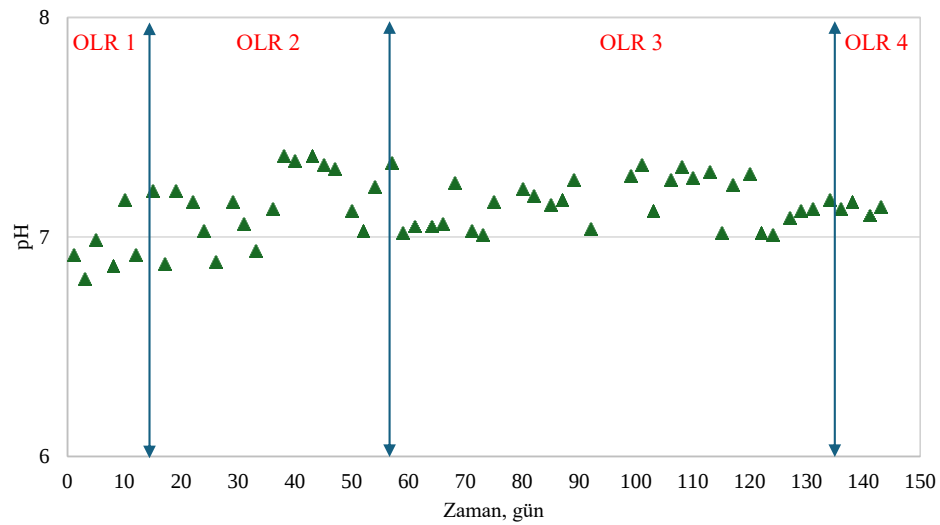
Şekil 3.8. Gaz kromatografi analizi sonucu elde edilen kromatogram örneği

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Delaktozun anaerobik arıtımı için UASB sistemi sırasıyla 1, 2, 3 ve 4 kgKOİ/m³ (OLR 1, OLR 2, OLR 3, OLR 4) olmak üzere 4 farklı organik yükleme hızında (OLR) işletilmiştir. Toplam işletme süresi 143 gündür. UASB sistemi OLR 1, OLR 2, OLR 3 ve OLR 4'te sırasıyla 14, 42, 68 ve 9 gün işletilmiştir. UASB sisteminin delaktoz arıtma performansının belirlenmesi amacıyla TKM, UKM, pH, alkalinite, uçucu organik asit, tKOİ, toplam üretilen biyogaz miktarı ve biyogaz kompozisyonu periyodik olarak belirlenmiştir.

4.1. pH

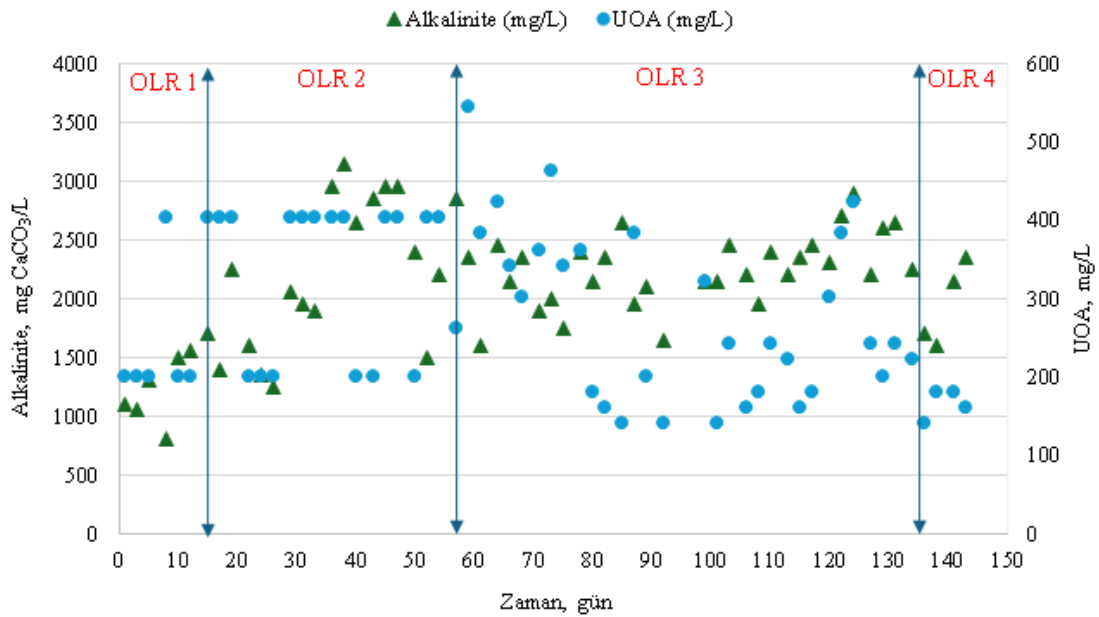
pH anaerobik sistemlerin sağlıklı bir şekilde çalıştığını gösteren önemli bir parametredir. Sistemde olası inhibisyon hakkında öngörü sağlamaktadır. UASB sisteminde sürekli pH izlenmesi ile sistemde UOA birikimine bağlı olarak gerçekleşebilecek inhibisyon koşullarını engellemek mümkündür. Metanojenler nötr pH değerlerinde aktif olmaktadır ve pH 6,8'in altına düştüğünde gerçekleşen inhibisyona bağlı olarak aktiviteleri azalmaktadır. Toksikite veya fazla organik yükleme gibi durumlarda sistemde asit birikimi gerçekleşebilmekte ve pH değeri hızlı bir şekilde düşebilmektedir. Bu sebeple sistemde düzenli olarak pH ölçülmüştür (Şekil 4.1). Sistemin OLR 1'de pH değerinin 6,81 ile 7,17 aralığında değiştiği ve ortalama pH değerinin 6,95 olduğu görülmektedir. OLR 2 koşullarında ise pH 6,88 – 7,37 aralığında ölçülmüştür, ortalama pH 7,15 olmuştur. Yükleme oranının artırılmasına bağlı olarak OLR 3 işletme koşullarında pH 7,01 - 7,34 aralığında değişmiş ve ortalama 7,16 hesaplanmıştır. Son olarak OLR 4 koşullarında pH değişimi 7,1 – 7,12 aralığında değişim göstermiş olup ortalama pH 7,13 olarak hesaplanmıştır. OLR 1 işletme şartlarında pH 7'nin altında iken OLR 2 ve OLR 3 koşullarında yükleme oranlarının artması ile pH da artmıştır. Ancak OLR 4 koşullarında pH'da ufak bir düşüş gözlenmiştir. Bu çalışmada, 143 gün süren işletim süresince ortam pH'ının ayarlamasına ihtiyaç duyulmamış ve proses stabil bir pH aralığında tutulabilmektedir.



Şekil 4.1. UASB sisteminde ölçülen pH değerlerinin zamanla değişimi

4.2. Alkalinite ve UOA

Anaerobik sistemlerde organik birleşiklerin fermentasyonu sonucu UOA ortaya çıkmaktadır. Oluşan uçucu organik asitlerin reaktörde birikimini takip etmek amacıyla sistemde sürekli UOA ve alkalinite parametrelerinin ölçümü yapılmıştır. Sistemdeki UOA ve alkalinitenin zamana bağlı değişimi Şekil 4.2’de verilmiştir. OLR 1 işletme periyodunda alkalinite 800 – 1550 mg CaCO₃/L, UOA konsantrasyonunun ise 201,3 – 402,7 mg/L seviyelerinde olduğu görülmüştür. Ortalama alkalinite ve UOA değerleri sırasıyla 1217 mg CaCO₃/L ve 234,9 mg/L olarak hesaplanmıştır. Devamında OLR 2 işletme periyodunda alkalinite 1250 – 3150 mg CaCO₃/L, UOA konsantrasyonunun ise 201,3 – 402,7 mg/L seviyelerinde olduğu görülmüştür. Ortalama alkalinite ve UOA değerleri sırasıyla 2169,4 mg CaCO₃/L ve 335,57 mg/L olarak hesaplanmıştır. Alkalinite seviyeleri OLR 3 işletme periyodunda 1600 – 2900 mg CaCO₃/L aralığında değişmiştir. Ortalama alkalinite 2267,2 olarak hesaplanmıştır. UOA konsantrasyonunun 140,0 – 543,62 mg/L aralığında değiştiği görülmüştür ve ortalama 276,8 mg/L olarak hesaplanmıştır. OLR 4 koşullarına gelindiğinde alkalinite ve UOA konsantrasyonlarında düşüş gözlemlenmiştir. Bu dönemde alkalinite 1600 – 2350 mg CaCO₃/L ve UOA 140,9 – 181,21 mg/L aralıklarında değişmiştir. Ortalama değerleri ise sırasıyla 1950 mg CaCO₃/L ve 166,1 mg/L olmuştur.



Şekil 4.2. UASB sisteminde ölçülen alkalinite ve UOA değerlerinin zamanla değişimi

4.3. TKM ve UKM

UASB sisteminin tam karışımli reaktörler yerine tercih edilmesindeki en önemli nednelerden biri de reaktör içerisinde biyokütle tutulumunun sağlanabilmesidir. Anaerobik sistemlerde biyokütle büyümesinin az oluşu, biyokütlenin sistemde tutulmasının gerekliliğini önemli kılmaktadır. UASB sistemi sonsuz çamur yaşında işletilmiştir. İşletme boyunca sadece analiz için gerekli numune alımından kaynaklı

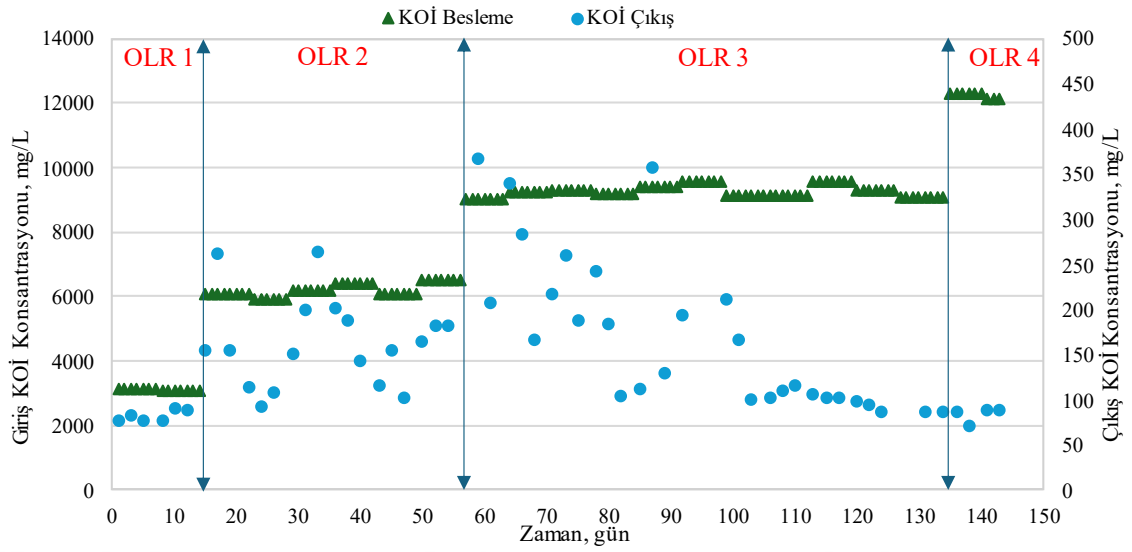
biyokütle çekimi yapılmıştır. UASB sisteminde ölçülen TKM ve UKM değerleri Çizelge 4.1 verilmektedir. Zaman içerisinde reaktör içerisindeki TKM ve UKM değerleri %20 civarında artıp azalırken, UKM/TKM oranında %100'e yakın bir artış gözlenmiştir. Bunun sebebinin zaman içerisinde sistemde bulunan inert katıların numune alımı nedeniyle azalması ve biyokütle üremesi olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 4.1. UASB sisteminde ölçülen TKM ve UKM değerlerinin zamanla değişimi

Gün	TKM (g/kg)	UKM (g/kg)	UKM/TK M (%)
1	15,6636	3,5095	22,4054
17	14,5541	4,0188	27,6127
43	12,5674	4,0781	32,4498
61	12,0411	3,7445	31,0979
99	8,0598	3,3798	41,9334
117	12,6927	5,5157	43,4553

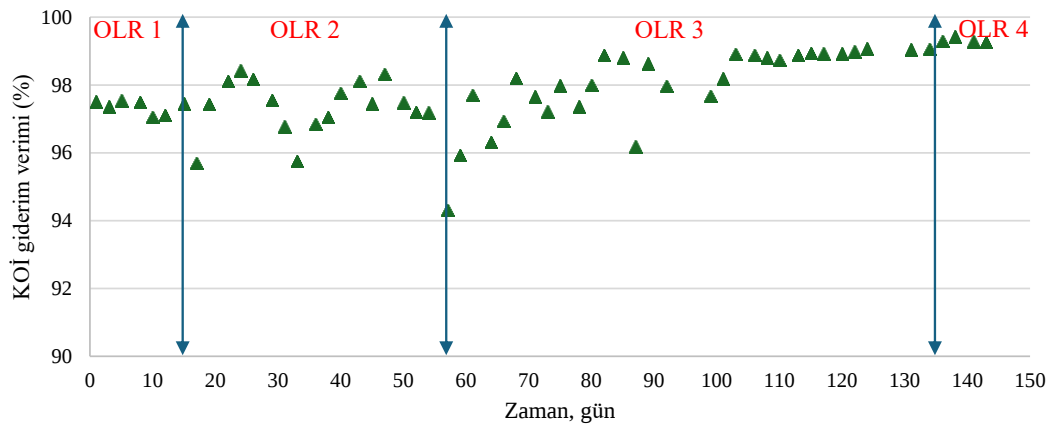
4.4. KOİ

UASB sisteminin arıtma verimini tespit etmek amacıyla düzenli olarak sistem giriş ve çıkışlarından numune alınarak KOİ analizleri yapılmıştır. Bu analizlerin sonuçları Şekil 4.3'de verilmiştir. OLR 1 işletme periyodunda sisteme beslenen atıksuyun KOİ değeri 3057 - 3112 mg/L aralığında değişmiştir ve ortalaması 3084,5 mg/L olarak hesaplanmıştır. Sistem çıkışında ise ortalama KOİ değeri 76,6 – 90,1 mg/L aralığında değişmiştir ve ortalama çıkış KOİ konsantrasyonu 81,7 mg/L olarak hesaplanmıştır. OLR 2 işletme periyodunda ise giriş KOİ değerinin 5901 – 6502 mg/L, çıkış değerinin 92,8 – 263 mg/L seviyelerine çıktığı görülmüştür. Ortalama giriş ve çıkış KOİ değerleri sırasıyla 6196,1 mg/L ve 162,9 mg/L olarak hesaplanmıştır. OLR 3 işletme döneminde giriş KOİ 9029 – 9556 mg/L aralığında, çıkış KOİ ise 85,5 – 513 mg/L aralığında değiştiği görülmüştür. Ortalama KOİ değerleri girişte ve çıkışta sırasıyla 9264,1 mg/L ve 180,8 mg/L olarak hesaplanmıştır. Son olarak OLR 4 işletme periyodunda giriş KOİ konsantrasyonu 12110 – 12284 mg/L aralığında, çıkış KOİ konsantrasyonu da 70,7 – 88,8 mg/L aralığında ölçülmüştür. Ortalama giriş KOİ konsantrasyonu 12226 mg/L olurken, ortalama çıkış KOİ konsantrasyonu da 83,2 mg/L olarak hesaplanmıştır. Organik yükleme oranlarının artışına bağlı olarak giriş KOİ konsantrasyonunun her işletme döneminde artmasına karşılık çıkış KOİ konsantrasyonlarının düştüğü görülmektedir.



Şekil 4.3. UASB sisteminde ölçülen KOİ değerlerinin zamanla değişimi

Şekil 4.4'de farklı işletme periyotlarında elde edilen KOİ giderim verimleri yer almaktadır. OLR 1 işletme döneminde sistemin KOİ giderim verimi %97,1 - %97,5 aralığında değişmektedir. OLR 2 döneminde ise organik yükleme oranının artırılması ile başlangıçta verimin %95,7 olmasına karşın ilerleyen zamanlarda sistemin aklime olması sonucunda- %98,4'a çıkmıştır. OLR 3 işletme periyodunda da yine başlangıçta KOİ giderim verimi %94,3 olmuş, sonrasında %99,1 değerine yükselmiştir. Son olarak da OLR 4 işletme periyodunda giderim verimlerinin %99,3 - %99,4 aralığında gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Tüm işletme periyotları için ortalama giderim verimleri sırasıyla %97,4; %97,4; %98,0 ve %99,3 olarak hesaplanmıştır.

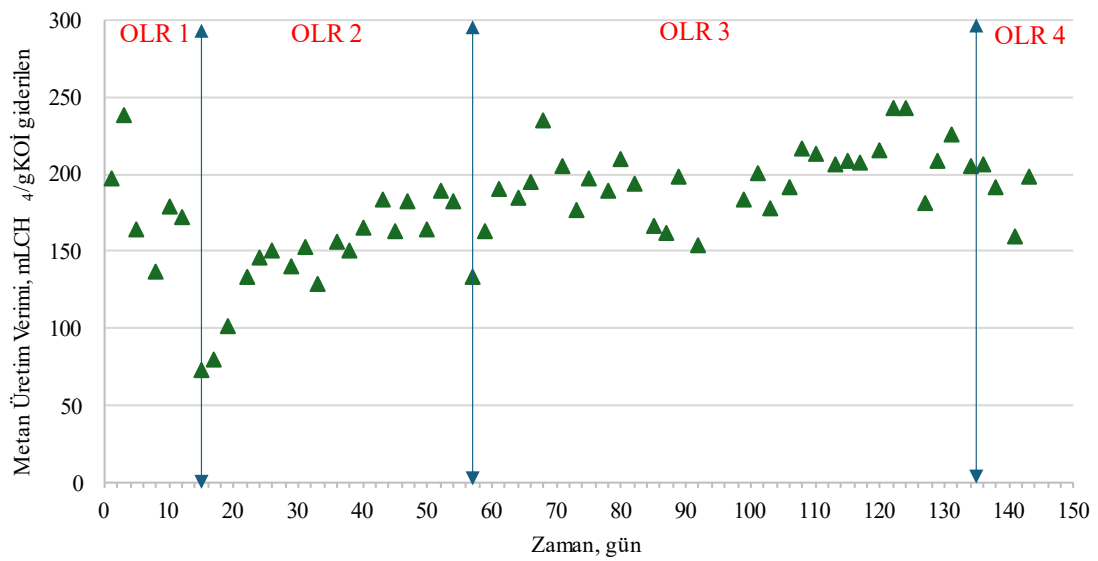


Şekil 4.4. UASB sisteminde elde edilen KOİ giderim veriminin zamanla değişimi

4.5. Metan üretimi

Anaerobik sistemlerin ekonomik açıdan uygunluğunun belirlenmesinde en önemli faktör metan üretimidir. Yüksek hızlı anaerobik sistemlerin maliyetlerinin üretilen enerji

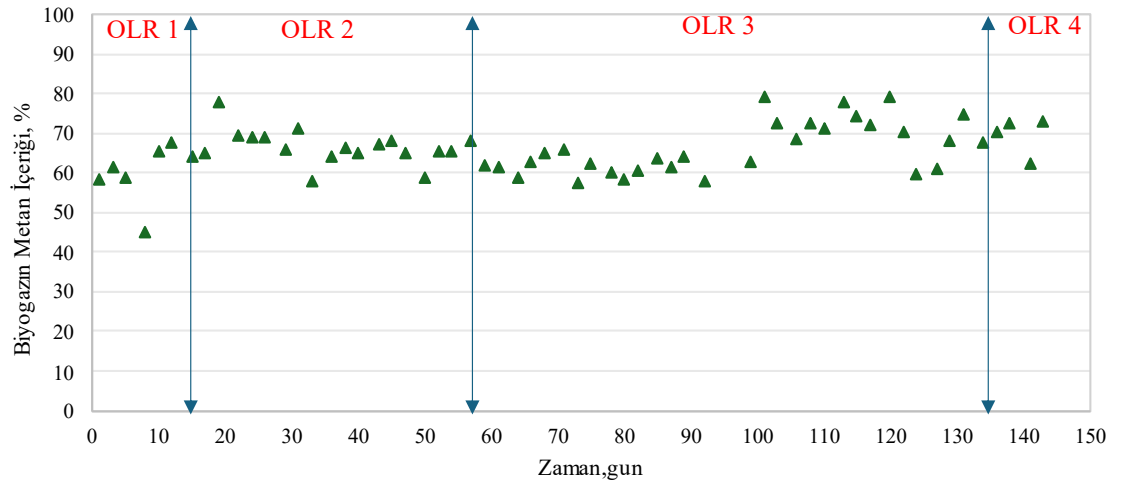
ile karşılanabilir olması önem arz etmektedir. UASB sisteminin metan üretim verimini ve ekonomik açıdan uygunluğunu ortaya koymak amacıyla oluşan biyogaz toplanarak kompozisyonu belirlenmiş ve giderilen gram KOİ başına elde edilen metan verimleri hesaplanmıştır. Sonuçlar Şekil 4.5’de verilmektedir. Düşük organik yükleme oranlarında (OLR 1) metan üretim verimi 136,6 – 181,2 mLCH₄/gKOİ giderilen aralığında gerçekleşmiştir. Ortalama metan üretimi 181,2 mLCH₄/gKOİ giderilen olarak hesaplanmıştır. OLR 2 işletme periyoduna bakıldığında ise metan üretim verimi 73,1 – 189,7 mLCH₄/gKOİ giderilen aralığında, ortalamasının da 147,0 mLCH₄/gKOİ giderilen olduğu görülmüştür. OLR 3 işletme koşullarında metan üretim verimi 133,0 – 242,8 mLCH₄/gKOİ giderilen aralığında olduğu görülmüştür, ortalaması da 196,5 mLCH₄/gKOİ giderilen olarak hesaplanmıştır. Son işletme periyodundaki verimler 160,1 – 206,0 mLCH₄/gKOİ giderilen aralığında olmuştur, ortalama değer ise 189 mLCH₄/gKOİ giderilen olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.5. UASB sisteminde elde edilen metan veriminin zamanla değişimi

Anaerobik sistemlerde oluşan biyogazın metan içeriği enerji geri kazanımı açısından önem arz etmektedir. Bu sebeple toplanan biyogazın kompozisyonuna bakılmış ve zamana bağlı değişimi Şekil 4.6’da verilmiştir.

UASB sistemin başlangıç işletme periyodunda biyogazın metan oranı %45,2 - %67,9 aralığında, OLR 2 işletme periyodunda %57,9 – %78,2 aralığında, OLR 3 işletme periyodunda %57,7 - %79,3 ve son aşamada ise %62,4 - %73,2 aralığında değiştiği görülmektedir. Her bir işletme periyodu ortalamaları sırasıyla %59,6; %66,5; %66,3 ve %69,7 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.6. UASB sisteminde elde edilen biyogazın metan içeriğinin zamanla değişimi

5. SONUÇLAR

Dünya genelinde kaynakların azalması, iklim değişikliğinin gıda ve su kaynakları üzerindeki baskısının artması ve mali kaynakların kümelenmesi gibi etkenler nüfusun belirli noktalarda yoğunlaşmasına ve bu bölgelerde yoğun endüstrileşmenin gelişmesine neden olmaktadır. Nüfusun ve endüstrileşmenin artmasına paralel olarak da bir yandan üretim faaliyetlerinin sürdürülebilirliği için gerekli enerji ihtiyacı artmakta bir yandan da bu üretim faaliyetleri sonucu açığa çıkan atık ve atıksuların çevreye etkisiz hale getirilmesi gibi problemler ortaya çıkmaktadır. Enerji arzı, endüstriyel faaliyetlerin sürdürülebilirliği açısından büyük önem taşımaktadır. Ancak enerjide dış kaynaklara bağımlılık, enerji kaynaklarının çeşitliliğinin az olması ve enerji fiyatlarındaki küresel dalgalanmalar gibi etkenler enerji arzının güvenliğinin tehdit etmektedir. Artan enerji ihtiyacının en büyük kaynağı olan endüstriyel faaliyetler sonucu da enerji girdisi dışındaki bir diğer problem de endüstriyel faaliyetlerin çıktısı olan atık ve atıksulardır. Atıkların çevreye zarar vermeyecek şekilde arıtımı ve değerlendirilmesi zorunluluktur. Ancak bu zorunluluk endüstri uygulayıcıları üzerinde büyük bir mali yükü de beraberinde getirmektedir. Endüstri üzerindeki mali baskının ortadan kaldırılması veya hafifletilmesi içinde organik kökenli atıkları bulunan endüstrilerin atıklarının enerji veya katma değerli ürün olarak değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Artan nüfusun en çok etkilediği endüstrilerden biri süt endüstrisidir. Süt endüstrisi faaliyetleri sonucunda açığa çıkan en büyük organik atık akımlarından biri peynir altı suyudur (PAS). PAS'ın arıtımındaki ekonomik ve teknik zorluklar bir ürün değerlendirilmesini ve katma değer katacak biçimde ele alınmasını gerektirmektedir. PAS yaygın olarak gıda katkı maddesi olarak doğrudan kullanım veya içerisindeki katma değerli maddelerin saflaştırılması şeklinde değerlendirilmektedir. PAS'ın içerisindeki temel bileşenler olan laktoz ve proteinler saflaştırılarak piyasada satılması durumunda yüksek katma değere ulaşmaktadır. Ekonomik çıktısı yüksek olan bu değerlendirme yöntemi henüz ülkemizde yaygın olarak kullanılmamaktadır. Buna bağlı olarak da PAS'tan laktoz ve protein üretimi sırasında açığa çıkan atıkların da bertarafı için yaygın kabul edilen bir yöntem bulunmamaktadır. PAS'tan laktove protein üretimi sırasında PAS'a nazaran oldukça yüksek laktoz ve mineral tuzlar içeren ve delaktoz olarak isimlendirilen bir atık akımı açığa çıkmaktadır. Delaktoz yüksek organik içeriği nedeniyle arıtımı zor ve maliyetli bir atık akımıdır. Arıtım haricinde hayvan yemi olarak kullanım alternatifi mevcuttur. Delaktozun ekonomik olarak değerlendirilmesi için anaerobik parçalanma prosesi ürün olan metan nedeniyle iyi bir alternatif olarak ön plana çıkmaktadır.

Bu çalışmada delaktozun bir yandan arıtımı bir yandan da ekonomik değerlendirilmesi amacıyla yukarı akışlı çamur yataklı anaerobik reaktör (UASB) prosesi kullanılmıştır. UASB artan organik yükleme hızlarında işletilmiştir. Sırasıyla 1, 2, 3 ve 4 kgKOİ/m³ olmak üzere 4 farklı organik yükleme hızı test edilerek optimum proses koşullarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Farklı işletme koşullarında sistemin arıtma ve metan üretim performansları değerlendirilmiştir.

Bu kapsamda UASB sisteminin arıtma ve metan üretimi etkinliği, UOA, alkalinite, KOİ giderimi ve metan üretimi parametrelerinin periyodik analizi ile değerlendirilmiştir.

Yapılan çalışma sonucunda elde edilen metan miktarları göz önüne alındığında Türkiye'deki süt ürünleri miktarının potansiyeli bu çalışmanın önemini arttırmaktadır. Potansiyel enerji üretimi düşünüldüğünde peynir üretim tesislerinden kaynaklı peynir altı sularının ortak merkezlerde toplanarak değerlendirilmesi ve birim yatırım maliyetinin düşürülmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma PAS'tan laktoz, protein tozu ile üretim atıklarından biyogaz üretilerek sütün yaşam döngüsü büyük ölçüde kapatılmaktadır. Önerilen proste enerji yanında su geri kazanımı da sağlanmaktadır. Arıtılan su su kaynaklarının kontrollü beslenmesinde kullanım potansiyeline sahiptir.

Yüksek lisans tez çalışması sonucunda elde edilen veriler süt endüstrisinden kaynaklanan delaktozun arıtılması için anaerobik parçalanma proseslerinin kullanım potansiyelini göstermektedir. Tez çalışması içeriği nedeniyle sektör uygulayıcılarına alternatif değerlendirme yöntemleri hakkında bilgi sunma niteliği taşımayı hedeflemektedir.



6. KAYNAKLAR

- APHA 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, Standard Methods. American Public Health Association, Washington, D.C.
- Azman, S. 2016. Anaerobic digestion of cellulose and hemicellulose in the presence of humic acids. Wageningen University.
- Bridoux, G., Dhulster, P., Manem, J. 1994. Grease analysis on municipal waste water treatment plants. *Tech. Sci. méthodes* 5, 257–262.
- Çakmak, K. 2021. Yüksek Organik Kirlilik İçeren Süt Endüstrisi Atıksularının Farklı Anaerobik Reaktör Konfigürasyonlarında Arıtılması Ve Enerji Üretilmesi. Akdeniz Üniversitesi.
- Charalambous, P., Shin, J., Shin, S.G., Vyrides, I. 2020. Anaerobic digestion of industrial dairy wastewater and cheese whey: Performance of internal circulation bioreactor and laboratory batch test at pH 5-6. *Renew. Energy* 147, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.091>
- Cirne, D.G., Paloumet, X., Björnsson, L., Alves, M.M., Mattiasson, B. 2007. Anaerobic digestion of lipid-rich waste-effects of lipid concentration. *Renew. Energy* 32, 965–975. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.04.003>
- Dareioti, M.A., Kornaros, M. 2015. Anaerobic mesophilic co-digestion of ensiled sorghum, cheese whey and liquid cow manure in a two-stage CSTR system: Effect of hydraulic retention time. *Bioresour. Technol.* 175, 553–562. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.102>
- Demirel, B., Yenigun, O., Onay, T.T. 2005. Anaerobic treatment of dairy wastewaters: A review. *Process Biochem.* 40, 2583–2595. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.12.015>
- Dereli, R.K., Loverdou, L., van der Zee, F.P., van Lier, J.B. 2015. A systematic study on the effect of substrate acidification degree and acidogenic biomass on sludge filterability. *Water Res.* 82, 94–103. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.04.044>
- Ebrahimi, A., Najafpour, G.D., Mohammadi, M., Hashemiyeh, B. 2010. Biološka obrada surutke u postrojenju sa trostepenim rotirajućim biološkim kontaktorom i bioreaktorom uasff. *Chem. Ind. Chem. Eng. Q.* 16, 175–182. <https://doi.org/10.2298/CICEQ100315025E>
- FAO 2022. Dairy Market. Dairy Mark. Rev. Overv. Glob. dairy Mark. policy Dev. 2021 1–5.
- Ferchichi, M., Crabbe, E., Gil, G.H., Hintz, W., Almadidy, A. 2005. Influence of initial pH on hydrogen production from cheese whey. *J. Biotechnol.* 120, 402–409. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2005.05.017>
- Fernández, C., Cuertos, M.J., Martínez, E.J., Gómez, X. 2015. Thermophilic anaerobic

- digestion of cheese whey: Coupling H₂ and CH₄ production. *Biomass and Bioenergy* 81, 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.05.024>
- Gannoun, H., Khelifi, E., Bouallagui, H., Touhami, Y., Hamdi, M. 2008. Ecological clarification of cheese whey prior to anaerobic digestion in upflow anaerobic filter. *Bioresour. Technol.* 99, 6105–6111. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.12.037>
- González Siso, M.I. 1996. The biotechnological utilization of cheese whey: A review. *Bioresour. Technol.* 57, 1–11. [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(96\)00036-3](https://doi.org/10.1016/0960-8524(96)00036-3)
- Gujer, W., Zehnder, A.J.B. 1983. Conversion Processes in Anaerobic Digestion. *Water, Sci. Technol.* 15, 127–167.
- Hassan, A.N., Nelson, B.K. 2012. Invited review: Anaerobic fermentation of dairy food wastewater. *J. Dairy Sci.* 95, 6188–6203. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5732>
- Huang, W. 2015. The role of hydrogenotrophic methanogens in an acidogenic reactor. Nanyang Technological University. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.10.047>
- Janczukowicz, W., Zieliński, M., Debowski, M. 2008. Biodegradability evaluation of dairy effluents originated in selected sections of dairy production. *Bioresour. Technol.* 99, 4199–4205. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.08.077>
- Khanal, S.K., Surampalli, R.Y., Zhang, T.C., Lamsal, B.P., Tyagi, R.D., Kao, C.M. 2010. Bioenergy and Biofuel from Biowastes and Biomass.
- Kolev Slavov, A. 2017. General Characteristics and Treatment Possibilities of. Food Technol. *Biotechnol* 55, 14–28.
- Kumar, A.K., Sharma, S. 2017. Recent updates on different methods of pretreatment of lignocellulosic feedstocks: a review. *Bioresour. Bioprocess.* 4. <https://doi.org/10.1186/s40643-017-0137-9>
- Lin, L., Yan, R., Liu, Y., Jiang, W. 2010. In-depth investigation of enzymatic hydrolysis of biomass wastes based on three major components: Cellulose, hemicellulose and lignin. *Bioresour. Technol.* 101, 8217–8223. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.05.084>
- Luo, K., Yang, Q., Li, X. ming, Yang, G. jing, Liu, Y., Wang, D. bo, Zheng, W., Zeng, G. ming 2012. Hydrolysis kinetics in anaerobic digestion of waste activated sludge enhanced by α -amylase. *Biochem. Eng. J.* 62, 17–21. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2011.12.009>
- Ma, J., Frear, C., Wang, Z.W., Yu, L., Zhao, Q., Li, X., Chen, S. 2013. A simple methodology for rate-limiting step determination for anaerobic digestion of complex substrates and effect of microbial community ratio. *Bioresour. Technol.* 134, 391–395. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.02.014>
- McHugh, S., Collins, G., O’Flaherty, V. 2006. Long-term, high-rate anaerobic biological

- treatment of whey wastewaters at psychrophilic temperatures. *Bioresour. Technol.* 97, 1669–1678. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.07.020>
- Meegoda, J.N., Li, B., Patel, K., Wang, L.B. 2018. A review of the processes, parameters, and optimization of anaerobic digestion. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 15. <https://doi.org/10.3390/ijerph15102224>
- Metcalf&Eddy, Tchobanoglous, G., Burton, L.F., Stensel, H.D. 2004. Wastewater engineering : treatment and reuse, Internatio. ed. Mc-Graw-Hill, Boston.
- Mockaitis, G., Ratusznei, S.M., Rodrigues, J.A.D., Zaiat, M., Foresti, E. 2006. Anaerobic whey treatment by a stirred sequencing batch reactor (ASBR): Effects of organic loading and supplemented alkalinity. *J. Environ. Manage.* 79, 198–206. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.07.001>
- O.H. Lowry, N.J. Rosebrough, A.L. Farr, R.J.R. 1951. Protein measurement with the Folin phenol reagent. *J. Biol. Chem.* 193, 265–275.
- Öztürk, İ. 2007. Anaerobik Arıtma ve Uygulamaları. Su vakfı, İstanbul.
- Prazeres, A.R., Carvalho, F., Rivas, J. 2012. Cheese whey management: A review. *J. Environ. Manage.* 110, 48–68. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.05.018>
- Ramos, L.R., de Menezes, C.A., Soares, L.A., Sakamoto, I.K., Varesche, M.B.A., Silva, E.L. 2020. Controlling methane and hydrogen production from cheese whey in an EGSB reactor by changing the HRT. *Bioprocess Biosyst. Eng.* 43, 673–684. <https://doi.org/10.1007/s00449-019-02265-9>
- Rico, C., Muñoz, N., Fernández, J., Rico, J.L. 2015. High-load anaerobic co-digestion of cheese whey and liquid fraction of dairy manure in a one-stage UASB process: Limits in co-substrates ratio and organic loading rate. *Chem. Eng. J.* 262, 794–802. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.10.050>
- Saddoud, A., Hassa??ri, I., Sayadi, S. 2007. Anaerobic membrane reactor with phase separation for the treatment of cheese whey. *Bioresour. Technol.* 98, 2102–2108. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.08.013>
- Shete,Bharati & Shinkar, N.P. 2013. Dairy Industry Wastewater Sources, Characteristics & its Effects on Environment. *Int. J. Curr. Eng. Technol.* ISSN 2277 - 4106 3, 1611–1615.
- Speece, E.R. 1996. Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewaters. Archae Press, USA.
- Stams, A.J.M., Plugge, C.M. 2009. Electron transfer in syntrophic communities of anaerobic bacteria and archaea. *Nat. Rev. Microbiol.* 7, 568–577. <https://doi.org/10.1038/NRMICRO2166>
- Yılmaz, F. 2020. Anaerobik Parçalanma Prosesinin Farklı Sektörel Atıklar İçin Uygulanması. Akdeniz Üniversitesi.

ÖZGEÇMİŞ

SİNA AZIZI

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2020-2024	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği ABD, Antalya
Lisans 2011-2017	Payame Noor Üniversitesi Petrol Mühendisliği, Tehran