

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Beyza ARIKAN

**ORGANİK EVSEL KATI ATIKLARDAN ANAEROBİK ORTAMDA
BİYOGAZ ÜRETİMİNİN VERİMLİLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ADANA, 2008

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ORGANİK EVSEL KATI ATIKLARDAN ANAEROBİK ORTAMDA
BİYOGAZ ÜRETİMİNİN VERİMLİLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Beyza ARIKAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**Bu tez 11/9/2008 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından
Oybirliği/Oyçokluğu İle Kabul Edilmiştir.**

İmza İmza İmza

Prof.Dr. Ahmet YÜCEER Doç.Dr. Mesut BAŞIBÜYÜK Yrd.Doç.Dr. Ramazan BİLGİN

DANIŞMAN

ÜYE

ÜYE

Bu tez Enstitümüz Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında hazırlanmıştır.

Kod No:

Prof. Dr. Aziz ERTUNÇ

Enstitü Müdürü

İmza-Mühür

Bu Çalışma Ç.Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir.

Proje No: MMF2007YL23

• **Not:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ORGANİK EVSEL KATI ATIKLARDAN ANAEROBİK ORTAMDA
BİYOGAZ ÜRETİMİNİN VERİMLİLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Beyza ARIKAN

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

Danışman : Prof. Dr. Ahmet YÜCEER

Yıl : 2008, **Sayfa** : 155

Üye : Prof. Dr. Ahmet YÜCEER

: Doç. Dr. Mesut BAŞIBÜYÜK

: Yrd. Doç. Dr. Ramazan BİLGİN

Bu çalışmada; çürütülmüş organik katı atık çamuru, çamur içerisinde kalan organik maddeden daha fazla faydalanmak amacıyla tekrar çürütülmüştür. Çürütülmüş çamura, hidroliz aşamasında parçalanması zor olan lignoselülozik maddeleri parçalamak amacıyla asit (sülfürik asit) ve enzim (selülaz enzimi) ile ön işlem uygulanmıştır. Enzimatik ve asidik ön işlemleri uygulanan çürütülmüş çamur, termofilik şartlarda (55 °C) tekrar çürütülmüştür. Çürütülmüş çamurun özelliklerini belirlemek için karbonhidrat, protein, toplam katı (TK) ve uçucu katı (UK) ölçümleri yapılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda; metan gazı hacmi 5. ve 29. günde; ön işlem uygulanmamış çamurda sırasıyla 27 mL, 212,5 mL; % 1 oranında asidik ön işlem uygulanmış çamurda sırasıyla 96 mL, 118,5 mL; sadece ısıl işlem uygulanmış çamurda ise sırasıyla 216 mL, 318 mL elde edilmiştir. Böylece; çürütülmüş çamura ısıl ön işlem uygulanmasının, hidroliz aşamasını hızlandırdığı ve metan gazı hacmini artırdığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Biyogaz, Katı atık, Anaerobik parçalanma

ABSTRACT

MSc THESIS

INVESTIGATION OF THE EFFICIENCY OF BIOGAS PRODUCTION FROM ORGANIC SOLID WASTES BY ANAEROBIC TREATMENT

Beyza ARIKAN

**DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE
UNIVERSITY OF ÇUKUROVA**

Supervisor : Prof. Dr. Ahmet YÜCEER

Year : 2008, **Page** : 155

Jury : Prof. Dr. Ahmet YÜCEER

: Assoc. Prof. Dr. Mesut BAŞIBÜYÜK

: Assistant Prof. Dr. Ramazan BİLGİN

In this study, digested organic solid waste was redegreded in order to gain more organic matters from solid waste's residuals. Digested sludge was pre-treated with acid (sulfuric acid) and enzyme (cellulase) to degradate undegradable lignocellulosic materials in hydrolytic phase. Methane gases production from pretreated digested sludge with acid and enzyme in anaerobic degradation with thermophilic conditions (55 °C) is measured. Digested sludge's Carbohydrates, protein, pH, volatile solids and total solids were determined. As a result of studies; methane gases volume in 5 and 29 days, in order of 27 mL, 212,5 mL from without pretreated sludge; in order of 96 mL, 118,5 mL from acid (%1) pretreated sludge; in order of 216 mL, 318 mL from only themophilic pretreated sludge were produced. Therefore, it was observed that application of thermophilic pretreatment to the digested sludge accelerated hydrolytic stage and increasing the methane gas production.

Key Words: Biogas, Solid waste, Anaerobic degradation

TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőması ‘Çukurova Üniversitesi’, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümünde hazırlanmıştır.

Yüksek lisans eğitiminin boyunca yardımlarını esirgemeyen, her türlü çalışma ortamını sağlayan ve tez çalıőmamda tecrübe ve bilgileriyle beni aydınlatan danışman hocam, Çevre Mühendisliği Bölüm Başkanı Sayın Prof.Dr. Ahmet YÜCEER’e sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın bir kısmı İsveç’in ‘Högskolan i Boras’ üniversitesinde ‘Erasmus’ programı kapsamında yapılmıştır. Bölümümüz ‘Erasmus’ koordinatörü Sayın Hocam Doç.Dr. Mesut BAŞIBÜYÜK’e yardımlarından dolayı saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca ‘Högskolan i Boras’ üniversitesinden Sayın Ilona SÁRVÁRI HORVÁTH’a ve araştırma grubu arkadaşım Yüksek lisans öğrencisi Nasrin KHORSHIDI’ye teşekkürlerimi sunarım.

Sevgi dolu dostluğuyla Lisans ve Yüksek lisansım boyunca yanımda olan Ayőegül DEMİR’e tez çalıőmamdaki desteği için teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi her konuda beni destekleyen AİLEME tez çalıőmam süresince gösterdikleri sevgi ve sabır nedeniyle teşekkürlerimi bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖZ.....	I
TEŞEKKÜR.....	III
İÇİNDEKİLER.....	IV
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
KISALTMALAR DİZİNİ.....	XII
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Organik Katı Atıklar.....	4
1.2. Anaerobik Parçalanma.....	6
1.2.1. Anaerobik Parçalanma Basamakları.....	8
1.2.1.1. Hidroliz.....	9
1.2.1.2. Asit Oluşumu.....	12
1.2.1.3. Metan Oluşumu.....	17
1.2.2. Anaerobik Parçalanmayı Etkileyen Faktörler.....	18
1.2.2.1. Reaktör Sıcaklığı.....	18
1.2.2.2. Bekleme Süresi.....	21
1.2.2.3. Organik Yükleme Hızı.....	23
1.2.2.4. Toplam Katı Miktarının Yükleme Hızına Oranı.....	24
1.2.2.5. pH ve Tamponlama Kapasitesi.....	25
1.2.2.6. C/N Oranı.....	26
1.2.2.7. Toksikite.....	28
1.2.3. Anaerobik Parçalanmanın Mikrobiyolojisi.....	31
1.2.4. Katı Atıklar İçin Anaerobik Parçalanma Sistemleri.....	41
1.2.4.1. Tek Aşamalı Sistemler.....	42
1.2.4.2. İki Aşamalı Sistemler.....	50
1.2.4.3. Kesikli Sistemler.....	54
1.2.5. Anaerobik Parçalanma Avantaj ve Dezavantajları.....	56
1.3. Biyogaz.....	58
1.3.1. Biyogaz ve Bileşimi.....	58

1.3.2. Ülkemizde ve Dünyada Biyogazın Kullanımı ve Geleceği	60
1.3.3. Biyogaz Üretiminin Verimliliğinin Arttırılması	66
1.3.4. Biyogazın Çevreye Etkileri	69
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	72
3. MATERYAL VE METOD	84
3.1. Materyal	84
3.1.1. Kullanılan Katı Atık Kaynağı ve Özelliği	84
3.1.2. Katı Atık Ayırma ve Biyogaz Üretim Tesisi.....	87
3.2. Metod	93
3.2.1. Alınan Numuneler	93
3.2.2. Karbonhidrat Tayini ve Selülaz Tayini.....	95
3.2.3. Toplam Katı ve Uçucu Katı Tayini	95
3.2.4. Enzimatik Ön İşlem	98
3.2.5. Asidik Ön İşlem.....	100
3.2.6. Metan Gazı Ölçümlerinin Hesaplanması.....	104
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	105
4.1. Enzimatik Ön İşlem Metan Gazı Ölçüm Sonuçları.....	105
4.2. Enzimatik Ön İşlem Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	114
4.3. Asidik Ön İşlem Metan Gazı Ölçüm Sonuçları	116
4.4. Asidik Ön İşlem Sonuçlarının Değerlendirilmesi	124
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	127
KAYNAKLAR.....	129
ÖZGEÇMİŞ	140

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Anaerobik arıtmada polimerik bileşiklerden metan gazı oluşumuna kadar gerçekleşen dönüşümler.....	7
Çizelge 1.2. Enzimatik hidrolize katkıda bulunan mikroorganizmalar	10
Çizelge 1.3. Asit oluşturan mikroorganizmalar ve oluşturdıkları asitler	15
Çizelge 1.4. Anaerobik çürütme proseslerinde ağır metallerin çözülebilir zehirlilik seviyeleri.....	29
Çizelge 1.5. Anaerobik çürütme proseslerinde görülen ağır metal zehirliliğinin bulunma seviyeleri	29
Çizelge 1.6. Çamur çürütme tesislerindeki bakterilerin türleri	32
Çizelge 1.7. Organik katıların çürütülmesinde uygulanan prosesler, ürünler ve kalite standartları	44
Çizelge 1.8. Tek Aşamalı Islak Sistemlerin Avantaj ve Dezavantajları	46
Çizelge 1.9. Tek aşamalı Kuru Sistemlerin Avantaj ve Dezavantajları	49
Çizelge 1.10. İki Aşamalı Sistemlerin Avantaj ve Dezavantajları	51
Çizelge 1.11. Kesikli Sistemlerin Avantaj ve Dezavantajları	55
Çizelge 1.12. Farklı Atıklardan Elde Edilen Biyogazların Özellikleri	59
Çizelge 1.13. Ülkelerin CO ₂ Emisyon Göstergeleri	66
Çizelge 1.14. Bazı atık türlerinden elde edilen biyogaz verileri	69
Çizelge 1.15. Biyogaz içerisindeki iz elementler ve çalışma ortamında izin verilebilecek en yüksek konsantrasyonlar	71
Çizelge 2.1. Farklı Katı Konsantrasyonlarında Çürütücülerin Performansları	72
Çizelge 2.2. Farklı koşullarda, biyogaz üretimlerinin karşılaştırılması	74
Çizelge 2.3. Farklı katı oranlarında (% 1,5–30) elde edilen metan gazı verimleri	76
Çizelge 2.4. Ham atık su numunesi, enzimatik ön işlem uygulanan ve lipaz ilave edilen çamurların çürütülmesi ile üretilen biyogaz hacimleri	77
Çizelge 2.5. Farklı durumlarda çeşitli atıkların yıllık atık miktarları, metan verimi ve metan gazı üretimleri	78
Çizelge 2.6. Enzimatik ön işlem ile elde edilen metan gazı verimleri	81

Çizelge 4. 1. Çürütülmüş çamurların ortalama Toplam Katı ve Uçucu Katı oranları	105
Çizelge 4.2. Enzimatik ön işlemden elde edilen toplam metan gazı hacimleri	106
Çizelge 4.3. Enzimatik ön işlemden referanstan üretilen toplam metan gazı hacimleri	107
Çizelge 4.4. Çürütülmüş çamurdan (Sobacken) üretilen toplam metan gazı hacimleri	108
Çizelge 4.5. Çürütülmüş çamura (Sobacken) enzimatik ön işlem uygulanmış sistemde üretilen toplam metan gazı hacimleri	109
Çizelge 4.6. Çürütülmüş çamurdan (Vasteros) üretilen toplam metan gazı hacimleri	110
Çizelge 4.7. Çürütülmüş çamura (Vasteros) enzimatik ön işlem uygulanmış sistemde üretilen toplam metan gazı hacimleri	111
Çizelge 4.8. Çürütülmüş çamurdan (Falköping) ön işlemden geçirilmeden hazırlanan sistemde üretilen toplam metan gazı hacimleri	112
Çizelge 4.9. Çürütülmüş çamurdan (Falköping) ön işlem uygulanmış sistemde üretilen toplam metan gazı hacimleri	113
Çizelge 4. 10. Sülfürik asit ile ön işlem ve ısı işlem uygulanmış çürütülmüş çamurların (Sobacken) Toplam Katı ve Uçucu Katı oranları	116
Çizelge 4.11. Asidik ön işlemden referanstan üretilen toplam metan gazı hacimleri	117
Çizelge 4.12. Asidik ön işlemden elde edilen toplam metan gazı hacimleri	118
Çizelge 4.13. Ön işlem yapılmamış çamurdan (Sobacken) üretilen toplam metan gazı hacimleri	119
Çizelge 4.14. Isıl ön işlem uygulanan çürütülmüş çamurdan üretilen toplam metan gazı hacimleri	120
Çizelge 4.15. Sülfürik asit (% 1 oranında) eklenen çürütülmüş çamurdan üretilen toplam metan gazı hacimleri	121
Çizelge 4.16. Sülfürik asit (% 2 oranında) eklenen çürütülmüş çamurdan üretilen toplam metan gazı hacimleri	122

Çizelge 4.17. Sülfürük asit (% 5 oranında) eklenen çürütülmüş çamurdan üretilen toplam metan gazı hacimleri	123
Çizelge 4.18. Organik katı atıkların çürütülmesi üzerine yapılan çalışmalar	126

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Anaerobik Arıtmada Temel Parçalanma Yolları	9
Şekil 1.2. Katı atıkların anaerobik çürütülmesinde kullanılan tasarım proses örneği	42
Şekil 1.3. Tek Aşamalı Islak Sistem Dizaynı	46
Şekil 1.4. Kuru Sistemlerde Kullanılan Farklı Tasarımlar	48
Şekil 1.5. Schwarting-uhde Tipi Proses	52
Şekil 1.6. İki Aşamalı Islak-ıslak Sistem Tasarımı	48
Şekil 1.7. Farklı kesikli sistemlerde geri dönüşümlü sızıntı suyunun şekilleri	55
Şekil 2.1. Evsel organik katı atıklarda ön işlem uygulanmadan önce elde edilen metan gazı hacimlerinin günlere bağlı grafiği	82
Şekil 2.2. Evsel organik katı atıklardan ön işlem uygulanarak elde edilen metan gazı hacimlerinin günlere bağlı grafiği	82
Şekil 3.1. Katı Atık Ayırma ve Biyogaz Üretim Tesisi	85
Şekil 3.2. Katı Atık Geri Dönüşüm Merkezi	86
Şekil 3.3. Çöp Kutusu	87
Şekil 3.4. Organik Katı Atıkların Ayrıldığı Optik Ayırıcı	88
Şekil 3.5. Katı atık ayırma ve biyogaz üretim tesisi atık kaynakları ve oluşan ürünler	89
Şekil 3.6. Biyogaz Üretim Sistemi Akım Şeması	90
Şekil 3.7. Katı Atık Ayırma Tesisi Biyoreaktörü	91
Şekil 3.8. Anaerobik Çürütücünün İç Kısmı	92
Şekil 3.9. Biyogaz üretimi süresince sistemde oluşan çamurlar ve sular	93
Şekil 3.10. Tesisten santrifüjden geçirilmeden önce alınan çürütülmüş çamur numunesi alınırken	94

Şekil 3.11. Tesisten santrifüjden geçirildikten sonra alınan çürütülmüş çamur	95
Şekil 3.12. Gallenkamp Marka Fırın (550 ± 25 °C)	97
Şekil 3.13. Desikatör içerisinde fırında yakılmış çamurlar	97
Şekil 3.14. Enzimatik ön işlem çalışmasında hazırlanan şişeler ve içerikleri	99
Şekil 3.15. Asidik ön işlem çalışmasında hazırlanan şişeler ve içerikleri.....	101
Şekil 3.16. Farklı oranlarda (%0, %1, %2, %5) sülfürik asit eklenmiş çamurlar otoklavda bekletildikten sonra	102
Şekil 3.17. Asidik ön işlem çalışmasında hazırlanan şişeler 55 °C'de inkübatörde	103
Şekil 3.18. Basıncılı iğneyle şişeden alınan metan gazının gaz kromatografi cihazıyla ölçümü	103
Şekil 4.1. Enzimatik ön işlemde körde üretilen metan gazı hacminin zamana bağlı kümülatif ölçümleri	106
Şekil 4.2. Enzimatik ön işlemde referanstan üretilen toplam metan gazı hacminin zamana bağlı kümülatif ölçümleri	107
Şekil 4.3. Çürütülmüş çamurdan (Sobacken) üretilen metan gazı hacminin zamana bağlı kümülatif ölçümleri	108
Şekil 4.4. Çürütülmüş çamura (Sobacken) enzimatik ön işlem uygulanmış sistemde üretilen metan gazı hacminin zamana bağlı ölçümleri	109
Şekil 4.5. Çürütülmüş çamurdan (Vasteros) üretilen metan gazı hacminin zamana bağlı kümülatif ölçümleri	110
Şekil 4.6. Çürütülmüş çamura (Vasteros) enzimatik ön işlem uygulanmış sistemde üretilen metan gazı hacminin zamana bağlı kümülatif ölçümleri	111
Şekil 4.7. Çürütülmüş çamurdan (Falköping) ön işlemde geçirilmeden hazırlanan sistemde üretilen metan gazı hacminin zamana bağlı kümülatif ölçümleri	112
Şekil 4.8. Çürütülmüş çamurdan (Falköping) ön işlem uygulanmış sistemde üretilen metan gazı hacminin zamana bağlı kümülatif ölçümleri	113

Şekil 4.9. Enzimatik ön işlem uygulanmış çürütülmüş çamurlardan üretilen metan gazı hacimlerinin (mL) zamana (gün) bağlı kümülatif ölçümleri	115
Şekil 4.10. Asidik ön işlemde referanstan üretilen toplam metan gazı hacminin zamana bağlı kümülatif ölçümleri	117
Şekil 4.11. Asidik ön işlemde körde üretilen toplam metan gazı hacminin zamana bağlı kümülatif ölçümleri	118
Şekil 4.12. Ön işlem yapılmamış çamurdan (Sobacken) üretilen toplam metan gazı hacminin zamana bağlı kümülatif ölçümleri	119
Şekil 4.13. Isıl ön işlem uygulanan çürütülmüş çamurdan üretilen metan gazı hacminin zamana bağlı kümülatif ölçümleri	120
Şekil 4.14. Sülfürik asit (% 1 oranında) eklenen çürütülmüş çamurdan (Sobacken) üretilen metan gazı hacminin zamana bağlı kümülatif ölçümleri	121
Şekil 4.15. Sülfürik asit (% 2 oranında) eklenen çürütülmüş çamurdan (Sobacken) üretilen metan gazı hacminin zamana bağlı kümülatif ölçümleri	122
Şekil 4.16. Sülfürik asit (% 5 oranında) eklenen çürütülmüş çamurdan (Sobacken) üretilen metan gazı hacminin zamana bağlı kümülatif ölçümleri	123
Şekil 4.17. Asidik ön işlem ve ısıl işlem uygulanmış çürütülmüş çamurdan üretilen metan gazı hacimlerinin (mL) zamana (gün) bağlı kümülatif ölçümleri	124

KISALTMALAR DİZİNİ

⁰ C	Santigrat Derece
atm	Atmosfer Basıncı
kj	Kilojul
kcal	Kilokalori
kWh	Kilowattsaat
kg	Kilogram
mg	Miligram
µL	Mikrolitre
mL	Mililitre
N	Newton
L	Litre
C	Karbon
H	Hidrojen
N	Azot
P	Fosfor
T	Sıcaklık
P	Fosfor
CO ₂	Karbondioksit
HAc	Asetik Asit
A.B.D	Amerika Birleşik Devletleri
ppm	Milyonda bir
EİEİ	Elektrik İşleri Etüt İdaresi
AB	Avrupa Birliği
EPA	The U.S. Environmental Protection Agency
UKM	Uçucu Katı Madde
GWh	Gigawattsaat
HPCL	Sıvı Yüksek Basıncılı Kromatografi

NREL	National Renewable Energy Laboratory
MRI	Midwest Research Institute
FPU	Filter Paper Units
FPA	Filter Paper Activity
FID	Flame Ionization Detector
avicel	Cellulose Microcrystalline
P	Açık hava basıncı
R	Gaz Sabiti 8,314 J
n	Mol Sayısı
β	Beta
SEBAC	Kesikli Ardışık Anaerobik Kompost Sistemi
BTA	Biotechnische Abfallverwertung (Biyokütlenin ikinci aşamada olduğu anaerobik sistem)

1. GİRİŞ

Enerji, iş yapma yeteneğidir. Enerji, insanın temel ihtiyaçlarının karşılanması için vazgeçilemez bir kaynaktır. Enerji, sürekli değişim ve dönüşüm içerisinde farklı enerjilere dönüştürülmektedir. Kömür, petrol, linyit ve doğalgaz gibi yakıtların yakılmasıyla ısı enerjisi ortaya çıkmaktadır. Isı enerjisi yenilenebilir ve yenilemez olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil yakıtlardan elde edilen enerji yenilenemez enerji, güneş ışığı, rüzgâr, akan su, biyolojik prosesler ve jeotermal yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer almaktadır. Yenilenebilir enerji; sürekli devam eden doğal proseslerde var olan enerji akışından elde edilen bir enerji kaynağıdır. Bu özelliği dolayısıyla çevreye zarar vermeden enerji üretimine olanak sağlamaktadır.

Geçmiş yıllarda enerji talebinin artması refah yaşam standartlarına ulaşma çabalarından kaynaklandığı düşünülmekteydi. Fakat günümüzde enerji insan yaşamının bir parçası olmuştur. Enerji ihtiyacının artmasının ana nedenleri; nüfusun artması, teknolojinin ilerlemesiyle birlikte ihtiyaçların artmasıdır. Enerji ihtiyacının artmasıyla ham madde ve enerji kaynakları azalmıştır. Bu artış güneş enerjisi, biyokütle enerjisi, rüzgâr enerjisi ve biyogaz gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasına ve mevcut enerji kaynaklarının geliştirilmesine neden olmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilginin artmasına neden fosil enerji kaynaklarının tükenme tehlikesi gibi gözüke de toplumun, çevre kirliliğine olan duyarlılığının artması da ana nedenlerdendir. Enerji kaynağı seçiminde süreklilik ve güvenilirlik çok önemlidir. Enerji ihtiyacını karşılamada dışa bağımlı enerji kaynaklarına ve tek kaynağa ağırlık verilmemesi gerekmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında biyogaz önemli yer tutmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında biyogaz, hava kirliliğini azaltmasının yanında toprak kirliliğini de önleyerek avantaj sağlamaktadır. Yanıcı bir gaz karışımı olan biyogaz, evsel ve endüstriyel katı atıklar, hayvan dışkıları, bitkisel atıklar gibi çeşitli organik atıkların oksijensiz ortamda fermantasyona uğratılması sonucu elde edilmektedir. Bunun yanında biyogaz, organik atıkların kontrollü koşullarda depolanmasının sağlanması, arıtma etkisinin bulunması, organik atıklardan

kaynaklanan koku sorununu büyük ölçüde çözmesi ve tarımda organik toprak şartlandırıcı kullanımını kolaylaştırması gibi önemli özellikler taşımaktadır.

Toprak kirliliğinin ana sebeplerinden biri katı atıklardır. Katı atıkların toprağa zarar vermemesi için düzenli şekilde bertaraf edilmesi gerekmektedir. Önceki yıllarda katı atıkların bertaraf yöntemlerinden çevreye en az zarar veren yöntemlerin araştırılması ve mevcut tesislerin geliştirilmesi üzerine çalışmalar yapılmaktaydı. Günümüzde katı atıkların geri dönüşümü ve katı atıkların organik kısımlarından enerji elde edilmesi çalışmaları önem kazanmaktadır. Biyogaz üretimi sonucu oluşan çürütülmüş atıklar, çevre sağlığına olumlu etkileri ve besi maddesi açısından zengin olmaları sebebiyle toprak şartlandırıcıya dönüştürülmektedir. Toprak şartlandırıcıya dönüştürülen atıkta yabancı ot tohumları çimlenme özelliğini kaybetmekte ve kokusu hissedilmeyecek ölçüde yok olmaktadır. Kırsal kesimlerde metan gazı üretimi için genellikle küçük ve kurulumu pratik tesisler tercih edilmektedir. Ülkemizde küçük yerleşim yerlerinde hayvan gübre atıklarından ısınma amaçlı başlayan metan gazı üretimi, ilerleyen teknolojiyle birlikte daha kapsamlı tesislerde yapılmaya başlanmıştır. Ayrıca ülkemizde atık su arıtma tesislerinden çıkan çamurların çürütülmesi ile oluşan metan, gazı tesisin elektrik enerjisini karşılamaktadır. Günümüzde ise Avrupa Birliği uyum yasaları ve Tübitak 2023 yılına yönelik enerji gösterim planları da göz önünde bulundurularak metan gazı üretiminin arttırılmasına yönelik özellikle kırsal kesimlerde teşvik projeleri uygulanmaktadır. Tübitak 2023 yılı vizyonunda;

- 1) Türkiye'nin Ulusal kaynaklarına öncelik veren, bu kaynakların aranmasında ve istenen kaliteyle, güvenli ve ekonomik olarak üretiminde ileri teknolojileri kullanan ve geliştirebilen,
- 2) Gereksinim duyduğu enerjiyi, güvenli, ekonomik, verimli ve çevreye duyarlı teknolojilerle üreten, ileten, depolayan ve kullanan,
- 3) Uluslararası enerji pazarında yarışabilecek enerji teknolojileri geliştirebilen ve uluslararası enerji yatırımlarında etkin rol alabilen, bir Türkiye" görülmek isteniyor. Bu hedefe ulaşmak amacıyla temiz ve ısı değeri yüksek bir enerji kaynağı olan biyogaza yönelik çalışmalar arttırılmaktadır.

Bu çalışmada; İsveç'in Boras ilindeki Sobacken katı atık ayırma ve biyogaz

üretim tesisinden alınan çürütülmüş çamurlar organik maddeden maksimum faydalanmak amacıyla tekrar çürütülmüştür. Çürütülmüş organik katı atık çamuru, kolay parçalanmayan organik maddelerin yanında, anaerobik yollarla parçalanması zor olan lignin, selüloz ve hemiselüloz gibi lignoselülozik maddeler de içermektedir. Hidroliz aşamasından önce, kolay parçalanamayan organik maddelerin polimerlerinin mikroorganizmalar ile kimyasal ve biyolojik ön işlemleri uygulanarak monomerlerine parçalanması gerekmektedir. Ön işlem, karmaşık organik yapıdaki maddelerin daha kolay parçalanabilen basit moleküllere indirgenmesini sağlamaktadır (Yadvika ve ark., 2004). Çürütme işleminden önce lignoselülozik yapıdaki maddelerin parçalanması ve biyogaz üretimini artırması amacıyla farklı ön işlemler uygulanmaktadır. Bunlar; katı atığa enzim, asit, ağır metaller, iz elementler ve aşı çamur eklenmesi gibi kimyasal ve biyokimyasal ön işlemler olarak sıralanabilir. Ayrıca; sistemde, sıcaklık, yükleme hızı, bekleme zamanı ve substratın partikül boyutu gibi işletim parametrelerinde değişiklik yapılması, çamur geri dönüştürülmesi gibi fiziksel ön işlemler uygulanabilir (Yadvika ve ark. 2004; Mendes ve ark., 2006; Torres ve ark., 2007).

Adı geçen tesiste daha önceleri yapılan araştırmalar farklı proseslerin materyal kalitesine etkisi ve prosesin verimini artırıcı etken ve maddelere yöneliktir. Bu tesiste katı atıkların anaerobik çürütücüde organik kısımlarının tam olarak parçalanmamasıyla metan gazı üretiminde istenilen verim elde edilememektedir. İsveç' in 2010 yılına yönelik çevre iyileştirme politikalarında katı atıklardan enerji üretiminde anaerobik çürütücüden kalan atığın araziye serilmeden önce organik kısımlarının maksimum kullanımı çalışmalarına yer verilmiştir.

Bu çalışmanın amacı; çürütülmüş çamura, ön işlem uygulayarak hidroliz aşaması hızlandırılıp anaerobik parçalanma sisteminin veriminin artırılmasıdır. Çalışma, enzimatik ve asidik ön işlem olmak üzere 2 aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada; çürütülmüş çamur, selülozun parçalanması amacıyla bitkisel bir enzim olan selülaz enzimi ile işlemden geçirilerek tekrar çürütülmüştür. Selülaz enzimi eklenmesi ile bir polisakkarit olan selülozun hidroliz aşamasından önce ön işlem ile disakkarit sellobiyoza çevrileceği amaçlanmıştır. İkinci aşamada; çürütülmüş çamurlar lignoselülozik yapıdaki organik maddeleri parçalamak amacıyla farklı

oranlarda (% 0, % 1, % 2, % 5) sülfürik asit eklenerek, ön işlem uygulandıktan sonra tekrar çürütülmüştür. Asit ile ön işlem uygulanan çürütülmüş çamurun, toplam katı madde miktarını düşürerek, tesisin depo hacmini azaltıp işletim masraflarını düşürmek amaçlanmıştır. Ön işlemin, mikroorganizmaların aktivitesini ve metan gazı miktarını arttıracığı düşünülerek, metan gazı oluşumuna etkisinin gözlenmesi üzerine laboratuvar çalışmaları yapılmıştır.

1.1. Organik Katı Atıklar

Katı atık; üreticisi tarafından atılmak istenen ve toplumun huzuru ile özellikle çevrenin korunması bakımından, düzenli bir şekilde bertaraf edilmesi gereken katı maddeler ve arıtma çamurundan oluşmaktadır (Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği, 1995). Katı atıklar sıvı atıklar ve atmosfer emisyonları ve tehlikeli atıklar dışındaki tüm atıkları kapsamaktadır. İnsan ve hayvan aktivitelerinden oluşan katı atıklar sıvı atıklarla karışabilmektedir (İgoni ve ark., 2008). Katı atıklar genel olarak; evsel atıklar, iri ve hurda çöpler, bahçe atıkları, cadde süprüntüleri, sanayi atıkları, mezbaha ve ahır atıkları, enkaz ve toprak olmak üzere yediye ayrılmıştır. Bu atıklar da organik ve inorganik kısımlara ayrılmıştır (Karpuzcu, 1996). İçerisinde organik karbon bulunan ve okside olabilen bileşiklerden oluşan maddelere organik madde denir (Van Haandel ve Lettinga, 1994). Organik katı atıkların % 40'dan fazlası biyolojik yollarla kolay parçalanabilir organik maddelerden oluşmaktadır (Björnsson, 2000, Sosnowski, 2003).

Yerleşim yerlerinde karşılaşılan en büyük sorunlardan biri evsel ve endüstriyel katı atıklardır. Evsel atıklardan mutfak atıkları, yemek atıkları organik, plastik ambalajlar, kül, ev eşyası kırıkları inorganiktir. Cadde atıklarından pazaryeri atıkları, hayvan pisliği ve ağaç, yaprak ve dal atıkları organik, uçucu kül, toz ve cadde yüzeyi aşınmaları inorganiktir (Karpuzcu, 1996). Evsel katı atıkların % 68'ini organik atıklar, kalan kısmını ise kâğıt, karton, tekstil, plastik, deri, metal, ağaç, cam ve kül gibi maddeler oluşturmaktadır (www.wwf.org.tr). Katı atıkların sınıflandırılması katı atık içeriğinin değişmesiyle önemli ölçüde son 20–30 yılda değişmiştir. Örneğin evsel katı atık içeriğinde kömür külü yerine plastik atıklar çoğalmıştır. Katı atıkların içeriği toplumun ekonomik ve kültürel düzeyine ve

mevsimlere bağlı olarak değişmektedir. Örneğin yaz aylarında katı atıklar içerisinde meyve ve sebze atıkları daha çok bulunmaktadır (Mazlum, 2004).

Evsel katı atıkların miktarının çok yüksek olması ve içeriğinin sanayileşmiş toplumlarda üretilen ürünlere bağlı olarak heterojen olması nedeniyle bertarafı zor ve karmaşık görülmektedir. Evsel katı atıklar nüfusun yoğun olduğu yerlerde daha fazla üretilmeleri ve kaynakta ayrılmamaları nedeniyle bertarafı zorlaşmaktadır (Mazlum, 2004). Katı atıkların düzensiz depolanmasıyla meydana gelen anaerobik şartlar koku oluşumuna yol açmaktadır (Dölgen ve ark., 2003). Katı atıkların akıcı olmayan doğası gereği sürekli bir yerde bekletilmesi, üretilmesi ve depolanması gerekmektedir. Katı atıkların, hava, su ve toprak kirliliğine neden olması sebebiyle bu atıklardan enerji elde edilmeli ve çevreye zarar vermeden bertaraf edilmelidir (Igoni ve ark., 2008).

Bütün dünyada olduğu gibi ülkemizde de özellikle büyük yerleşim yerlerinde insanların karşılaştığı en büyük evre sorunu olan katı atıkların yönetiminin üç temel ilkesi; az atık üretilmesi, atıkların geri kazanılması ve atıkların çevreye zarar vermeden bertaraf edilmesi şeklinde sıralanmaktadır.

Ülkemizde günde yaklaşık 65 bin ton çöp üretilmektedir. Türkiye’de çöp miktarının yaklaşık % 15–20’sini geri kazanılabilir nitelikli atıklar oluşurmaktadır (www.wwf.org.tr). Türkiye’de günde kişi başına bir kg evsel katı atık üretilmektedir. Evsel katı atık miktarının yaklaşık %50’sini organik atıklar, % 25’ini geri dönüşüme uygun maddeler ve % 25’lik kısmı değerlendirilemez atıklardan oluşmaktadır. Evsel katı atıkların bertarafında genellikle karışık olarak toplanan atıklar düzensiz olarak deponi alanlarına taşınmaktadır. Depo alanlarına taşınan atıkların değerlendirilebilir olanları çok basit ve sağlıksız şartlar altında satılmak amacıyla ayrılmaktadır. Kalan organik atıklar ve değerlendirilemeyen atıklar ise depolanmaktadır (elik ve ark., 2004). Düzensiz depolama sonucu yeraltı ve yüzey suları kirlenmekte, kötü kokulara, sera etkisine, yangınlara neden olmaktadır. Sinek üremesi gibi problemler ortaya çıkararak burada beslenen kuş ve diğer hayvanlar bulaşıcı hastalıkların yayılmasına neden olmaktadır (Edgü ve Atabarut, 2004). Katı atıkların içeriğinin farklı olması bazen parçalanma proseslerinde avantaj sağlamaktadır. Farklı kaynaklı organik atıkların birlikte rtlmesinin yararları vardır. Bunlar (Sosnowski, 2003);

Toksik bileşiklerin seyreltilmesi,
Besi maddelerinin dengesinin geliştirilmesi,
Mikroorganizmaların sinerjistik etkilerinin dengelenmesi,
Biyolojik yollarla ayrıştırılabilir organik madde yükünün artırılması,
Biyogaz üretiminin arttırılmasıdır.

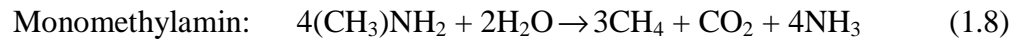
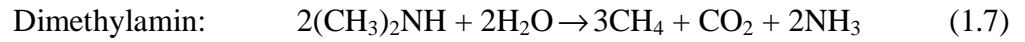
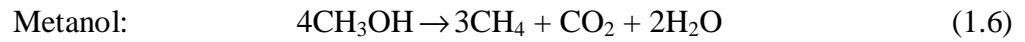
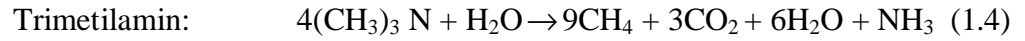
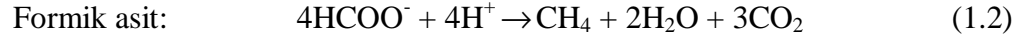
1.2. Anaerobik Parçalanma

Anaerobik parçalanma, askıda organik maddelerin oksijen yokluğunda anaerobik mikroorganizmalarla ayrışması esasına dayanan ve bu sırada meydana gelen çok adımlı biyokimyasal reaksiyonlardan oluşan biyolojik bir süreçtir (Lastella, 2000; İleri, 2000; Verma, 2002). Anaerobik arıtmada polimerik bileşiklerden metan gazı oluşumuna kadar gerçekleşen dönüşümler Çizelge 1.1.'de verilmektedir.

Çizelge 1.1. Anaerobik arıtmada polimerik bileşiklerden metan gazı oluşumuna kadar gerçekleşen dönüşümler (İleri, 2000; Metcalf&Eddy, 2003; Juanga, 2005)

Reaksiyona giren ürünler	Mikroorganizmalar	Reaksiyon sonucu oluşan ürünler
Proteinler Yağlar Nişasta Selüloz	Hidrolizi gerçekleştiren mikroorganizmalar	Aminoasitler Yağ asitleri, Gliserin Glükoz Dextroz
Karbonhidratlar Aminoasitler Yağ asitleri Alkoller	Asit oluşturan mikroorganizmalar	Valerik asit Bütirik asit Propiyonik asit Laktik asit Etanol
Valerik asit Bütirik asit Propiyonik asit Laktik asit Etanol	Asetik asit oluşturan mikroorganizmalar	Asetik asit CO ₂ H ₂
Asetik asit Organik asitler Alkoller CO ₂ H ₂	Metan oluşturan mikroorganizmalar	CH ₄ + CO ₂

Anaerobik parçalanmayla metan gazı elde edilir. Metan gazı oluşum reaksiyonlarında hidrojen, formik asit, karbon monoksit, metanol, metilamin ve asetattan metan gazı oluşmaktadır (Metcalf&Eddy, 2003; Juanga, 2005).



1.2.1. Anaerobik Parçalanma Basamakları

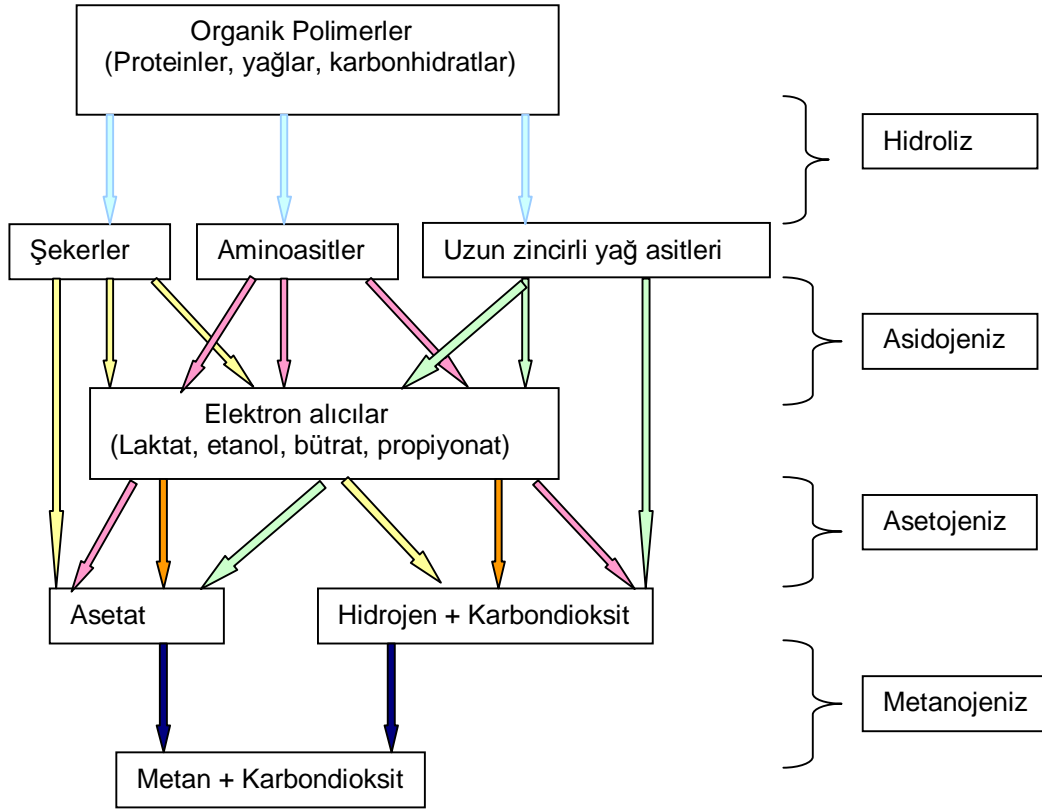
Karmaşık makro moleküllerin transferi mikroorganizmalar aracılığıyla olmaktadır. Anaerobik parçalanmada protein, karbonhidrat ve yağların parçalanması dört farklı basamakla gerçekleşmektedir. Bunlar hidroliz, asidojenesis, asetojenesis ve metanojenesisdir (Van Haandel ve Lettiga, 1994; Vavilin ve Angelidaki, 2005; Juanga, 2005; Park ve ark., 2005). Metan gazı üretim aşamaları çeşitli kaynaklarda farklı basamaklarla ele alınmaktadır. Bazı kaynaklarda asidojenesis ve asetojenesis evresi asit oluşumu adı altında birlikte verilmektedir. Metan fermantasyon sürecinde, uçucu yağ asitlerinin üretimi için asidojenik çürütme ve uçucu yağ asitlerinin metan ve karbondioksite dönüşümü olmak üzere iki temel proses meydana gelmektedir (Sosnowski, 2003).

Karmaşık organik maddelerin anaerobik parçalanması bazı kaynaklarda genel olarak hidroliz, asit oluşumu ve metan oluşumu olmak üzere üç safhalı bir süreç halinde ele alınmaktadır (Demirer ve ark., 1997; Lastella, 2000; Björnsson, 2000; Solera ve ark., 2002; Dewil ve ark., 2007; Zaher ve ark., 2007):

- I) Hidroliz
- II) Yağ asitleri ve asetat oluşumu

III) Asetat, hidrojen ve CO₂'den CH₄ üretimi

Anaerobik parçalanma birçok adımdan oluşmaktadır. Anaerobik arıtımın basitleştirilmiş temel adımları Şekil 1.1.'de gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Anaerobik Arıtmada Temel Parçalanma Yolları (Van Haandel ve Lettinga, 1994; Björnsson, 2000; Metcalf&Eddy, 2003)

1.2.1.1. Hidroliz

Hidroliz bir çok fermantasyon prosesinde ilk adımdır. Karmaşık yapıdaki moleküllerin fermantasyon bakterileriyle hidrolize olabilen çözünebilir bileşiklere daha sonra basit yapılu moleküllere dönüştürülmesine hidroliz adı verilmektedir (Van Haandel ve Lettinga, 1994; Speece, 1995; Verma, 2002; Metcalf&Eddy, 2003; Ostrem, 2004; Buekens, 2005). Anaerobik parçalanmanın ilk adımı olan hidroliz aşamasında; selülaz gibi ekstra selular enzimlerle polisakkaritler, yağlar ve proteinler, şekerler, yağlar ve uzun zincirli asitlere dönüştürülmektedir (Lastella,

2000; Solera ve ark., 2002).

Hidroliz, hücre dışı enzimlerce gerçekleştirilen oldukça yavaş bir süreçtir. (Björnsson, 2000, Verma, 2002). Hidroliz anaerobik çürütmede hız belirleyici basamaktır (Van Haandel ve Lettiga, 1994; Speece, 1995; Öztürk, 1999; Vavilin ve Angelidaki, 2005; Park ve ark., 2005; Cirne ve ark., 2006; Dewil ve ark., 2007; Lopez ve Espinosa, 2007; Torres ve ark., 2007). Hidroliz basamağında hidroliz bakterileri rol almaktadır.

Hidroliz Bakterileri

Hidroliz bakterileri; uzun zincirli kompleks karbonhidratları, proteinleri, yağları ve lipitleri kısa zincirli yapıya dönüştürmektedirler (Björnsson, 2000; Verma, 2002; Metcalf&Eddy, 2003; Dewil ve ark., 2007). Hidrolizde mikrobiyal canlılar çok çeşitli ve karışıktır (Cirne, 2006). Enzimatik hidrolize katkıda bulunan mikroorganizmalar Çizelge 1.2.'de verilmiştir.

Çizelge 1.2. Enzimatik hidrolize katkıda bulunan mikroorganizmalar (İleri, 2000)

Hidroliz	Mikroorganizma
Protein Hidrolizi	E. Coli, Clostridia, S. Cerevisiae, küfler
Yağ Hidrolizi	Anaerobik bakterilerin çoğu, mayalar, küfler
Nişasta Hidrolizi	Clostridia, Bacillus, Aspergillus
Selüloz Hidrolizi	Trichoderma, Thermomonospora, Clostridia, Beyaz çürükçül fungus, küfler

Polisakkaritlerin Hidrolizi

Nişasta, selüloz ve glikojen önemli polisakkaritlerdir. Hayvansal kaynaklı bir polisakkarit olan selüloz kolay hidrolize olmamaktadır. Selüloz moleküllerinin zincir

uzunluğu 2000–6000 glikoz halkası olarak tahmin edilmektedir. Hemiselüloz ve pektinler, selülozun aksine karmaşık yapıdaki maddelerin heterojen karışımlarıdır. Polisakkaritler genel olarak anaerobik ortamda ayrışabilmektedirler. Polisakkaritlerin hidroliz yolu ile monosakkaritlere parçalanması sırasında görülen tam anaerobik fermantasyon şu reaksiyon ile gösterilmektedir;



Bu şekilde üretilen biyogazın % 50 oranında metan ihtiva etmesi beklenmektedir. Fakat karbondioksitin çözünürlüğü dikkate alınırsa metan içeriğinin daha yüksek olması mümkün olmaktadır (Gökçay, 2001).

Yağların Hidrolizi

Yağlar, suda çözünmeyen ancak organik çözücülerde çözünebilen heterojen organik bileşiklerdir. Genel formülleri;



Yağ asitleri β oksidasyonu ile ayrışmaktadırlar. β oksidasyonu ile asitin –COOH kökünden asetil grupları ardışık olarak ayrılarak asetik asit ve hidrojene dönüşmektedir. Anaerobik β oksidasyonu yolu ile doymuş ve 14 ile 18 karbonlu yağ asitleri önce asetata daha sonra da CO_2 ve CH_4 'e dönüştürülmektedir. Uzun zincirli yağ asitlerini asetata çeviren bakterilerin varlığı kesin olmakla birlikte bu güne kadar teşhis edilmeleri mümkün olamamıştır. Bütirik ve propiyonik asitler gibi kısa zincirli yağ asitlerini ayrıştıran bakteriler ise izole edilebilmektedir. Uzun zincirli yağ asitlerinin anaerobik süreçlerle asetata dönüştürülmesi sistemin gaz üretimi ve KOİ giderimi bakımından hız sınırlayıcıdır. Evsel atıklar, mezbahalar ve et paketleme tesislerinin atık suları yüksek miktarda yağ içermektedir. Yağ asitlerinin tam anaerobik ayrışması sonucu yüksek verimlerle biyogaz üretilebilmektedir. Stearik asitin tam anaerobik ayrışması aşağıdaki şu denklem ile denklemeyle ifade edilir (Gökçay, 2001);



Proteinlerin Hidrolizi

Proteinler, yirmi kadar doğal aminoasitin polimerleridir. Anaerobik fermantasyon öncesinde proteinlerin bünyesindeki azot, amonyak, asetat, propiyonat ve bütirat gibi belli başlı fermantasyon ürünlerine çevrilerek uzaklaştırılır. Anaerobik reaktörlerde proteinlerin mikroorganizmalarca gazlara ve amonyağa dönüştürülmesi süreci şu denklem ile ifade edilir (Gökçay, 2001);



Asitin hidrolizinde asitin cinsi, derişimi ve basıncı önemli parametrelerdir. Enzimatik hidroliz ise normal şartlarda (25 °C – 30 °C, 1 atm) oluşur ve daha özgül dönüşümler sağlamaktadır. Ancak asit hidrolizine göre daha yavaş ve pahalıdır (İleri, 2000). Bazı lifli organik maddeler çözünür hale dönüştürülemez. Dolayısıyla bu maddeler biyoreaktörde birikebilir veya reaktörden bozunmadan çıkabilir. Su ve inorganik maddeler de biyoreaktörde değişmeden birikebilir veya reaktörden çıkabilir. Sindirilmemiş organik maddeler koku problemi oluşturmaktadır. Uzun zincirli polisakkaritler monosakkaritlere, proteinler peptidlere ve aminoasitlere dönüşmektedirler. Selülöz ve lignin gibi karmaşık maddeler zor hidrolize olurlar veya hidrolize olmazlar. Bu tür maddelerin bozunma reaksiyon hızı çok düşüktür (Öztürk, 2005). Hidrolik aktivite, karmaşık yapıları organik atıklarda oldukça önemli ve hız sınırlayıcı bir etkidir. Bazı endüstriyel proseslerde, bu hız sınırlama hidrolizin verimliliğini artırmak için kimyasal madde kullanımıyla aşılır. Hidrolizin verimliliğini artırmak için kimyasallara başvurulmasıyla daha kısa zamanda çürütme ve daha verimli metan üretimi elde edilebilmektedir (Verma, 2002).

1.2.1.2. Asit Oluşumu

Anaerobik arıtmada ikinci adım asit oluşumudur. Uzun zincirli yağ asitleri ve aminoasitler, anaerobik oksitleyiciler ve fermantatif organizmalar tarafından substrat gibi kullanılırlar (Björnsson, 2000; Dewil ve ark., 2007). Fermantasyon olarak da adlandırılan asit oluşum sürecinde aminoasitler, şekerler ve bazı yağ asitleri parçalanarak fermentasyonun son ürünleri olan asetat, hidrojen (H₂), karbondioksit

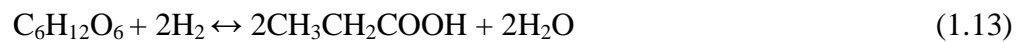
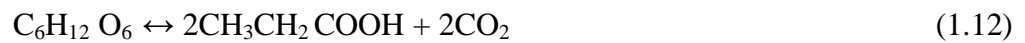
(CO₂), proporat ve bütirata dönüştürülürler. Proporat ve bütirat ilerde hidrojen (H₂) ve karbondioksit (CO₂)'e dönüştürülebilir. Bu fermantasyon son ürünleri metan oluşumunun habercileridir (Lastella, 2000; Metcalf&Eddy, 2003; Ostrem, 2004). Asit oluşumu basamağı asidojenesis ve asetojenesis olmak üzere iki basamakta ele alınmaktadır.

Asidojenesis

Aminoasitler şekerler ve yağ asitlerinin asidojenik bakterilerle organik asitler ve alkollere dönüştürülme evresine asidojenesis adı verilir (Van Haandel ve Lettiga, 1994; Björnsson, 2000; Juanga, 2005).

Hidroliz adımıyla oluşan çözünmemiş bileşikler fermantatif bakteri hücrelerinde dönüştürülür. Asidojenesisten sonra uçucu yağ asitleri, alkoller, laktik asit ve mineral bileşikler (karbondioksit, hidrojen, amonyak ve hidrojen sülfid) oluşur. Asidojenetik fermantasyon çoğunlukla zorunlu anaerobik olan bakteri gruplarıyla oluşur. Bazı fakültatifler oksidatif yolla organik maddeleri metabolize edebilirler (Van Haandel ve Lettiga, 1994). Biyogaz sistemleri gibi karmaşık organik maddelerin anaerobik çürütülmesi sırasında metan gazı üretiminde asetat ara anahtar konumundadır (Schmidt, 2000).

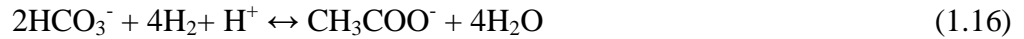
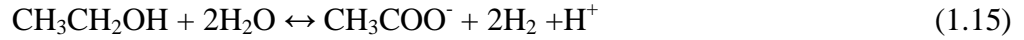
Asidojenesis adı verilen asit üretim aşamasında meydana gelen glikozun etanol ve propiyonata dönüşüm reaksiyonları aşağıda verilmektedir (Ostrem, 2004);



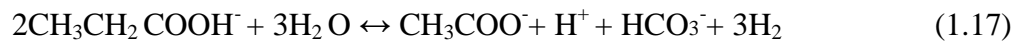
Asetojenesis

Asetojenesis evresinde ise organik asit ve alkoller, asetojenik bakteriler yardımıyla asetik asit, hidrojen ve karbondioksite dönüştürülmektedir (Van Haandel ve Lettiga, 1994; Björnsson, 2000; Juanga, 2005). Asetojenesis asidojenesisle birlikte tek bir adım olarak düşünülebilir. Biyolojik oksijen ihtiyacı ve kimyasal oksijen ihtiyacı bu yol ile azaltılır. Asetojenesis, asetatın ana ürün olduğu karbonhidrat

fermantasyonu ve diğer metabolik prosesler içinde oluşur. Asetojenesis adımı önemli reaksiyonlar; glikozun ve etanolün dönüşümü ve bikarbonatın asetata dönüşümüdür (Ostrem, 2004);



Hidrojen anaerobik parçalanma reaksiyonlarında büyük önem taşımaktadır. Lipidlerden hidroliz aşamasında oluşan uzun zincirli yağ asitleri; asetat, propiyonat ve hidrojen gazına oksitlenir. Normal şartlarda, çözeltide hidrojen yokluğunda oksidasyon engellenir. Reaksiyon, sadece çözeltideki hidrojen kısmi basıncı termodinamik dönüşüme izin verecek kadar düşük olursa ilerler. Hidrojen tüketen bakteri yokluğunda, termodinamik dengeyi sağlamak için kısmi basıncı düşürmek tüm asitlerin dönüşümüne yardımcı olur. Kısmi basınçla ölçülen hidrojen konsantrasyonu çürütücünün sağlıklı işleyişinde indikatör parametredir. Örneğin, propiyonatın asetata dönüşüm reaksiyonunun serbest enerji değeri +76,1 kJ'dur, böylece bu reaksiyon termodinamik olarak uygulanamaz. Asetat ve hidrojen bakteriler tarafından tüketildiği zaman, serbest enerji negatif olur. Genel olarak, H₂ üreten reaksiyonlarda reaksiyonun oluşması için hidrojenin düşük kısmi basınca sahip olması gereklidir. Propiyonatın asetata dönüşüm reaksiyonu;



denklemleri ifade edilmektedir (Ostrem, 2004).

Asit üretimi safhasında iki farklı bakteri grubu görev yapmaktadır. Birinci grup bakteriler (fermentatif ve asidojenik bakteriler), organik polimerlerin hidrolizinde ve bunun sonunda açığa çıkan oligomen ve monomerler gibi hidroliz ürünlerinin organik asit ve solventlere dönüştürülmesinde rol alırlar. Bazı asidojenik bakteri türleri (homoasetik bakteri), karbonhidratları kullanarak asetik asit üretirler. Diğer bir tür de belirli şartlarda H₂ üretir. Asetik asit bakterileri, çoğalmaları için gerekli enerjiyi organik asit ve solventlerin asetik asit, H₂ ve CO₂'e parçalanması

sonucu açığa çıkan enerjiden sağlarlar. Termodinamik sebeplerle asetik asit bakterileri sadece H₂ kullanan mikroorganizma alt grupları ile birlikte yaşarlar. Asetik asit bakterileri aynı zamanda H₂ üreten asetojenik bakteriler olarak da bilinmektedir (Öztürk, 1999; Gökçay, 2001). Asit oluşturuçu bakteriler, çözünmüş organik maddeleri asetik asit başta olmak üzere uçucu yağ asitleri, hidrojen (H₂) ve karbondioksit (CO₂) gibi daha küçük yapılı maddelere dönüştürürler (Verma, 2002; Metcalf&Eddy, 2003; Sorensen, 2004). Asit oluşturan bakteriler anaerobiktirler ve asidik şartlarda büyürler. Asetik asit gibi uçucu yağ asit bakterilerinin büyümesi ve çoğalması için oksijene ve karbona ihtiyaçları vardır. Bakteriler çözeltildeki bağlı haldeki oksijeni kullanarak büyüme ve çoğalmalarını sağlarlar. Asit oluşturuçu bakteriler, metan oluşturuçu bakteriler için anaerobik şartlar oluştururlar (Sorensen, 2004). Asit oluşturan mikroorganizmalar ve oluşturdıkları asitler Çizelge 1.3.'de verilmektedir.

Çizelge 1.3. Asit oluşturan mikroorganizmalar ve oluşturdıkları asitler (İleri, 2000)

Mikroorganizma	Asit
E. Coli, E aerogenes	Formik, asetik, butandiol, asetoin, CO ₂ , H ₂
Clastridia	Valerik, bütirik, bütanol, aseton, CO ₂ , H ₂
Propionibacteriae	Propiyonik, CO ₂ , H ₂
Lactobacillus, Streptococcus, Leuconoctoc	Lactic, etanol, CO ₂
Sacharomyces sp.	Etanol, CO ₂

Anaerobik reaktörlerin işletmeye alınması safhasında uçucu yağ asidi konsantrasyonunun 1000–1500 mgHAc/L' den fazla olması istenmemektedir. Asit üretim aşamasında; hidroliz ürünleri asetik asite veya reaktördeki kararlı işletme

şartlarının olmaması halinde; propiyonik, butirik, izobutirik, valerik ve izovalerik asit gibi ikiden fazla karbonlu yağ asitlerine dönüştürülmektedir. Kararlı anaerobik arıtmada yağ asitleri konsantrasyonu oldukça düşük seviyelerde bulunmaktadır (100–300 mg HAc/L) (Öztürk, 1999).

Asit oluşumu evresi genellikle hızlıdır (Björnsson, 2000). Asit üretim hızı metan üretim hızına göre daha büyüktür. Organik madde konsantrasyonundaki ani artışlar asit üretiminin artmasına ve pH düşmesine neden olmaktadır. Buda metan bakterileri üzerinde inhibasyon etkisi yapmaktadır (Gökçay, 2001).

Sistemde serbest enerji değişimi; bütirat, asetat, propiyonat ve sistemde düşük konsantrasyonda bulunması gereken hidrojenin dönüşümüyle alakalıdır. Aksi takdirde reaksiyon ilerlemeyecektir (Metcalf&Eddy, 2003). Organik atıkların fermantasyonunda asetik asit temel üründür. Uçucu yağ asitlerinin aşırı üretimi organik asitlerin fermantasyonuna toksik etki yapabilir (Elango ve ark., 2007).

Sülfat gideren bakteriler özellikle metan üretimini çeşitli şekillerde etkileyebilmektedir. Bu etki düşük SO_4^{2-} konsantrasyonlarında belirgin olmamaktadır. Bu bakteriler bazı organik asit ve alkollerini asetik asite oksitlemelerinin yanısıra sülfatları da H_2S 'e dönüştürmektedirler. H_2S , metan bakterileri için gerekli bir besin kaynağı olması nedeniyle H_2S 'ün başka kaynaklardan karşılanmaması halinde ortamdaki sülfatın kullanılması gerekmektedir. Sülfat giderimi sonucu çok yüksek SO_4^{2-} konsantrasyonlarında, H_2S konsantrasyonu metan bakterileri için zehirli olabilecek seviyelere ulaşabilmektedir. Bu durumda sülfat gideren bakteriler metan bakterileri ile H_2 için rekabete girebilirler. Sülfat gideren bakteriler ortamda yeterince SO_4^{2-} olmaması durumunda asetik asit üreten bakteriler gibi H_2 üretecek tarzda faaliyet gösterebilmektedir. Çözünmüş organik madde konsantrasyonundaki artış asit üretiminin artması sonucu sistemde asit birikimine yol açmaktadır. Böyle bir durum, sonraki adım olan metan üretimi aşamasında inhibasyona neden olabilmektedir. Asit üretimiyle birlikte protein ve aminoasitlerin ayrışmasından NH_4^+ da açığa çıkmaktadır. Amonyum konsantrasyonu genelde anaerobik parçalanmada inhibasyona sebep olacak seviyede bulunmamaktadır. Fakat azotça zengin endüstriyel atık sularda probleme neden olmaktadır (Öztürk, 1999; Gökçay, 2001). Anaerobik arıtmada çözünmüş oksijenin

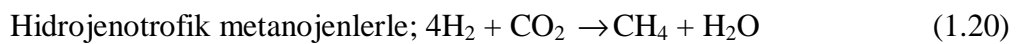
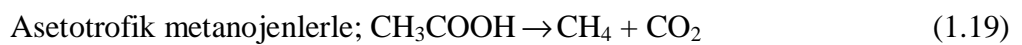
metanojenler gibi zorunlu anaerobik mikroorganizmalara toksik etki yapabileceği göz önünde bulundurulmalıdır (Van Haandel ve Lettiga, 1994).

1.2.1.3. Metan Oluşumu

Anaerobik arıtımın üçüncü adımı olan metan oluşum evresi metanojenler olarak bilinen mikroorganizma grubuyla gerçekleştirilir. Metan oluşum adımı genellikle proste hız sınırlayıcı adımdır. Metan, asetattan veya asetotrofik ve hidrojenotrofik bakterilerin hidrojeni kullanarak karbondioksidin indirgenmesiyle üretilmektedir (Verma, 2002; Zaher ve ark., 2007).

İki grup metanojenik organizma metan üretiminde rol almaktadır. Birinci grup asetotrofik metanojenler olarak adlandırılır. Bu metanojenler asetati, metan ve karbondioksite ayırırlar. Böylece asetotrofik metanojenler karmaşık moleküllerin biyogaza dönüştürülmesine bağlı olarak genellikle hız sınırlayıcıdır (Van Haandel, 1994).

İkinci grup metanojenler, hidrojenotrofik metanojenler olarak adlandırılırlar. Bunlar da hidrojeni elektron verici, karbondioksiti ise elektron alıcı gibi kullanarak metan üretirler. Anaerobik proseslerdeki asetojenler olarak adlandırılan bakteriler de karbondioksiti kullanarak hidrojen ve asetik asit formuna okside edebilirler. Anaerobik çürütmede üretilen metanın çoğu asetik asitten oluştuğu için hidrojen kullanan metanojenler ikincil önem arz ederler (Metcalf&Eddy, 2003). Hidrojen atık arıtımında kontrol parametresidir. Hidrojen kullanan metanojenler anaerobik çürütme proseslerinde en hızlı büyüyen mikroorganizmalardır. Hidrojenotrofik metanojenler için en az ikilenme zamanı yavaş büyüyen asetolastik metanojenlerin 2,6 gün olmasıyla karşılaştırıldığında 6 saat olarak tahmin edilmektedir. Hidrojen kullanan metanojenler, bazı kolay hidrolize olabilen atıkların anaerobik parçalanmalarında çevre koşullarının değişikliğine, hız sınırlayıcı olan asetolastik metanojenlerden daha duyarlıdır (Björnsson, 2000).



Denklemlerde iki tür metanojenler vasıtasıyla metan oluşumu görülmektedir. Hidrojen ve karbondioksitten metan üreten bakteriler asetat kullananlardan daha hızlıdır (Van Haandel, 1994). Methanosarcina ve Methanosaeta mikroorganizmaları asetatın metana direk dönüşümünde rol alırlar (Schmidt ve ark, 2000).

Metan oluşturucu bakteriler, asetik asitlerini parçalayarak ve hidrojen ile karbondioksit sentezi sonucu biyogaza dönüştürürler. Anaerobik koşullarda üretilen metanın % 70'i ise asetik asit'in parçalanmasından ve yaklaşık % 30'u ise hidrojen gazı ile karbondioksit gazından oluşmaktadır. Tüm çözünen organik bileşikler ve uçucu organik asitler biyogaza dönüşmemektedir. Bazı organik maddeler arıtılmadan sistemden atılabilir. Metan oluşturucu bakterilerin kullanılabilecekleri besin maddeleri oldukça sınırlıdır. Bunlar; asetik asit, hidrojen (H₂) ve tek karbonlu bileşiklerdir (Öztürk, 2005). Ortamda yeterli miktarda H₂, CO₂ bulunduğu ve H₂'nin kısmi basıncı da uygun olduğu sürece hidrojenotrofik metanojenlerle CH₄ üretimi devam eder. Ancak metan üretimi adımının her zaman hız sınırlayıcı olması söz konusu değildir, bazen hidroliz safhası daha kritik olabilir. Grup halinde metan bakterilerinin kullanılabilecekleri besin maddeleri olan H₂, asetik asit ve tek karbonlu bileşikler sınırlı olabilir. Sulu ortamlardaki dip çamurları ve evsel çamur çürütme tesislerindeki CH₄'nin % 70 asetik asitin metil grubundan, geri kalanı ise CO₂ den üretilmektedir (Öztürk, 1999; Gökçay, 2001). Metanojenler sıcaklık değişimlerine duyarlıdır. İyi işletilen çürütücülerde, metanojenler pH 6,8–7,4'de optimum faaliyet gösterirler (Elango, 2007).

1.2.2. Anaerobik Parçalanmayı Etkileyen Faktörler

Anaerobik arıtmaya etki eden temel faktörler; sıcaklık, pH, nutrientler, toksisite ve hidrolik bekletme süresidir.

1.2.2.1. Reaktör Sıcaklığı

Anaerobik çürütme, diğer biyolojik prosesler gibi büyük oranda sıcaklığa bağlıdır. Çürütme proseslerinin dönüşüm hızlarıyla alakalı olarak, 35–40 °C arası

mezofilik ve yaklaşık 55 °C de termofilik sıcaklık aralığı vardır. Sıcaklığın hıza ve anaerobik çürütücünün boyutuna etkisi birçok araştırmacı tarafından gözlenmiştir (Van Haandel, 1994). Termofilik sıcaklık 50–65 °C arasında olmasına rağmen gerekli bekleme zamanını azaltmak için daha yüksek sıcaklıklarda da çalışmalar yapılır (Themelis, 2002; Juanga, 2005). Metanojenik bakteriler çok yüksek ve çok düşük sıcaklıklarda aktif değildirler. Bakterilerin aktif oldukları sıcaklık aralıkları vardır. Bakteriler için optimum sıcaklık aralığı 30–40 °C'dir (Elango, 2007). Sıcaklık artışı ile biyokimyasal reaksiyonlar ve mikroorganizmaların büyümesi artmaktadır. Anaerobik canlılar, mezofilik ve termofilik şartlarda daha aktiftirler. Biyoreaktörlerde biyokimyasal reaksiyon esnasında aşağıdaki sıcaklık aralıkları korunmalıdır (Yadvika ve ark., 2004);

Psikofilik sıcaklık aralığı < 30 °C,

Mesofilik sıcaklık aralığı 30 °C – 40 °C

Termofilik sıcaklık aralığı 50 °C – 60 °C

Biyoreaktör sıcaklığı 22 °C nin üzerinde tutulduğu zaman daha iyi performans sağlanır. Biyoreaktör sıcaklığı 22 °C nin altına düştüğü zaman biyogaz üretimi düşer. Bu sıcaklıkta biyogaz tesisinin işletilmesi ekonomik değildir. Çevre sıcaklığı 10 °C'nin altına düştüğünde gaz üretimi durmaktadır (Öztürk, 2005).

Yüzey gerilimi, viskozite, kütle transferi ve yüksek parçalanma hızı gibi fiziksel parametreler termofilik şartlarda değişiklik göstermektedir. Bunun nedeni termofilik şartların mezofilik şartlara göre daha kararsız olmasıdır (Björnsson, 2000; Juanga, 2005).

Biyokimyasal reaksiyonlarda metan üretim hızı, sıcaklık artışı ile artar. Termofilik sıcaklıklarda mezofilik sıcaklıklara göre biyokimyasal reaksiyonlar daha hızlı gerçekleşmektedir. Termofilik şartlarda metan üretim hızı mezofilik şartlara göre daha fazladır. Dolayısıyla reaktör hacmi mezofilik şartlara göre yarı yarıya daha küçüktür. Termofilik şartlarda mezofilik şartlara göre aynı hidrolik bekleme süresinde daha yüksek organik yükleme yapılabilir. (Juanga, 2005; Zaher ve ark., 2007). Mezofilik şartlarda çürüme sonucu oluşan katı madde miktarı termofilik şartlara göre daha fazladır (Zaher ve ark., 2007). Biyoreaktörü termofilik şartlarda çalıştırmak için ilave ısıya ihtiyaç vardır. Yüksek sıcaklıkta çalışıldığı zaman serbest

amonyak miktarının sıcaklık artışı ile arttığı unutulmamalıdır. Bu da biyoreaktör performansını olumsuz yönde etkileyerek verimliliği azaltabilir (Öztürk, 2005). Son yıllarda yapılan çalışmalar anaerobik parçalanmanın 65 °C sıcaklıkta hidrolik aktiviteyi arttıracığını bildirmektedir (Hartmann ve Ahring, 2005).

Biyoreaktörlerde biyokimyasal reaksiyon esnasında psikofilik, mezofilik ve termofilik sıcaklık aralıklarında meydana gelebilecek ısı değişim miktarları aşağıda görülmektedir (Gökçay, 2001; Gülen, 2005);

Psikofilik şartlarda ± 2 °C /saat

Mezofilik şartlarda ± 1 °C/saat

Termofilik şartlarda $\pm 0,5$ °C/saat

Biyoreaktörlerde sıcaklığın ani olarak değişmesi bakterilerin faaliyetlerini olumsuz yönde etkiler. Özellikle metan oluşturuucu bakterilerin sıcaklık değişimine karşı çok hassas olması biyokimyasal reaksiyonu yavaşlatmaktadır (Yadvika ve ark., 2004). Biyogaz üretim tesisinin ısısından faydalanılarak reaktörün sıcaklığı sabit tutulabilir. Reaktörler, atmosferik sıcaklık değişiminden en az düzeyde etkilenecek şekilde zemin altına yapılır. Biyoreaktörler yeraltında kurulduğu zaman gece ile gündüz arasındaki sıcaklık değişimi büyük ölçüde önlenir. Tesisler mümkünse yerden bir metre derinlikte kurulmalıdır. Mikroorganizmalar kısa süreli sıcaklık değişikliğine karşı dayanıklıdır. Küçük reaktörlerin birçoğu mezofilik şartlarda çalıştırılmaktadır. Buradaki uygun sıcaklık değeri 35 °C'dir. Reaktör ısısının korunması ve reaktörlerin çevresel şartlardan en az düzeyde etkilenmesi için yalıtılmasında yarar vardır. Birçok Avrupa ve A.B.D'deki tesislerde reaktörler yalıtılmaktadır (Öztürk, 2005).

Anaerobik çürütücüde sıcaklığın etkisi prosesin hızıyla sınırlı değildir. Sıcaklık hidroliz hızını ve anaerobik çürütücünün boyutunu etkilemektedir. Organik madde parçalanmasında küçük oranlardaki düşüş hidroliz hızına bağlı olabilir. (Van Haandel, 1994). Anaerobik parçalanmada termofilik şartların, çürütme hızında artış ve uygun stabilizasyon gibi avantajları vardır (Sosnowski, 2003).

Rao ve ark 2000 yılında yaptıkları 'Evsel katı atıkların organik kısımlarının biyoenerjiye dönüşüm çalışmaları' adlı çalışmasında 26 ± 4 °C' de katı atıklardan üretilen biyogazın verimini $0,661 \text{ m}^3/\text{kg UK}$ bulmuşlardır.

Maranon ve ark. 2005 yılında çürütülmüş çamurun mezofilik şartlarda anaerobik parçalanmasıyla biyogaz üretimini 0,29 m³/gün ve metan içeriğini ise % 70–75 arasında bulmuşlardır.

Hartman ve Ahring 2005 yılında yaptıkları çalışmada evsel katı atıkların anaerobik çürütülmesinde hipertermofilik sıcaklık uygulamışlardır. Hartman ve Ahring 65 °C anaerobik çürütme işlemi sonucunda metan gazı verimini 640–790 m³/ton UK bulmuşlardır. Sistemin ön işlemlerli çürütme sistemlerine göre daha düşük organik yükleme ve daha küçük reaktör gereksinimi gibi avantajları olmasına rağmen bu sistem daha önce fazla çalışılmamıştır (Hartman ve Ahring 2005).

Angelidaki ve ark 2006 yılında yaptıkları çalışmada evsel katı atıkların organik kısımlarının anaerobik parçalanma prosesinde, 5–65 °C arasındaki sıcaklıklarda metan üretimini gözlemlemişlerdir. 45 °C’ de en yüksek metan gazı verimini 0,58 m³/kg/UK bulmuşlardır. Angelidaki ve ark. termofilik reaktörden alınan aşısı bakteri ile yapılan çürütmede (45 °C) aşısı bakterinin daha iyi adapte olduğunu bildirmişlerdir.

Davidsson ve ark 2007 yılında yaptıkları çalışmada evsel içerikli organik katı atıkların parçalanmasında mezofilik sıcaklıkların problem olmadığını gözlemlemişlerdir.

Yılmaz, Yüceer ve Başbüyük (2008) yaptıkları çalışmada kâğıt fabrikası atıklarının mezofilik ve termofilik şartlarda anaerobik filtrelerin performansını karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlarda çürütücünün performansının termofilik şartlarda mezofilik şartlara göre daha iyi olduğunu bildirmişlerdir.

1.2.2.2. Bekleme Süresi

Bekleme süresi, atık içindeki organik maddelerin bakteriler tarafından çürütülmesi sonucu biyogaz üretmesi için gerekli olan süre olarak tarif edilmektedir. Bu aşağıdaki denklemle ifade edilmektedir (Verma, 2002);

$$BeklemeSüresi = \frac{reaktörhacmi}{günlükdebi} = \frac{m^3}{(m^3 / gün)} \quad (1.21)$$

Hammaddenin çürütücüde kaldığı zaman dilimi alıkonma veya bekleme süresi olarak tanımlanmaktadır. Reaksiyona giren madde parçalanma işlemi tamamlanincaya kadar geçen sürede reaksiyonun gerçekleşmesi için uygun koşullarda bekletilir. Reaksiyonun hızı, ancak bekletme süresinin artmasıyla azalmaktadır. Reaksiyonun tamamlanması için optimum zaman, en az maliyetle en iyi çürütmenin sağlandığı süredir. En uygun zaman; reaksiyona giren madde içeriği, proses sıcaklığı, çevre koşullarına ve kullanılan çürütücünün tasarımına bağlıdır. Bekleme süresinin bulunması için tüm bu faktörler göz önünde bulundurulmalıdır. Bekleme zamanı, belirli bir çürütücüde çürütücüye giren maddenin değişmesiyle gündün güne veya sıcaklığın değişmesiyle mevsimden mevsime değişebilir. Birçok kuru proses için bekleme zamanı 14–30 gün arasındadır. Sıvı içeriği fazla olan çamurlar için bekleme zamanı ise 3 güne kadar olabilir. Bekleme zamanının azaltılması tesisin ilk yatırım masraflarını azaltmaktadır. Çünkü daha kısa sürede çürümenin tamamlanmasıyla reaktör hacmi başına daha yüksek üretim hızı oluşur. Bu iki etki reaktörün tasarlanmasında dengede olmak zorundadır. Bekleme süresini düşürmek için sürekli karıştırma yapılır ve katı içeriği az olan çamurlar kullanılır (Ostrem, 2004).

Mezofilik çürütücülerde atık parçalanması için bekletme zamanı 10–40 gün arasındadır. Termofilik şartlarda işletilen yüksek katı içeren reaktörde, bekleme zamanı 14 gündür (Verma, 2002). Reaktör içindeki bazı organik maddeler tam olarak biyokimyasal reaksiyona girdiğinde, zamanla gaz üretimi azalmaya başlar. Seçilen bekleme süresi içinde besi maddelerinin % 70–80 oranında biyokimyasal reaksiyona girerek bertaraf olduğu kabul edilir (Öztürk, 2005). Biyogaz tesislerinde işletme sıcaklığına bağlı olarak bekleme süresi 20 ile 120 gün arasında değişebilmektedir. Tropikal bölgelerde bekleme süresi 40–50 gündür. Çin'in soğuk bölgelerinde bu süre yaklaşık 100 gündür. Sürekli beslemeli sistemlerde, bakterilerin reaktörlerden kaçmasını önlemek ve bakterilerin iki katına çıkmasını sağlamak için bekleme süresi daha uzun seçilebilir (Öztürk, 2005). Reaktör sıcaklığı arttıkça bekleme süresi düşer. Yüksek sıcaklıkta biyokimyasal reaksiyonlar daha kısa sürede gerçekleşir (Speece, 1995).

Yüksek verimlilikte biyogaz üretimi için yeni ve etkili prosesler geliştirilmelidir. Bazı bakterilerin büyüme hızları düşük olduğu için bekleme zamanı bu problemi çözmek için uygun olmalıdır. Fakat uygun bekleme zamanı belirlenirken reaktördeki aktif biyokütlenin atılması önlenmelidir (Björnsson, 2000).

Singh ve ark. 1984 yılında yaptıkları sığır atıklarının günlük beslemeli anaerobik çürütücüde çürütülmesi çalışmasında atıktaki katı içeriğinin artmasıyla optimum bekleme hızının da arttığını bildirmişlerdir.

Solera ve ark. 2002 yılında iki aşamalı anaerobik çürütücüde asetojenik reaktörde 4 ve 1,7 gün bekleme sürelerinde yaptıkları çalışmada 4 günlük bekleme süresinde toplam mikrobiyal popülasyonun daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir.

Elango ve ark. 2007 yılında yaptıkları çalışmada; domates atıklarıyla yapılan anaerobik proste bekleme süresinin organik yükleme hızı ve sıcaklığa bağlı olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Yılmaz, Yüceer ve Başbüyük (2008) yaptıkları çalışmada; kâğıt fabrikası atık sularının anaerobik filtrelerin performansını, 6–24 saat bekleme sürelerinde karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlarda, metan gazı üretiminin 6 saat bekleme süresinde en fazla olduğunu bildirmişlerdir.

1.2.2.3. Organik Yükleme Hızı

Organik yükleme hızı, birim hacim (m^3) biyoreaktörlere günlük olarak beslenen organik madde miktarı olarak tarif edilmektedir. Organik yükleme hızı anaerobik parçalanmada diğer kontrol parametreleri gibi önemli bir parametredir (Zaher ve ark., 2007).

Yüksek organik yükleme hızında daha fazla bakteriye ihtiyaç duyulmaktadır. Anaerobik çürütücüde maksimum organik yükleme hızı; reaktör tasarımı, biyokütle elde edilmesi ve biyokütle aktivitesi gibi parametrelere bağlıdır. Speece (1996) organik yükleme hızına etki eden çeşitli faktörleri;

- 1) Anaerobik reaktörde alıkonulan yaşayabilecek durumda olan biyokütle
- 2) Giren atık su ve alıkonulan biyokütle arasındaki kütle transferi
- 3) Metabolizma ve hidrojen arasındaki biyokütle yakınlığı şeklinde sıralamıştır.

Anaerobik parçalanmada mümkünse uygun değerdeki organik yükleme hızı korunmalıdır. Sistemde organik yükleme hızı yüksek olduğunda biyoreaktör içinde asit birikmesi olur ve pH düşer. pH'ın düşmesi metanojenik bakterilerin faaliyetlerini olumsuz yönde etkiler. Organik yükleme hızı düştüğü zaman gaz üretim hızı da düşer (Öztürk, 2005). Reaksiyon hızını etkileyen en önemli faktör; pH, sıcaklık ve çamur yaşı (mikroorganizma bekleme süresi)'dir (Öztürk, 1999). Genellikle çürütücüde oluşan hatalar yüksek organik yükleme hızlarında meydana gelir (Vavilin ve ark., 2006).

Singh ve ark. 1984 yılında yaptıkları çalışmada sığır atıklarının günlük beslemeli anaerobik çürütücüde çürütülmesi çalışmasında atıktaki katı içeriğinin artmasıyla yükleme hızının da arttığını bildirmişlerdir.

Vavilin ve Angelidaki (2004), anaerobik parçalanmada farklı katı atıklar ve farklı karıştırma hızlarında yaptıkları çalışmada; organik yükleme hızı ve karıştırma hızının yüksek olması ile asidifikasyon sürecinin zarar gördüğünü bildirmişlerdir. Düşük karıştırma hızı da sistemin verimini düşürebilmektedir. Bununla birlikte yükleme hızı düşük olduğunda karıştırma hızının prosese önemli etkisi olmadığını belirtmişlerdir.

1.2.2.4. Toplam Katı Miktarının Yükleme Hızına Oranı

Düşük katı içeren sistemlerin toplam katı miktarı % 10'dan az, orta katı içerenlerin % 15–20 arası ve çok miktarda katı içerenlerde ise % 22–40 arasındadır. Reaktördeki toplam katı artışıyla reaktör hacmi azalır. Organik yükleme hızı, anaerobik çürütme sistemlerinin biyolojik dönüşüm kapasitesinin ölçümüdür. Sürekli yüklemeli çürütücünün içerisinde yağ asitleri gibi zehirleyici maddelerin birikmesiyle düşük biyogaz verimi elde edilebilir. Bu sebeple sistemdeki besleme hızı azaltılır. Organik yükleme hızı sürekli sistemlerde oldukça önemli bir kontrol parametresidir. Birçok sistemde aşırı yükleme hataları görülebilir (Verma, 2002).

Maksimum metan üretimi ve en iyi organik madde parçalanma oranına, düşük katı madde içeriği ve termofilik şartlarda ulaşılabilmektedir. Yüksek katı madde içeriğinde proses zehirlenebilir (Angelidaki ve ark., 2006).

1.2.2.5. pH ve Tamponlama Kapasitesi

Anaerobik reaktörde pH'ın kararlılığı ve değeri çok önemlidir. Anaerobik fermantasyonda pH, mikroorganizmaların büyümesine etki eden önemli bir parametredir. Çürütücünün pH aralığı 6,8–7,2 arasında tutulmalıdır (Yadvika ve ark., 2004). Metan oluşturuucu bakteriler nötr veya hafif alkali ortamda yaşarlar. pH değeri 6,3'den düşük veya 7,8'den büyük olduğunda metanojenlerin sayısı azalır. Asitojenler düşük veya yüksek pH değerlerine az duyarlıdır. Bu sebeple fermantasyonda metanojenik fermantasyon baskındır (Van Haandel, 1994). Anaerobik proste karbondioksit ve uçucu yağ asitlerinin üretimi çürütücünün pH'ını etkiler. Anaerobik fermantasyonda uçucu yağ asitlerinin normal konsantrasyonunda asetik asit 2000 mg/L'nin altında olmalıdır. Metan üretim veriminin %75'den fazla olması için pH 5'in üzerinde olmalıdır (Yadvika ve ark., 2004).

Anaerobik bakteriler, özellikle metanojenler çürütücü içerisindeki asit konsantrasyonuna duyarlı olduklarından büyüme asidik şartlarda inhibe olabilir. Asit konsantrasyonu; pH değeri ve hidrojen iyonları konsantrasyonu ile alakalıdır. Suyun doğal şartlarda, hidrojen iyonları konsantrasyonu 10^7 ve pH 7'dir. Alkali çözeltilerinde pH 7'den fazlayken asit çözeltilerinde pH 7'dir. Asit oluşumu ve metan oluşumu proseslerinde çürütme esnasında uygun proses kontrolü için farklı pH değerlerine ihtiyaç vardır. Çürütücüdeki bekleme zamanı pH'ı etkiler ve kesikli reaktörde asit üretimi hızlanır. Asit üretim aşamasında pH 5'in altına düştüğünde çok miktarda organik asit birikmesi meydana gelir. Aşırı asit üretiminde metanojenler asidik ortama duyarlılıkları nedeniyle zehirlenebilirler. pH azalması, kireç eklenmesi ve çökelti arıtımı sırasında görülen geri dönüşümlü filtreyle kontrol edilebilir. Bu durumda geri dönüşümlü filtre kireç gereksinimini dahi giderebilir. Çürütücüde metan oluşumu evresinde amonyağın konsantrasyonu artar ve pH değeri 8'in üzerine çıkabilir. pH seviyesi 7,2–8,2 aralığında olduğu zaman metan üretimi kararlıdır (Verma, 2002).

Asetojenik bakteriler için uygun değer pH 6, metanojenler için ise pH 7 civarındadır. Uygun pH değeri anaerobik sistemin kontrolü ve başarılı işletimi için

önemlidir. Uçucu yağ asitlerinin birikmesi işletmede sıklıkla görülen bir problemdir. Tamponlama kapasitesi uygun olmadığı zaman pH azalmaktadır. Bu problemin çözümü için beslenmenin durdurulması ve tamponlama kapasitesinin artırılması gerekmektedir. Fakat bu yolun pahalı olması nedeniyle uygun proses tasarımı ve işletimiyle uçucu yağ asitlerinin birikmesine engel olunabilir (Björnsson, 2000). pH diğer parametreleri de etkilediğinden kontrol altında tutulmalıdır (Gülen, 2005).

pH 7,0 ve 8,0'de, çözülmüş karbondioksit (CO_2) iyon formundaki bikarbonat (H_2CO_3^-) halinde ortamda baskındır. Basınç arttıkça daha fazla CO_2 reaktördeki gaz fazından sıvı faza geçerek çözünür ve pH düşüşüne neden olur. İki fazlı arıtmada uçucu yağ asitlerinin biyogaza dönüşümü sırasında pH kontrolü daha fazla alkali temini ile karşılanabilir. pH 5,5'in üzerinde iyonik formda baskın olarak 1–4 karbonlu asitler vardır ve kimyasal olarak CH_4 ve CO_2 'e metabolize olmadan önce proton formunda olma gerekliliğinden dolayı, bir mol monoproitik asitin biyogaza dönüşmesi sırasında bir mol hidroksit serbest kalır (Öktem ve Sivri, 2005).

Yılmaz, Yüceer ve Başbüyük (2008) yaptıkları çalışmada; kâğıt fabrikası atık sularının arıtılmasında kullanılan anaerobik filtrelerin performansını farklı bekleme sürelerinde mezofilik ve termofilik şartlarda karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlarda 6 saat bekleme süresi sonunda en iyi gaz üretiminin görüldüğü termofilik şartlarda pH'ı 7,3 olarak ölçmüşlerdir.

1.2.2.6. C/N Oranı

Hayvan gübreleri, insan atıkları, mutfak atıkları gibi besi maddelerinin tümü belli oranlarda karbon, azot ve oksijen içerirler. Anaerobik bakterilerin enerji ihtiyacının karşılanması için organik maddelerdeki karbon gereklidir. Karbondan başka en önemli besi maddeleri azot ve fosfordur. Azot bakterilerin büyümesi ve çoğalması için önemlidir. Verimli bir biyolojik parçalanmada, azot, fosfor ve iz elementler gibi besi maddelerine ihtiyaç vardır. En iyi C/N/P oranı 100/28/6'dır (Björnsson, 2000).

Karbon ve azot oranı anaerobik çürütme prosesinin performansını tanımlamaktadır. Anaerobik proseslerde limit faktördür. Karbon mikroorganizmalar

için kaynak oluşturur ve azot mikroorganizmaların büyüme hızını artırır. Azot miktarı sınırlı ise mikroorganizma popülasyonu azalır ve karbonun ayrışması uzun zaman alır. Mikroorganizmaların ihtiyacı dışındaki aşırı azot genellikle amonyak gazı olarak prosesten kaybedilir. Çürütücüdeki bakteriler karbonu azota göre 30–35 kat daha fazla parçalarlar. Ham materyalde karbon azot oranı 30/1'dir (Igoni ve ark., 2008).

Besi maddesinde azot bulunmasının faydaları; aminoasitlerin, proteinlerin ve nükleik asitlerin sentezi için gerekli elementi sağlaması ve amonyağa dönüşen azotun uçucu yağ asitlerini tamponlayarak pH'ın düşmesini önlemesidir. Metan oluşturucu bakterilerin büyümesi için uygun pH şartlarının sağlanması önemlidir. Biyoreaktörde bulunan farklı bakteriler besi maddesinde bulunan bileşikleri kullanılırlar. Sistemde C/N oranı bakterilerin metabolik işlemlerini gerçekleştirebilmeleri için uygun olmalıdır. Optimum çürüme için C/N oranı 23/1'den büyük olmaması gereklidir. C/N oranı 10/1'den küçük olduğunda bakterilerin büyümesini engellemektedir. Hayvan gübresinde azot (N) kaynağı idrardır. Hayvan atığı içinde 5000 mg/L azotun bulunması biyokimyasal reaksiyon üzerine olumsuz etki yapmadığı deneysel çalışmalarda gözlenmiştir. Organik madde içinde azot 8000 mg/L ise azot amonyak azotuna dönüşmektedir. Bu engelleyici etkide en önemli rolü amonyum iyonu yerine serbest amonyak azotu oynamaktadır. Serbest amonyak azotunun, özellikle hidrojen ile karbondioksit gazlarından metan gazı üretiminde azaltıcı etkisi vardır. Asetattan metan oluşumunda ise amonyağın etkisi azdır. Hidrojen tüketiminin engellenmesi, propiyonik asitin parçalanmasını zorlaştırmaktadır. Buda metanojenik bakterilerin tükettiği asetatların engellenmesine neden olmaktadır (Öztürk, 2005).

Karbon ve azot arasındaki ilişki C/N oranıyla bulunur. Anaerobik çürütücüde optimum C/N oranı 20/30'dur. Yüksek C/N oranı metanojenlerde azotun tüketim hızının belirleyicisidir. Yüksek C/N oranında az miktarda gaz üretimi görülür. Diğer yandan, düşük C/N oranı metanojen bakterilere zehirleyici etki yapan pH 8,5 değeri üzerinde amonyak birikmesiyle sonuçlanır (Verma, 2002). Sebze meyve ve market atıklarının C/N oranı ve su içeriği (> %80) yüksektir (Lastella, 2002).

Rao ve ark 2000 yılında yaptıkları çalışmada çürütülmüş çamurun C/N oranını 9,6 bularak çamurun toprak şartlandırıcı olarak kullanılabileceğini bildirmişlerdir.

1.2.2.7. Toksisite

Anaerobik parçalanmada her madde bazı konsantrasyonlarda zehirleyici olabilmektedir. Anaerobik parçalanmada ağır metaller, oksijen, mineral iyonlar, sülfid, kısa zincirli organik asitler ve diğer organik asitler mikroorganizmaların büyümelerini engelleyerek toksik etki yapabilirler (Hwu ve ark., 1997; Björnsson, 2000). Anaerobik parçalanmada; sodyum, potasyum, kalsiyum, magnezyum, amonyum ve kükürt gibi minerallerin az miktarda bulunması bakterilerin büyümelerini geliştirirken, fazla miktarlarda buldukları zaman toksik etki yaparlar. Ağır metal zehirlenmesi birçok anaerobik proste problemidir. Çinko, bakır, nikel, krom, kurşun gibi ağır metaller çok az miktarlarda mikrobiyal büyümeyi önemli ölçüde arttırırken, yüksek konsantrasyonlarda ise toksiktirler (Karri ve ark., 2005; Zaher ve ark., 2007; Elango ve ark, 2007). Anaerobik parçalanmaya etki eden birçok çözülmüş zehirleyici, yavaşlatıcı, engelleyici organik ve inorganik maddeler vardır (Mignone, 2005). Çizelge 1.4.'de bazı ağır metallerin çözülebilir zehirlilik seviyeleri verilmektedir. Çizelge 1.5.'de anaerobik çürütme proseslerinde görülen ağır metal zehirlenmesinin bulunma durumları verilmektedir.

Çizelge 1.4. Anaerobik çürütme proseslerinde ağır metallerin çözülebilir zehirlilik seviyeleri (Mignone, 2005)

Ağır Metal	Zehirlilik seviyeleri (mg/L)
Arsenik	0,5 –1,0 mg/L
Kadmiyum	0,01 –0,02 mg/L
Krom	1,0 –1,5 mg/L
Bakır	0,5 –1,0 mg/L
Nikel	0,5 –2,0 mg/L
Çinko	0,5 –1,0 mg/L

Çizelge 1.5. Anaerobik çürütme proseslerinde görülen ağır metal zehirliliğinin bulunma durumları (Mignone, 2005)

Devamlı bulunanlar	Sık sık bulunanlar	Ara sıra bulunanlar
Kadmiyum Krom Bakır Kurşun Nikel Çinko	Arsenik Demir Manganez Civa Gümüş	Alüminyum Kobalt Molibdenum Selenyum Kalay

Uzun zincirli yağ asitleri, mezofilik ve termofilik anaerobik parçalanmada toksik etki gösterirler. Atık su çamurunu anaerobik çürütülmesinde, uçucu yağ asitleri konsantrasyonunun 2.000 mg/L'yi aşması durumunda, toksik etkiler görüldüğü 1960'lı yıllardan bu yana bilinmektedir (Hwu ve ark., 1997). Anaerobik parçalanmada metanojenler amonyak (NH₃) ve H₂S'e duyarlı organizmalardır. Uçucu yağ asitleri ve H₂S pH 7'nin altında zehirliken, amonyak ise pH 7'den yüksek olduğu zaman zehirlidir. Serbest amonyak seviyesi 150 mg/L'de zehirli olabilir (Björnsson, 2000).

Hidrojen iyonu konsantrasyonları dışında diğer çeşitli bileşikler ağır metaller ve kloro organik bileşikler, düşük oranda bulunmalarına rağmen anaerobik çürütmeyi etkilerler. Anaerobik proste toksik bileşikler, oksijen ve sülfid de olabilmektedir. Anaerobik proste sülfid, sülfat indirgenmesinde bulunabilmektedir. Ama yüksek oranlarda bulunması (>50 mg/L) toksik etki gösterebilir (Van Haandel, 1994). Yüksek sülfat konsantrasyonunda sülfid zehirliliği, organik atıkların parçalanmasında genel bir problemdir. Sülfat organik atıkların parçalanmasında elektron alıcıdır ve sülfide dönüşür. Sülfid, demir, bakır ve çinko gibi ağır metallerle bileşik halindeyken zehirli değildir. İyonize olmamış sülfid formu en zehirlidir. Çözünbilir sülfidin 50–100 mg/L arasındaki konsantrasyonu çok az veya hiç zehirli değildir. Sülfid 200 mg/L üzerinde zehirlidir. Teorik olarak 600 mg/L sülfattan 200 mg/L sülfid oluşur. Anaerobik parçalanmada normal pH’da sülfidlerin çoğu hidrojen sülfid (H_2S veya HS) formundadır. Asit üreten bakteriler metanojenlere göre hidrojen sülfide daha az duyarlıdır. Sabun gibi deterjanlar, antibiyotikler, sabunlar, organik çözücüler bakterilerin metan üretim kapasitelerini düşürürler (Zaher ve ark., 2007). Anaerobik proste zehirlilik oksijen açısından değerlendirildiğinde, metanojenik bakteriler oksijene çok duyarlı olmalarına rağmen fakültatif anaerobik bakteriler çürütücünün bir yanında oksijeni tüketirler (Björnsson, 2000).

Anaerobik parçalanmada atık çamurun % 5–6’dan fazla yoğunlaşması durumunda, amonyak zehirlenmesi olabilmektedir. Amonyak, anaerobik çürütücüde amonyum iyonu (NH_4) ve çözünmüş amonyak gazı (NH_3) olmak üzere iki formda bulunabilir. Her iki formda sistem pH’ına bağlı olarak birbirleriyle denge halindedir. Anaerobik sistemde pH 7,2 ve daha küçük olduğu zaman denge amonyum iyonuna doğru kaymaktadır. Anaerobik sistemde pH 7,2’den daha büyük olduğu zaman denge gaz fazına doğru kaymaktadır. Toplam amonyak konsantrasyonu litrede 1.500–3.000 mg/L arasında ve pH 7,4’den fazla olursa anaerobik sistemde amonyak gazı sebebiyle zehirlenme görülebilir. Amonyak konsantrasyonu 1.500–3.000 mg/L arasında metanojenlere toksik etki yapar. Bu şekilde amonyak zehirlenmesi çamuru seyreltmeyle ve pH’ı 7,0–7,2 arasında tutup yeterince hidroklorik asit ekleyerek kontrol edilebilir. Toplam amonyak konsantrasyonu 3.000 mg/L’den fazla olursa amonyum iyonunun artışıyla

zehirlenme görülebilir. Bu şekilde amonyak zehirlenmesi çamuru seyreltmeyle ve 3.000 mg/L'den ne kadar fazla olduğuna bağlı yeterince sodyum katyonu ekleyerek kontrol edilebilir (Mignone, 2005).

1.2.3. Anaerobik Parçalanmanın Mikrobiyolojisi

Anaerobik parçalanmada; öncelikle polimerik yapıdaki kompleks maddeleri (polisakkaritler, proteinler ve lipidler) birinci grup organizmalar, enzim salgılayarak glukoz ve aminoasitler gibi daha küçük boyutta hücre zarından geçebilecek çözünebilir ürünlere dönüştürürler. Daha basit ve çözünebilir yapıdaki bu bileşikler, asetojenik bakteriler vasıtasıyla fermentasyon ve anaerobik oksidasyonla kısa zincirli yağ asitlerine, uçucu yağ asitlerine, alkollere, karbondioksite, hidrojene ve amonyağa dönüşmektedirler. Asetat dışındaki kısa zincirli yağ asitleri de metanojenik bakteriler vasıtasıyla asetata, hidrojen gazına ve karbondioksite dönüştürülür. Prosesin son safhasında asetatin parçalanması ve H₂ ile CO₂'in sentezi yoluyla metan üretimi gerçekleşmektedir (Verma, 2002). Anaerobik parçalanma farklı mikroorganizma gruplarının yer aldığı oldukça karmaşık bir biyokimyasal süreçtir (Van Haandel ve Lettinga, 1994; Björnsson, 2000; Metcalf&Eddy, 2003). Anaerobik parçalanma proseslerinde; karmaşık moleküllerin metan gazına dönüşümünde açığa çıkan ürünün çeşitliliği genellikle çeşitli bakteri gruplarına bağlıdır (Speece, 1995). Anaerobik reaktörde genetik özellikleri tam olarak tespit edilemeyen birçok heterojen mikroorganizma grupları birlikte görev yapmaktadırlar. Başlıca iki grup bakterinin; asit bakterileri ve metan bakterilerinin esas görevi üstlendiği bilinmektedir. Bu iki grup da kendi aralarında ikiye ayrılmaktadır (İleri, 2000; Gökçay ve ark., 2001): Asit bakterileri; bütirik ve propiyonik asit üretenler ve asetik asit üretenler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Metan bakterileri; asetik asit kullananlar ve hidrojen kullananlar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Gruplara ayrılmış mikroorganizmalar Çizelge 1.6.'da verilmiştir.

Çizelge 1.6. Çamur çürütme tesislerindeki bakterilerin türleri (Dönmez, 1981; İleri, 2000; Gökçay ve ark., 2001; Macias-Corral, 2007)

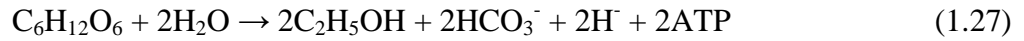
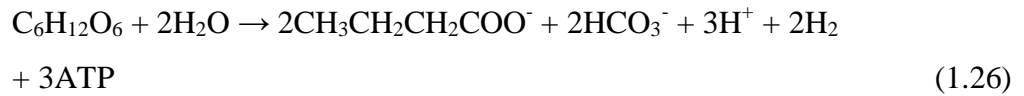
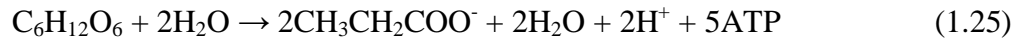
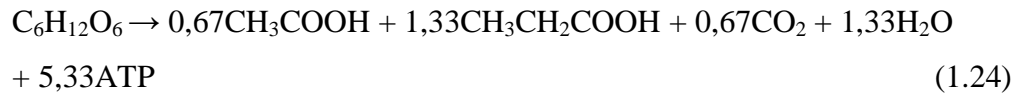
Bakteriler	Tür
Hidrolik Bakteriler	Gram (-), spor oluşturmeyen anaerobik çubuksu; Propionibacterium Gram (-), spor oluşturmeyen fakültatif anaerobik çubuksu; Escherichia coli ve Citrobacter Gram (+), çubuk ve koklar; Clostridium, Thermoanaerobium
Protein Parçalayıcı Bakteriler	Gram (-) çubuksu; <i>Eubacterium</i>
Hidrojen Üreten Asit Bakterileri	Gram (-) çubuksu; Propionibacteriae, Clostridia, Escherichia coli, E. aerogenes
Asetik Asit Üretenler	<i>Clostridium, Acetobacterium, Acetogenium, Butyribacterium, Eubacterium, Pelobacter</i>
Metan Bakterileri	<i>Methanobacterium, Methanobrevibacterium, Methanospirillum</i> <i>Methanococcus, Methanosarcina, Methanomicrobium, Methanotherix, Methanogenium, Methanosaeta</i>
Sülfat Gideren Bakteriler	<i>Desülfövibrio, Desülfotomaculum</i>

Anaerobik sistemlerde rol alan ve birbirleriyle çok yakın ilişkileri olan dört grup mikroorganizma; hidrolitik bakteriler, hidrojen üreten asetojenik bakteriler, homoasetojenik bakteriler ve metanojenik bakterilerdir.

Hidrolitik Bakteriler

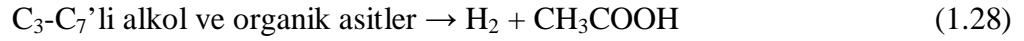
Bu grup bakteriler sakkaritler, proteinler, lipitler ve benzeri diğer karmaşık yapıdaki organik maddeleri parçalarlar. Hidrolitik bakterilerin meydana getirdiği reaksiyonlar şu şekildedir (Dönmez, 1981);

Polimer maddeler → Heksozlar → C₂ – C₃ – C₄ lu bileşikler

***Hidrojen Üreten Asetojenik Bakteriler***

Asetik asit bakterileri olarak da anılan H₂ üreten asetojenik bakteriler, asidik şartlarda büyürler. Hidrojen üreten asetojenik bakteriler, çoğalmaları için gerekli enerjiyi organik asit ve solventlerin asetik asit, H₂ ve CO₂' e parçalanması sonucu açığa çıkan enerjiden sağlarlar. Termodinamik sebeplerle asetik asit bakterileri sadece H₂ kullanan mikroorganizma alt grupları ile birlikte yaşarlar (Öztürk, 1999; Gökçay, 2001). Asit oluşturuçu bakteriler, çözülmüş organik maddeleri asetik asit başta olmak üzere uçucu yağ asitleri, hidrojen (H₂) ve karbondioksit (CO₂) gibi daha küçük yapılu maddelere dönüştürürler (Verma, 2002; Metcalf&Eddy, 2003;

Sorensen, 2004). Hidrojen üreten asidojenik bakterilerin meydana getirdiği reaksiyonlar aşağıda belirtildiği şekildedir. (Dönmez, 1981);



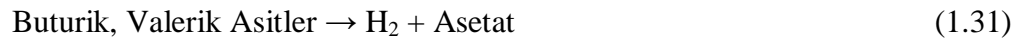
Ortamda metanojen bakteriler bulunduğunda;



Ortamda desulfovibrio veya methanosprillum+ desulfovibrio bulunduğunda;



Ortamda metanojen bakteriler bulunduğunda;



Homoasetojenik Bakteriler

Homoasetojenik bakteriler hem metan habercisi olan asetik asiti oluştururlar hem de H_2 'i kullanarak ortamda H_2 konsantrasyonunu dengede tutarlar. Bunlar metan üretim metabolizmasında rol oynarlar ve H_2 , CO_2 ve şekerler gibi çok karbonlu bileşikleri katabolize ederler. Homoasetojenik bakterilerin meydana getirdiği reaksiyonlar şu şekildedir (Dönmez, 1981);

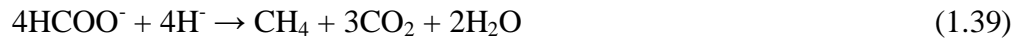
Heksoz, Laktik asit \rightarrow Asetat





Metanojenik Bakteriler

Metanojenik bakteriler asetat kullanan (asetotrofik) metanojenler ve hidrojen kullanan (hidrojenotrofik) metanojenler olmak üzere ikiye ayrılır. Asetotrofik metanojenler asetatı metan ve karbondioksite ayırırlar. Hidrojenotrofik metanojenler ise hidrojeni elektron verici, karbondioksiti ise elektron alıcı gibi kullanarak metan üretirler (Van Haandel, 1994; Metcalf&Eddy, 2003). Metanojenik bakterilerin meydana getirdiği reaksiyonlar şu şekildedir (Dönmez, 1981);



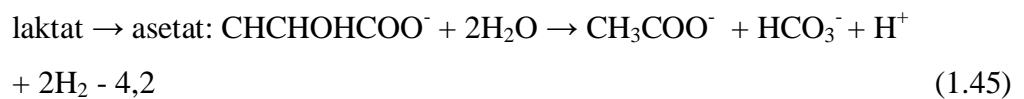
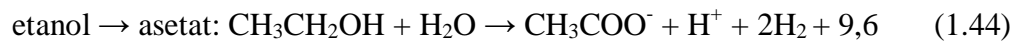
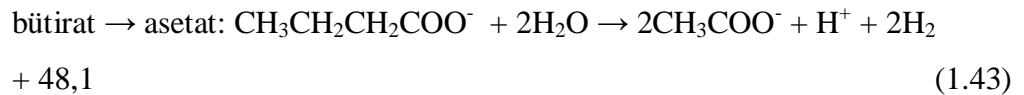
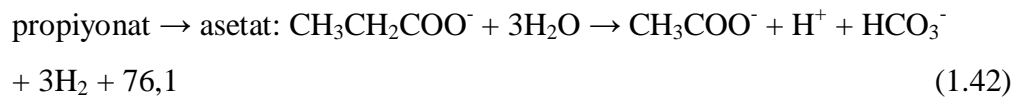
Anaerobik parçalanma proseslerinde, organik maddelerin parçalanması çok sayıda mikrobiyal populasyon ile gerçekleşmektedir. Bakteri türlerinin çok olması parçalanmadaki reaksiyon adımlarını da çeşitli ve karmaşık hale getirmektedir. Bu reaksiyonları sağlayan mikroorganizma populasyonlarının dağılımı substrat yapısına, proses süresince oluşan ara ürünlerin konsantrasyonlarına ve pH, sıcaklık, H₂ konsantrasyonu gibi çevresel şartlara bağlıdır. Biyoreaksiyon adımları şu şekilde tanımlanmaktadır (Öztürk ve ark., 1999):

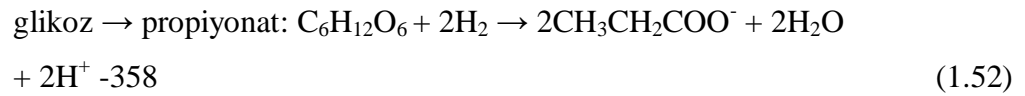
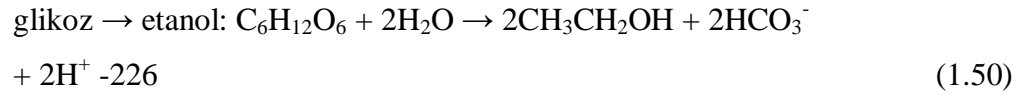
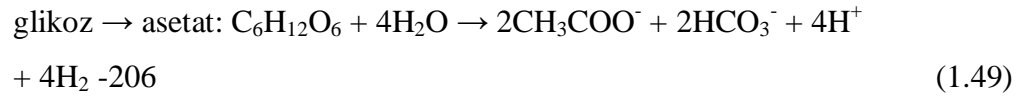
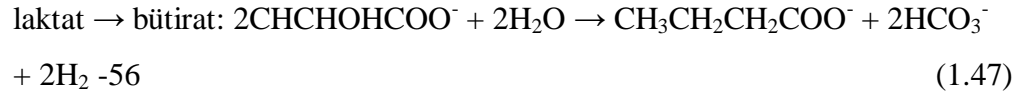
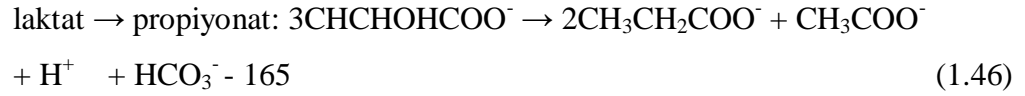
- Polimerlerin monomerik organiklere hidrolizi hidrolitik mikroorganizmalar tarafından gerçekleştirilir. Bu tür çözülmüş ve çözünmemiş halde bulunan yüksek moleküler ağırlıklı organik bileşiklerin indirgenmesini sağlayan enzimlere sahiptirler ve ürettikleri enzim türüne göre sınıflandırılırlar. Ortamda şeker veya amino asit birikmesiyle inhibe olurlar.
- Monomerik organik substratlardan hidrojen veya format, CO₂, pirüvat, uçucu yağ asitleri, etanol ve laktik asit gibi diğer organik ürünlerin oluşması fermantasyon

bakterileri tarafından gerçekleştirilir. Bu reaksiyonlar bakterilerin bünyelerinde meydana gelmektedir.

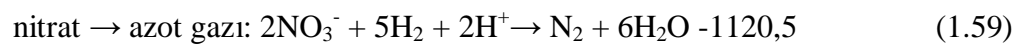
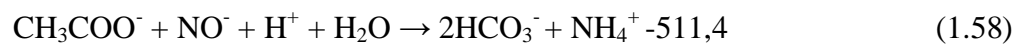
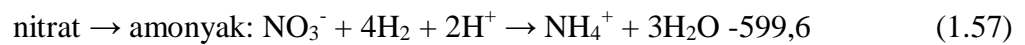
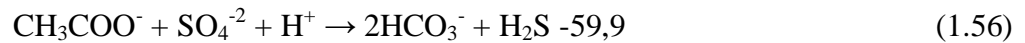
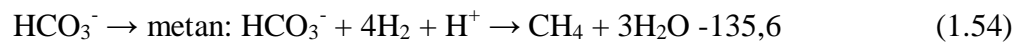
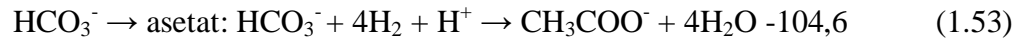
- İndirgenmiş bileşiklerin H₂, CO₂ ve asetata oksidasyonu hidrojen üreten asitojenler (OHPAs) tarafından gerçekleştirilir.
- Bikarbonatların asitojenik solunumu homoasitojenlerce (HA) olmaktadır. Ancak bu bakteriler hidrojen tükettikleri için metanojenler ile rekabete girerler.
- Ortamda sülfat veya nitrat olması durumunda alkoller, bütirik ve propiyonik asitler gibi indirgenmiş bileşiklerin CO₂ ve asetata oksidasyonu sülfat indirgeyen (SRB) ve nitrat indirgeyen (NRB) bakteriler tarafından gerçekleştirilir.
- SRB ve NRB'ler asetatin karbondioksite oksidasyonunu gerçekleştirirler.
- SRB ve NRB'ler hidrojenin oksidasyonunda da rol oynarlar.
- Asetik asidin metana dönüşümü metanojenler tarafından sağlanır. Bunlar asetik asidi kullanarak metan üretirler. Bunların en önemlileri *Methanothrix* ile *Methanosarcina* dır. Her iki mikroorganizmanın çoğalma hızları düşüktür ve ikilenme süreleri yaklaşık olarak 24 saattir. Ayrıca bunların aktiviteleri ortamdaki hidrojenin varlığına bağlıdır.
- Karbondioksitten metan oluşumu hidrojen kullanan metanojenler (HMB) tarafından gerçekleştirilen metanojik solunum ile olmaktadır. Bunlar asetik asit kullananlara göre daha hızlı çoğalırlar ve ikilenme süreleri 4 ila 6 saat arasındadır.

Oksidasyon Reaksiyonları ve Serbest Enerji Değerleri





Solunum Reaksiyonları ve Serbest Enerji Değerleri



Metan fermantasyonu doğada karbon dönüşümü ve diğer dönüşümler için çok önemlidir. Çünkü bu dönüşümde karmaşık organik maddeler, CO₂ ve CH₄ gazına parçalanmakta ve çok az miktarda bakteri kütesine dönüşmektedir. Bu şekilde büyük miktarlarda organik madde parçalanarak enerjileri CH₄ da yoğunlaşmaktadır. Metan fermantasyonu karmaşık bakteri topluluğunun organik besiyerli ortamda oluşturduğu bir biyolojik parçalanmadır. Bu fermantasyonda bakteriler yaşamlarını bir arada sürdürmektedirler. Metan oluşturmayan bakterilerde bu ortamda bulunmaktadır. Ortama yalnızca metan oluşturan bakteri grupları aşılandığında metan fermantasyonunu gerçekleştirmek güçtür. Metan fermantasyonu oksijensiz ortamda ve nitrat (NO₃) ve sülfat (SO₄) gibi elektron alıcı maddelerin minimal konsantrasyonda olduğu durumlarda gerçekleşir. Metan fermantasyonu için ortamın pH değeri 7 dolayındadır. Asidite arttıkça fermantasyon hızı düşer. Doğada metan fermantasyonu su canlılarının fosil sedimentasyonlarında, tundralarda ve bataklıklarda görülür. Fosil yakıtlarda jeofiziksel şartlarda değişime uğramış lignin gibi parçalanmayan organik atıklarda bulunur. İnsanlar uzun zaman atıkları stabilize etmek için fermantasyon yöntemini kullanmışlardır. Yarı metan fermantasyonu geniş getiren büyük baş hayvanların sindirim iç organlarında da oluşmaktadır (Ülkü ve Taygun, 1981).

Anaerobik Fermantasyoda Hidrokarbonların, Proteinlerin ve Yağların Parçalanma Basamakları

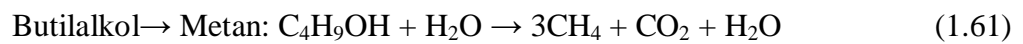
Anaerobik fermantasyonun ilk basamağı olan asidik fermantasyonda; hidrokarbonlar, proteinler ve yağlar organik asitlere parçalanan ana bileşiklerdir (Ülkü ve Taygun, 1981).

Hidrokarbonlardan glikozun parçalanma basamakları;

1. Basamak; Asidik fermantasyon:



2. Basamak; Metan fermantasyonu:



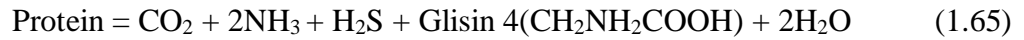


$$\text{Metan / CO}_2 \text{ Oranı} = \text{Metan / CO}_2 = 3/3 = 1 \quad (1.63)$$

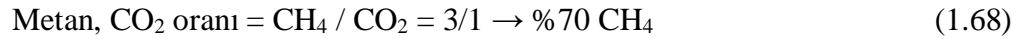
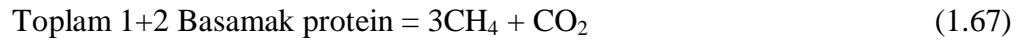
Metanın ısı değeri 8500 kcal/Nm³, CO₂'in ısı değeri 0 alınırsa karışımın ısı değeri 8500 / 2 = 4250 kcal/Nm³ bulunur. Karışım içinde metan oranı % 55'in altında olduğundan karışım içindeki CO₂'in etkisiyle karışım çok iyi yanmaz.

Proteinlerden glisinin parçalanma basamakları;

1. Basamak; Büyük moleküllü proteinler 1. basamakta daha küçük moleküllere parçalanırlar. Bu arada CO₂, NH₃, H₂S ve üre ile aminoasitler oluşur. Üre de NH₃'e dönüşür.



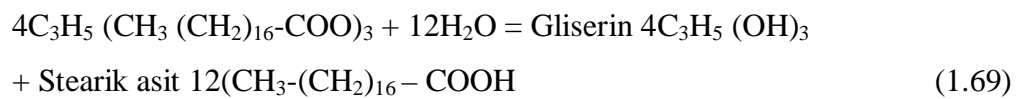
2. Basamak;



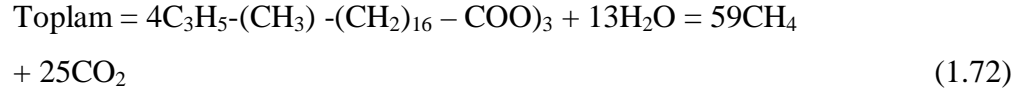
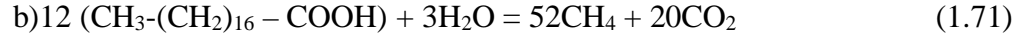
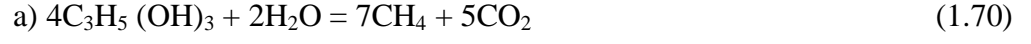
Parçalanma ürünü yalnız metan ve CO₂'dir. Çünkü NH₃ suda çözülür, H₂S çamur içindeki Fe ile birleşerek demir sülfür oluşturur. Isıl değeri 6375 kcal/Nm³

Organik yağlardan tristearin (ester) parçalanma basamakları;

1. Basamak;



2. Basamak;



Metan CO₂ oranı = CH₄ / CO₂ = 59/25 = 2,36/1 % 67 metan

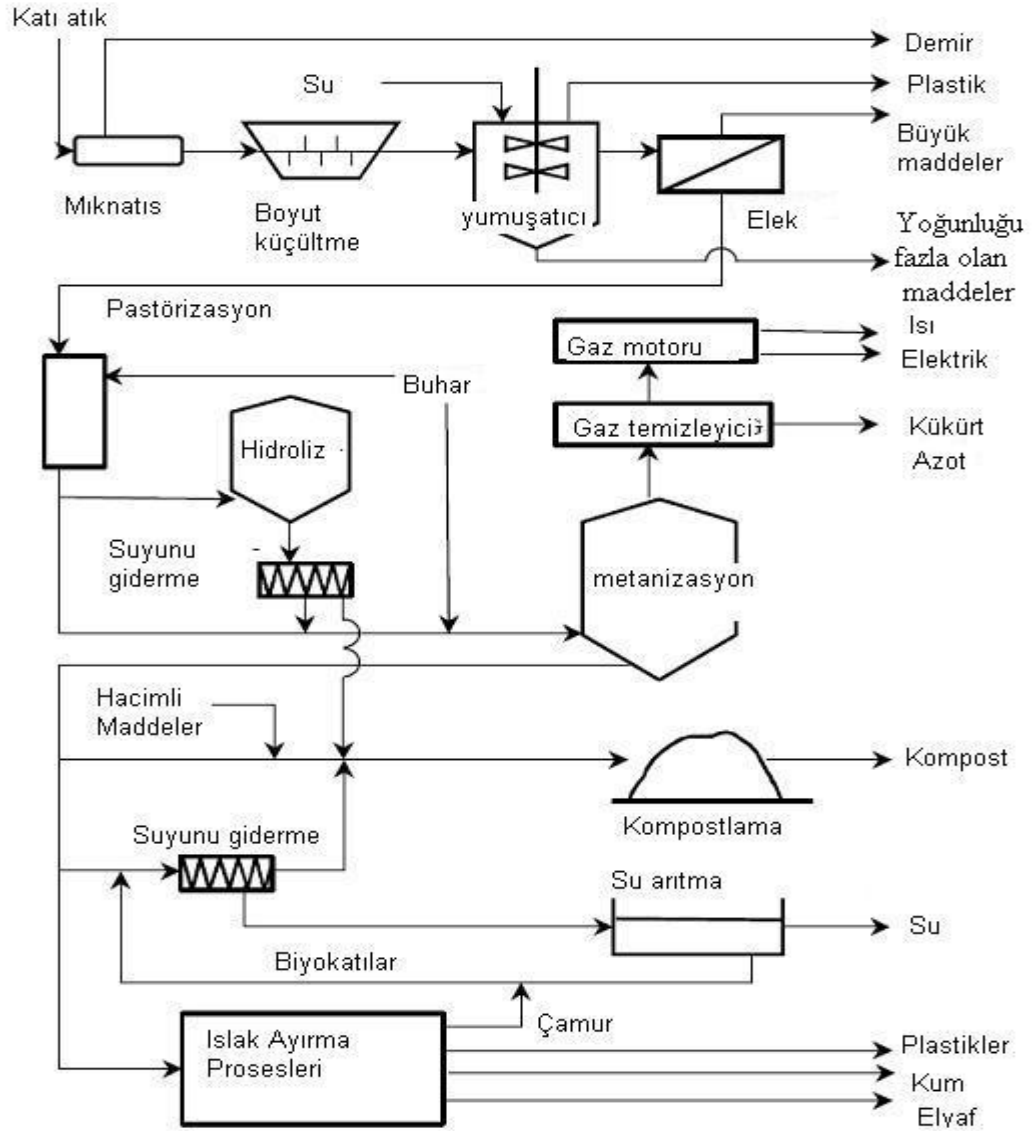
Isıl değeri = 5970 kcal/Nm³

1.2.4. Katı Atıklar İçin Anaerobik Parçalanma Sistemleri

Katı atıklar için en yaygın olan anaerobik çürütücüler, biyolojik, teknik performansı ve dayanıklılığına dayanılarak karşılaştırılır. Anaerobik çürütücüler; tek aşamalı, iki aşamalı ve kesikli sistemler olmak üzere 3 gruba ayrılmaktadır.

Anaerobik parçalanma sistemlerinin sınıflandırılması, katı atığın toplam katı içeriğine bağlıdır. Düşük katı içeriğinde % 10'dan az toplam katı bulunur. Orta katılar % 15–20 arasında katı madde içerir. Yüksek katı içeren proseslerde ise katı madde oranı % 22–40 arasındadır (Verma, 2002).

Reaktör tasarımlarının karar ve yenilenmesi biyolojik, teknik, ekonomik ve çevresel bakış açısına bağlıdır. Biyolog; hız, stabilite ve biyokimyasal reaksiyonların yerine getirilmesiyle ilgilenirken, mühendis; elektro-mekanik donanımların bakımı ve dayanıklılığına odaklanmaktadır. Diğer taraftan çevre mühendisi; enerji ve materyalin iyileştirilmesi ve kirlilik emisyonlarını dikkate almakta, satıcı; bakım ve işletimsel masraflara bağlı reaktör tasarımlarını arttırmaktadır (Vandevivere ve ark, 1999). Şekil 1.2.'de katı atıkların anaerobik çürütülmesinde genellikle kullanılan proses örneği görülmektedir.



Şekil 1.2. Kati atıkların anaerobik çürütülmesinde kullanılan proses örneği
(Vandevivere ve ark., 1999)

1.2.4.1. Tek Aşamalı Sistemler

Biyometanizasyon organik atıkların biyokimyasal dönüşümlerle metana dönüştürülmesi olarak tanımlanır. Biyokimyasal dönüşümler, aşağı yukarı hidrolizin yer aldığı ilk adım ve asetat hidrojen ve karbondioksitin metana dönüştürüldüğü asitleştirme ve sıvılaştırmanın yer aldığı ikinci aşamada ayrılabilir.

Tüm bu reaksiyonlar iki veya daha fazla aşamalı sistemlerde en az iki reaktörde gerçekleşirken tek aşamalı sistemlerde tek bir reaktörde aynı anda gerçekleşmektedir (Vandevivere ve ark, 1999).

Tek aşamalı sistemler basit yapıları sebebiyle tercih edilir. Yüksek katı içerikli tek aşamalı sistemler düşük katı içeriklilere göre daha sağlam ve pahalıdır. Yüksek katı içerikli tek aşamalı sistemler düşük katı içerikli sistemlere göre düşük organik yükleme hızına sahiptir (Verma, 2002).

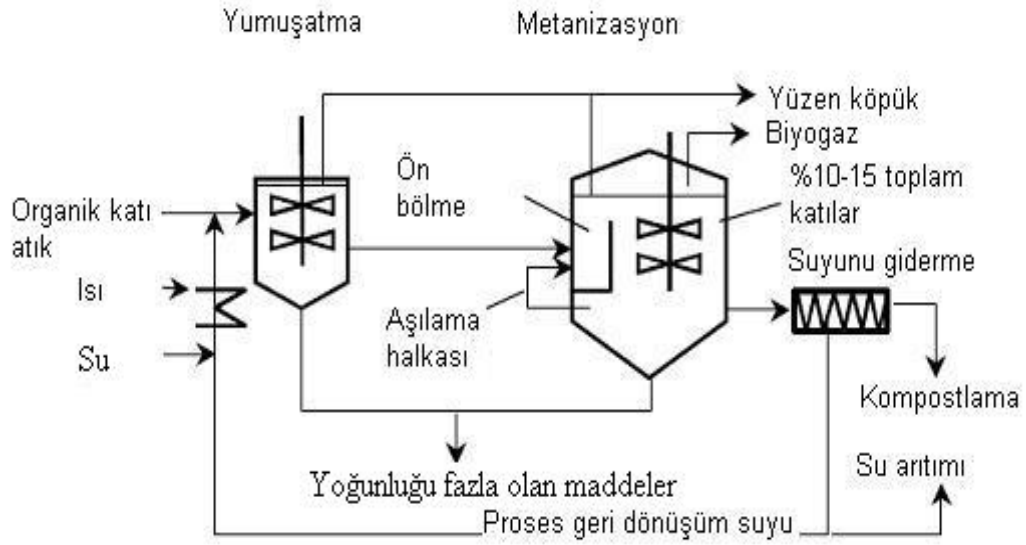
Avrupa da bugünlerde evsel katı atıkların organik kısımlarının ve biyoatıkların anaerobik çürütme sistemlerinin % 90'ı tek aşamalı sistemlerdir. Bu sistemler ıslak ve kuru işletme şartlarına göre ikiye ayrılır. Bu endüstriyel eğilim bilimsel literatürle aynı değildir. Bu farklılık sebebiyle iki ve daha çok aşamalı sistemler araştırmacılara çürütme proseslerinin ara adımları inceleme ve kontrol açısından daha fazla olanak sağlar. Ayrıca daha basit tasarım, daha az sık tekrarlanan teknik hatalar ve daha küçük yatırım masrafları sebebiyle tek aşamalı reaktörler sanayiciler tarafından çok tercih edilir. İyi tasarlanmış ve işletim koşulları dikkatli seçilmiş birçok tek aşamalı organik atık parçalama sistemlerin biyolojik performansı iki aşamalı sistemler kadar yüksektir (Vandevivere ve ark., 1999). Çizelge 1.7.'de organik katıların anaerobik çürütülmesinde uygulanan prosesler, ürünler ve kalite standartları verilmektedir.

Çizelge 1.7. Organik katıların çürütülmesinde uygulanan prosesler, ürünler ve kalite standartları (Vandevivere ve ark., 1999)

Birim prosesler	Yeniden kullanılabilir ürünler	Standartlar ve Kriterler
<p>ÖN İŞLEM</p> <p>-Manyetik ayırıcı -Boyut azaltıcı</p> <p>-Yumuşatma (yerçekimiyle ayırma) -Eleme(drum screening) -Pastörizasyon</p>	<p>-Demirli metaller</p> <p>-Ağır hareketsiz inşaat malzemesi olarak geri kullanılabilen maddeler -Kaba maddeler, plastikler</p>	<p>-Organik kirleticiler -Kağıt ve kartonların parçalanması -Organik kirleticiler</p> <p>-Kalorifik değer</p> <p>-Tohumların öldürülmesi</p>
<p>ÇÜRÜTME</p> <p>-Hidroliz -Metanojenesis -Biyogaz değerlendirilmesi</p>	<p>-Biyogaz -Elektrik, Isıtma (su buharı)</p>	<p>-Nitrojen ve sülfür standartları -150-300 kW.h_{elek}/ton 250-500 kW.h_{ısı}/ton</p>
<p>İLERİ ARITMA</p> <p>-Mekanik susuzlaştırma -Aerobik stabilizasyon -Su arıtma -Biyolojik susuzlaştırma -Islak Ayırma</p>	<p>-Kompost</p> <p>-Su -Kompost</p> <p>-Kum Kum malzemesi Besleme malzemesi (yer kömürü) Çamur</p>	<p>-Su arıtma yükü</p> <p>-Katı değişiklik yasaları standartları -Giderme standartları -Katı değişiklik yasaları standartları -Organik kirlilikler Dikme ortamı standartları Kalorifik değer</p>

Tek Aşamalı Islak Tam Karışımli Sistemler

Tek aşamalı ıslak reaktörler atık su arıtma sistemlerinden çıkan biyokatıların anaerobik parçalanmasında yıllardır kullanılması sebebiyle tercih edilir. Tek aşamalı ıslak prosesler çok aşamalı proseslere göre basit görünmesine karşın proses performansını yeteri kadar garanti altına almak için teknik açıdan birçok hesaplamalar gerektirir. Bu sistemlerdeki en önemli biyolojik performans göstergeleri prosesin hızı, tamamlanma derecesi ve biyokimyasal reaksiyonların kararlılığıdır. Bu sistemlerde biyogaz veriminin ise çok az kullanılmasının sebebi, verimin atık oranından çok prosesin performansına bağlı olmasıdır. En çok kullanılan biyolojik performans ölçütleri maksimum yenilenebilir reaksiyon hızı (substrat ekleme hızı ve ürün oluşturma hızı), kuru biyogaz ve metan (standart sıcaklık ve basınç şartlarında) miktarıdır. Sistemin biyolojik performansının belirlenmesinde bu üç belirteçinde aynı zamanda kullanılması gereklidir. Bu indikatörler biyogaz verimi ve uçucu katılardan daha fazla kullanılır. Fazla kullanılmasının sebebi ise belirsiz atık oluşumuna daha az duyarlı olması ve reaktör tasarımında verilen biyolojik aktivite seviyesinin daha uzun süreli olmasıdır. Kullanılan diğer bir parametre ise bekleme zamanıdır. Bekleme zamanı sistemin katı bileşimine ve proses suyuyla seyrelmesine bağlıdır. Ayrıca sistemin biyolojik performansı hakkında fazla bilgi vermez. Katı atıkların seyreltilmesi ucuz materyal kullanılmasıyla ekonomik avantaja sahip olabilir. Fakat bu avantaj, daha geniş reaktör ihtiyacı nedeniyle susuzlaştırma, donanım ve karıştırıcıyla birlikte daha yüksek yatırım masrafları ve gerekli ön işlem aşamasıyla dengelenir. Tüm bu masraflar kuru sistemlerle karşılaştırılabilir. Ayrıca fazla su tüketimi hem çevresel açıdan hem de su masrafı açısından reaktör seçiminde göz önünde bulundurulmuş bir faktördür (Vandevivere ve ark., 1999). Şekil 1.3.'de tek aşamalı ıslak sistem dizaynı görülmektedir. Çizelge 1.8.'de tek aşamalı ıslak sistemin avantaj ve dezavantajları karşılaştırılmıştır.



Şekil 1.3. Tek Aşamalı Islak Sistem Dizaynı (Vandevivere ve ark., 1999)

Çizelge 1.8. Tek Aşamalı Islak Sistemlerin Avantaj ve Dezavantajları (Vandevivere ve ark., 1999)

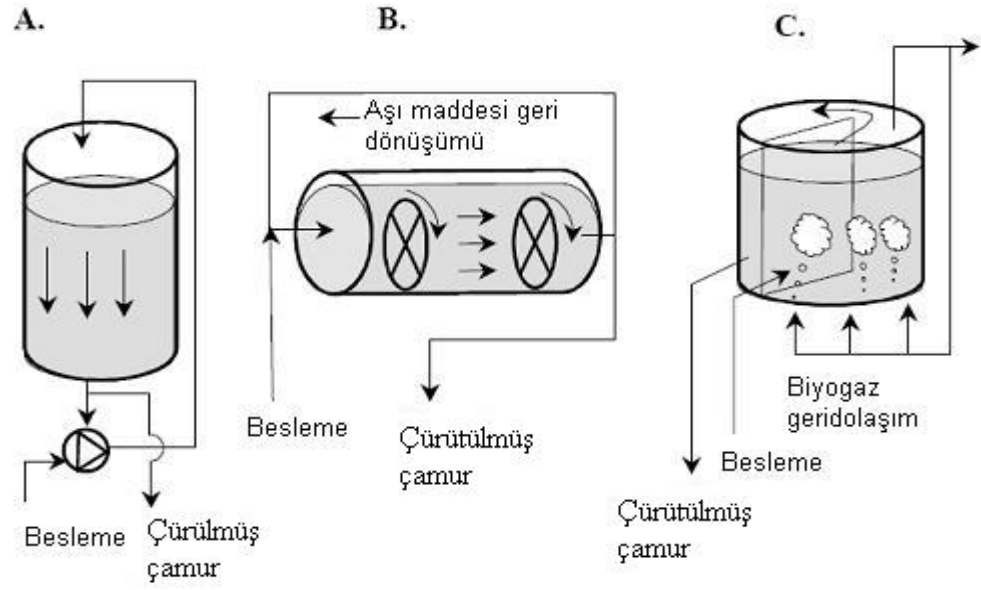
Kriter	Avantaj	Dezavantaj
Teknik	Önceki çalışmalardan esinlenebilir	-Kısa devir -Kumla aşınma -Karışık ön işlem
Biyolojik	Engelleyicilerin taze suyla seyreltilmesi	-Engelleyicilerin reaktördeani dağılımı gibi yüklemelere duyarlı
Ekonomik&Çevresel	Ekipmanlar daha ucuz(fakat önarıtma aşamazının eklenmesiyle denge sağlanır)	-Yüksek miktarda su -Yüksek değerlerde ısıtma için yüksek ısı tüketimi

Islak tam karışımli sistemlerde organik katı atıklar % 15'den az su ile seyreltilmişlerdir (Vavilin ve Angelidaki, 2005). Günümüzde su içeriği fazla olan atıkların anaerobik çürütülmesinde tek aşamalı anaerobik çürütücüler büyük oranda kullanılmaktadır (Cirne ve ark., 2006).

Jianguo ve ark. 2007 yılında yaptıkları çalışmada ıslak su içeriği arttıkça kg başına ölçülen ısı değerinin düştüğünü bildirmişlerdir. Böylece atığın organik kısmından anaerobik parçalanmayla biyogaz elde edilmesine alternatif olan yakma işlemi avantaj sağlamamaktadır.

Tek Aşamalı Kuru Sistemler

Tek aşamalı ıslak sistemler organik çamurun çürütülmesinde kullanılan teknolojiden esinlenmiştir. Fakat 1980'lerdeki araştırmalarda üretim hızı ve biyogaz veriminin su eklemeyen orijinal katı halinin korunduğu kuru sistemlerde de yüksek olduğu ispatlanmıştır. 1980'lere kadar birçok endüstride ıslak sistemler kullanılırken, son on yılda yapılan yeni sistemlerde kuru sistemler de tercih edilmektedir. Kuru sistemlerde reaktörde fermente edilmiş kütlede toplam katı içeriği % 20–40 arasındadır. Bu sebeple sadece toplam katı oranı % 50'den fazla olan çok kuru maddelerin sulandırılmaya ihtiyacı vardır. Kuru sistemlerde atığın yüksek katı oranı gibi fiziksel özelliklerinin ıslak sistemlerden farklı olması nedeniyle toplama, karıştırma gibi ön işlem donanımları farklıdır. Atığın transfer edilmesi ve elenmesinde, özellikle yüksek viskoziteli sistemler için tasarlanan güçlü pompalar, taşıyıcı kolon ve pervaneler kullanılır. Bu tip donanımlar ıslak sistemlerde kullanılan santrifüj pompalardan daha pahalıdır. Kuru sistemlerde sadece 40 mm den büyük katı içeren atıkların ön işlemden geçirilmesi gereklidir. Kuru sistemler yaş sistemlere göre inhibasyona daha az duyarlıdır. Yaş sistemlerle kuru sistemler arasındaki gider ve işletim masrafları açısından ekonomik farklılıklar azdır. Çevresel açıdan iki sistem arasındaki fark; ıslak sistemlerde organik katı atıkların her bir tonu için 1 m³ su tüketimine karşın kuru sistemlerde 10'da biri kadardır. Kuru sistemlerin diğer bir çevresel avantajı ise son ürün olan kompostun en azından termofilik şartlarda tamamen hijyenize edilerek patojenden arınmış olmasıdır (Vandevivere ve ark., 1999). Kuru sistemlerde toplam katı içeriği % 20–40 arasındadır (Vavilin ve Angelidaki, 2005). Şekil 1.4.'de kuru sistemlerde kullanılan farklı tasarımlar görülmektedir. Çizelge 1.9.'da tek aşamalı kuru sistemlerin avantaj ve dezavantajları karşılaştırılmaktadır.



Şekil 1.4. Kuru Sistemlerde Kullanılan Farklı Tasarımlar (A Dranco Tasarımı, B Kompogas ve BRV tasarımı ve C Valorga tasarımıdır), (Vandevivere ve ark., 1999)

Çizelge 1.9. Tek aşamalı Kuru Sistemlerin Avantaj ve Dezavantajları (Vandevivere ve ark., 1999; Öktem ve Sivri, 2005)

Kriter	Avantaj	Dezavantaj
Teknik	<ul style="list-style-type: none"> -Reaktör içerisine parçalar taşınmaz -Dirençli(hareketsiz parçalar ve plastikler giderilmesi gerekmez -İşletilmesi daha kolaydır -İlk yatırım maliyeti düşüktür 	<ul style="list-style-type: none"> -Islak atıklar (Toplam katı oranı % 20'den az)tek başına arıtılmaz -Devreye alma süresi daha uzundur -Stabilite kontrolü daha zordur -Yük değişimlerine daha hassasdır
Biyolojik	<ul style="list-style-type: none"> -Daha az uçucu katı ön işlemden kaybedilir -Daha yüksek biyokütle -Engelleyicilerin konsantrasyon dağılımı limitli 	<ul style="list-style-type: none"> -Engelleyicilerin taze suyla sulandırılma olanağı düşük -Optimize olmamış mikrobiyal şartlar
Ekonomik &Çevresel	<ul style="list-style-type: none"> -Daha ucuz ön işlem ve daha küçük reaktörler -Tamamlanmış hijyenizasyon -Çok küçük miktarda su kullanımı 	<ul style="list-style-type: none"> -Daha sağlam ve pahalı atık arıtma malzemeleri ihtiyacı (daha küçük ve basit reaktör ihtiyacıyla telafi edilir)

Enerji ürünlerinin genellikle toplam katı (% 10–50) içeriği yüksek orandadır. Sistemin biyokütle ürünü homojen olmalıdır ve seyreltilmelidir. Tek aşamalı sistemler, metanojenik bakterilerin işletim şartlarına adapte olacak şekilde dizayn edilmektedir (Cirne ve ark., 2006).

Elango ve ark. (2007) evsel atıkları ve atık su arıtma tesisi çamurunu tek aşamalı kesikli reaktörde farklı besleme oranlarında anaerobik parçalanmayla biyogaz elde edilmesi çalışmalarında maksimum biyogaz üretimini $0,36 \text{ m}^3/\text{kg}/\text{UK}$, optimum organik besleme oranını $2,9 \text{ kg m}^3/\text{gün}/\text{UK}$ olarak belirtmişlerdir.

1.2.4.2. İki Aşamalı Sistemler

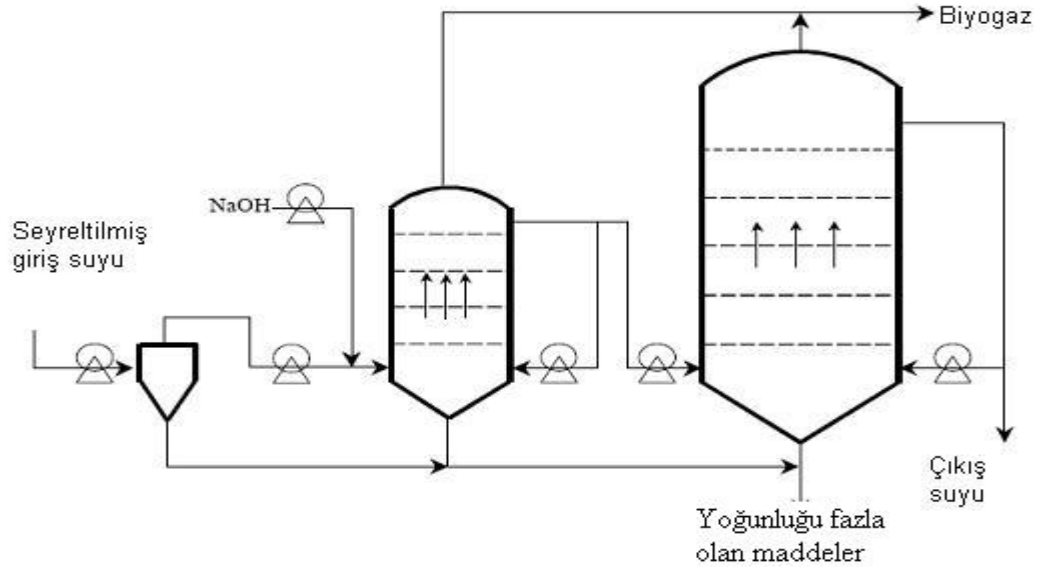
İki aşamalı sistemler anaerobik parçalanmada, sistemi geliştirmek amacıyla farklı aşamalar için ayrı reaktörlerin kullanıldığı sistemlerdir. Çoğunlukla birinci reaktörde hidroliz-asit oluşumu, ikinci reaktörde ise metan oluşumu gerçekleşir. Reaksiyon hızı birinci reaktörde selülozun hidroliz hızıyla ikinci reaktörde ise mikroorganizmaların büyüme hızıyla sınırlıdır. İki aşamalı sistemlerde sisteme çok az miktarda oksijen girişi sağlanarak hidroliz hızı artırılır. Bu tür reaktörlerde hidroliz aşamasından sonra oluşan askıda parçacıkların giderimi önemli bir gereksinimdir (Verma, 2002).

İki aşamalı sistemler, genellikle selülozun hız sınırlayıcı hidroliz reaksiyonlarının gerçekleştiği sulandırma-asidifikasyon reaksiyonlarının beslendiği ilk aşama ve yavaş mikrobik büyüme hızıyla sınırlı asetojenesis ve metanojenesisin gerçekleştiği ikinci aşamadan meydana gelir (Solera ve ark., 2002, Parawira, 2007). Bu iki farklı adımın olduğu sistemlerde ikinci reaktörün tasarımıyla metanojenesisin hızı artırılır. İki aşamalı sistemlerin ana avantajı varsayılan yüksek reaktör hızı değil; tek aşamalı sistemlerde performansı kararlı olmayan atıkların daha çok biyolojik güvenilirlik sağlayabilmesidir. Biyoreaktör içerisindeki biyolojik kararlılığın tanımlanması biyokütlenin reaktörde bekletilmesiyle alakalı olması nedeniyle iki aşamalı reaktörler, biyokütlenin bekleme aşamasının bulunduğu ve bulunmadığı olmak üzere iki kısma ayrılır. Her iki tür reaktörde de organik yükleme hızının değişimine karşı önlem alınır. Biyokütle biriktirmeli iki aşamalı sistem, aşırı azot veya zehirleyicilere karşı daha karardır (Vandevivere ve ark., 1999). Çizelge

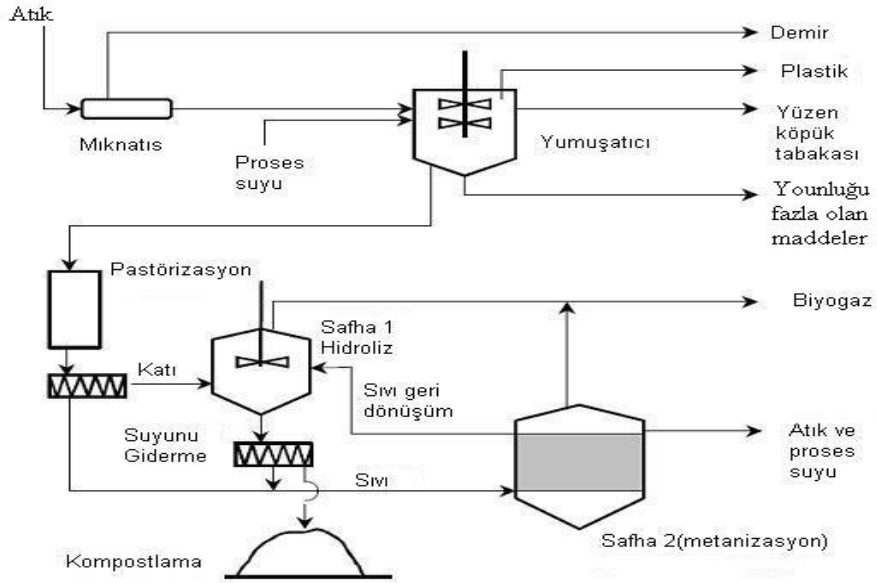
1.10.'da iki aşamalı sistemlerin avantaj ve dezavantajları karşılaştırılmıştır. Şekil 1.5.'de Schwarting-uhde tipi proses, iki aşamalı biyoatıkların kaynakta ayrıldığı ıslak-ıslak sistem görülmektedir. Şekil 1.6.'da İki aşamalı ıslak-ıslak sistem tasarımı (biyokütle şeması ikinci aşamada, BTA sistemi) verilmektedir.

Çizelge 1.10. İki Aşamalı Sistemlerin Avantaj ve Dezavantajları (Vandivivere ve ark.,1999; Öktem ve Sivri, 2005)

Kriter	Avantaj	Dezavantaj
Teknik	-Dizayn esnekliği -İlk yatırım maliyeti yüksek -Yüksek sistem stabilitesi	-Karışık -Daha zor işletme ve kontrol
Biyolojik	-Selülozu az mutfak atıkları için daha güvenilir	-Daha küçük biyogaz verimi(katılar metanojenesisden geçmeden) -Optimize olmuş mikrobiyal şartlar
Ekonomik & Çevresel	-Kompost da az ağır metal(katılar metanojenesisden geçmeden)	-Daha fazla yatırım masrafı -Reaktörlerin hacimleri daha küçüktür



Şekil 1.5. Schwarting-uhde Tipi Proses (Vandevivere ve ark., 1999)



Şekil 1.6. İki Aşamalı Islak-ıslak Sistem Tasarımı (biyokütle şeması ikinci aşamada, BTA sistemi) (Vandevivere ve ark., 1999)

Anaerobik çürütmede 3 aşamalı reaktörler de kullanılmaktadır. Üç aşamalı sistemlerde ilk aşamada hidroliz, ikinci aşamada asidojenik proses, son aşamada ise metan oluşumu görülmektedir (Park ve ark., 2005).

İki aşamalı çürütücüler katı içeriği fazla olan atıkların parçalanmasında ve evsel nitelikli atıkların organik kısımlarının parçalanmasında kullanılmaktadır (Mata-Alvarez ve ark., 2000). Endüstriyel atıkların parçalanmasında da öncelikle iki aşamalı sistemler kullanılmaktadır. Avrupa'da evsel nitelikli atıkların parçalanmasında % 10 oranında iki aşamalı sistemler tercih edilmektedir (Cirne, 2006). İki aşamalı anaerobik parçalanma sistemlerinin proses kararlılığı ve kontrolü, çevresel koşulların optimizasyonu ve metanojenlerin aktivitelerinin arttırılması gibi avantajları vardır (Demirel, 2006). İki aşamalı anaerobik sistemlerden sürekli iyi çıkış kalitesi, daha düşük askıda katı madde, yüksek kimyasal oksijen ihtiyacı giderimi ve iyi bir metan dönüşüm oranı elde edilmektedir.

Babel (2004) anaerobik çürütücüde katı atık çözünmesinde asit oluşumunun etkisi adlı çalışmada, iki aşamalı çürütücülerin tek aşamalıya göre daha verimli olduğunu bildirmiştir. Bunun nedenin ise mikroorganizmaların ayrı besin ihtiyacı, büyüme kapasiteleri ve çevresel şartlara uyum kabiliyetleri olduğunu belirtmiştir.

Öktem ve Sivri (2005) yaptıkları çalışmada metan tankındaki biyokütlenin substrata tek aşamalı sistemdeki metan bakterilerinden daha çabuk adapte olduğunu belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışmada; metan tankındaki biyokütlenin substrata tek aşamalı sistemdeki metan bakterilerinden daha çabuk adapte olduğu görülmüştür. Tek aşamalı anaerobik reaktörlere uygulanan organik yükün iki aşamalı sistemlere göre daha düşük olduğu görülmüştür. Sözü edilen sonuçlar sistemin uygun işletme koşullarında işletilip işletilmediğine, substratın özelliklerine, proses tipine vb. bağlı olarak farklılık göstermektedir.

Vavilin ve Angelidaki 2004 ve Vavilin ve ark., 2006 yıllarında yaptıkları çalışmalarda; organik katı materyalin anaerobik parçalanmasında iki aşamalı proseslerin asidojenik ve metanojenik bakterilerin uyumlu yaşadıkları reaktörler olduğunu bildirmişlerdir.

Parawira ve ark. 2007 yılında yaptıkları çalışmada; iki aşamalı reaktörlerin hidroliz, asidifikasyon ve metanojenezis aşamaları arasında iyi ayırım yapıldığını ve bu sayede asidojenik reaktörde yüksek karbondioksit üretimi, uçucu yağ asitleri konsantrasyonu ve düşük pH elde edilmiştir. Parawira ve ark. (2007), tek aşamalı reaktörlerin yüksek atıkların parçalanmasında seyreltme, pH kontrolü ve diğer

atıklarla birlikte arıtım gerektirmesi gibi nedenlerle dezavantajlı olduğunu bildirmişlerdir.

1.2.4.3. Kesikli Sistemler

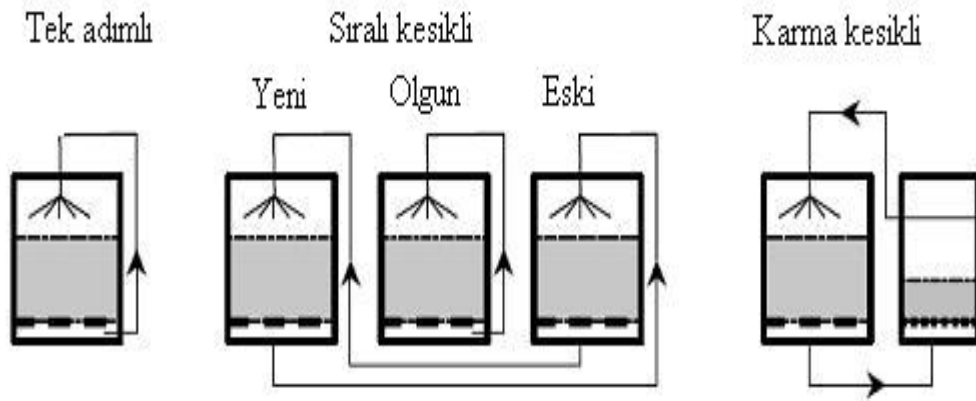
Kesikli reaktörlerde anaerobik çürütücüye başlangıçta belirlenmiş bekleme zamanında içerisindeki çürütülmüş madde alınarak yerine besin maddesi ilave edilir. Sürekli sistemlerde ise taze organik madde çürütücüye verilir ve aynı miktarda çürütülmüş madde sistemden alınır (Zaher ve ark., 2007).

Kesikli sistemlerde, çürütücüye aşı maddesi eklenerek veya eklenmeden bir kez taze atıkla doldurulur. Tüm ayrışma adımları katı halde (%30–40 toplam katı) sıralı bir şekilde ilerler. Buna rağmen kesikli sistemler arazi doldurmadan ibaretmiş gibi görülebilirler. Fakat iki temel özelliği vasıtasıyla toprak doldurmada gözlemlenen 50–100 kez daha fazla biyogaz üretebilirler. İlk temel özelliği asitler, besi maddeleri ve aşı bakterilerin ayrılmasını sağlayan sızıntı sıvısı sürekli geri dönüşümlüdür. İkinci temel özelliği ise kesikli sistemde toprak doldurmada gözlemlenen daha yüksek sıcaklıklarda çalışmasıdır. Gelişmekte olan ülkelerde, basit tasarımı, proses kontrolü, sağlamlılık, ağır kirletici ve düşük yatırım masrafları gibi özellikleri kesikli sistemlerin tercih edilmesini sağlamaktadır. Kesikli sistemlerin ayırıcı özelliği, asidifikasyon devresinin metanojenesisden çok fazla olduğu birincil aşama ve asitlerin biyogaza dönüştürüldüğü ikinci aşama arasındaki farkın açık olmasıdır. İki aşamalı ardışık kesikli reaktörlerde asitlerin dönüşümüyle üretilen asitlerin tüketilmesini sağlamaktadır. Böylece daha güvenilir proses performansı ve az kararsız biyogaz tüketimi olmaktadır. Kesikli sistemlerin teknik açıdan basit olması nedeniyle yatırım masrafları, sürekli beslemeli sistemlere göre gözle görünür oranda daha azdır (Vandevivere ve ark., 1999). Şekil 1.7.'de farklı kesikli sistemlerde geri dönüşümlü sızıntı suyunun şekilleri verilmektedir.

Kesikli sistemler, evsel katı atıkların organik kısımlarından biyogaz üretmek amacıyla yaygın kullanılan bir yöntemdir. Kesikli sistemlerde atıklar aşı bakteri kültürüyle karıştırılır ve çürütme işlemi uzun sürede gerçekleşir. Evsel atıkların organik kısımlarından biyogaz elde edilmesi işlemlerinde çürütme işleminin aşı bakteriyel karıştırılması ve uzun süre alması nedeniyle kesikli sistemler genellikle

biyogaz üretiminde kullanılan sistemlerdir (Rao ve ark., 2000).

Kesikli reaktörler teknik açıdan kolay olması, pahalı olmaması ve sağlam olması nedeniyle avantaj sağlamaktadırlar. Fakat tek aşamalı reaktörlere göre daha fazla arazi ihtiyacı gerektirirler (Verma, 2002). Çizelge 1.11.'de kesikli sistemlerin avantaj ve dezavantajları karşılaştırılmaktadır.



Şekil 1.7. Farklı kesikli sistemlerde geri dönüşümlü sızıntı suyunun şekilleri (Vandevivere ve ark., 1999)

Çizelge 1.11. Kesikli Sistemlerin Avantaj ve Dezavantajları (Vandevivere ve ark., 1999)

Kriter	Avantaj	Dezavantaj
Teknik	-Basit -Düşük teknoloji -Sağlamlık (hacimli maddelerden engelleme yok)	-Tıkanıklık -Geniş hacim ihtiyacı -Reaktör boş kaldığında patlama riski
Biyolojik	-Proses güvenilirliği (reaktörlerin çeşitliliği)	-Düşük biyogaz verimi -Düşük organik yükleme
Ekonomik & Çevresel	-Ucuz, gelişen ülkelerde uygulanabilirlik	-Çok geniş arazi alanı ihtiyacı

Dearman ve Bentham (2007) ardışık kesikli reaktörün yüksek konsantrasyondaki uçucu yağ asitlerinin metana dönüşümünde etkili olduğunu bildirmişlerdir.

Forster-Carneiro ve ark. 2006 yılında yaptıkları evsel atıkların organik kısımlarının termofilik şartlarda anaerobik çürütülmesi çalışmasında, kesikli reaktörde atık su çamuru ekleyerek metan üretimini 0,29 L CH₄ /g UK bulmuştur. Forster-Carneiro ve ark. 2007 yılında yaptıkları çalışmada ise evsel atıkların ardışık kesikli reaktörde termofilik şartlarda anaerobik parçalanmasında çürütülmüş evsel atık ve atık su çamurunu sisteme aşı çamuru olarak vermişlerdir. Atık su çamurunun aşı çamuru olarak kullanılmasının daha iyi sonuç verdiğini bildirmişlerdir.

1.2.5. Anaerobik Parçalanma Avantaj ve Dezavantajları

Anaerobik parçalanmayla ilgili yapılan çalışmalarda anaerobik arıtımın avantajlarının dezavantajlarından daha fazla olduğu görülmüştür. Anaerobik arıtmanın avantajları (Speece, 1995; İleri, 2000; Rao ve ark., 2000; Crowe ve ark., 2002; Metcalf & Eddy, 2003; Liao ve ark., 2006; Oerther ve ark., 2006; Angelidaki ve ark., 2006; Jianguo ve ark., 2007);

- 1) Proses kararlılığının sağlanması: Prosesin kararlılığı farklı çevre koşullarında verimli kirlilik giderim kapasitesi olarak tanımlanabilir. Proses kararlılığı etkili biyokütle oluşturmak için sağlanır.
- 2) Atık biyokütle giderim masraflarının azaltılması: Aşırı biyokütle senteziyle ilişkili giderim masraflarını önemli derecede azaltır. Bu nedenle giderim masrafları genellikle aynı atık suda aerobik sistemlerin % 10'u kadardır. Azot ve fosfor gereksinimleri buna bağlı olarak azalmaktadır.
- 3) Klorlanmış organik toksisite seviyelerinin azaltılması: Klorlanmış bileşikler anaerobik şartlarda transfer edilmesiyle birlikte toksisite seviyeleri azaltılır.
- 4) İşletme bakımının azaltılması: Aerobik arıtıma göre daha düşük teknoloji ve daha az işletme giderleri gerektirebilir. Havalandırma için enerji ihtiyacı yoktur.
- 5) Hava kirliliği önlenmesi: Organik bileşiklerin birçoğu uçucu olması nedeniyle aerobik arıtmada biyolojik olarak parçalanmadan önce havaya yayılırlar. Böylece hava kirliliğine sebep olurlar. Anaerobik parçalanmada bu sakıncanın olmaması nedeniyle aerobik sistemler yerine tercih edilir.
- 6) Ekolojik uyumlu enerji korunumu ve ekonomik faydaları,
- 7) Mevsimsel arıtma kolaylığı: Şeker ve şarap fabrikaları gibi yılda sadece 2-4 ay

işletilen mevsimsel işletmelerin atık sularının giderilmesinde anaerobik arıtma uygulanabilir.

- 8) Çamuru kararlı hale getirerek daha fazla bozunmasını önler.
- 9) Aerobik arıtmaya kıyasla daha az biyokütle ve çamur üretilir.
- 10) Çıkan çamur patojenlerden arındırılmış ve verimli olması nedeniyle toprak şartlandırıcı olarak kullanılabilir.
- 11) Kararlı olan çamurun koku problemi yoktur.
- 12) Besi maddesi ihtiyacı düşüktür.
- 13) Aktif havasız biyokütle uzun süre beslenmeden korunabilir.
- 14) Proses çok yüksek organik yüklerde etkilidir.
- 15) Tropik iklimlerde kullanılma imkânı vardır.
- 16) Tesisin kapladığı alan azdır.
- 17) Mekanik donanım maliyeti düşüktür.

Anaerobik parçalanmanın avantajlarının yanında dezavantajları da göz önünde bulundurulmalıdır. Örneğin düşük işletme sıcaklığı veya sulandırılmış atık sularda anaerobik parçalanma pratik olmayabilir. Yüksek alkaliniteli atık sularda deşarj standartlarını sağlamada çok düşük BOİ gerekli olabilir. Anaerobik parçalanmanın dezavantajlarını sıralayacak olursak (Speece, 1995; İleri, 2000; Crowe ve ark., 2002; Metcalf & Eddy, 2003; Park ve ark, 2005; Angelidaki ve ark., 2006);

- 1) Biyokütlenin gelişimi için başlangıçta uzun zaman gereklidir.
- 2) Sulandırılmış veya karbonhidratlı atık sularda yetersiz alkalinite üretim potansiyeline sahiptir.
- 3) Sülfat oluşumunda sülfid ve koku oluşur.
- 4) Nitrifikasyon yoktur.
- 5) Düşük sıcaklıklarda kinetik hızları düşüktür.
- 6) Sisteme dışardan ısı girdisi olur.
- 7) Sıcaklık, pH gibi parametrelerin kontrolünü daha fazla gerektirir.
- 8) Anaerobik ortamdaki metan fermantasyon bakterileri çok hassas organizmalardır.
- 9) Atıkların anaerobik çürütücüye verilmeden önce ayrılması gerekir.

Anaerobik biyoteknoloji, biyokütle enerjisinin elde edilme yöntemlerinden biridir. Hem çevre kirliliğine neden olan atıkların arıtımını sağlaması hem de değerli bir yan ürün olan metan gazı üretebilmesi sebebiyle anaerobik biyoteknoloji yenilenebilir enerji kaynakları arasında dikkat çekmektedir. Ayrıca yaygın olarak kullanılan diğer arıtma yöntemlerine göre daha az enerji ve besin gerektirmesi daha düşük işletme maliyetine sahip olması, mevsimsel olarak sunması ve üretilen metan gazından ısı ve enerji elde etmede kullanılması anaerobik parçalanmayı daha çekici kılmaktadır. Son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarına ilginin artmasının diğer bir nedeni ise asit yağmurları, küresel ısınma, ozon tabakasındaki incelme gibi yanma ürünleri kaynaklı küresel çevre sorunlarının artmasıdır (Demirer, 2001).

1.3. Biyogaz

Organik maddelerden havasız ortamda mikroorganizmalar vasıtasıyla üretilen gaza 'biyogaz' adı verilir (Lantz ve ark., 2007). Biyogaz, evsel organik atıklardan elde edilen çevre dostu bir enerji kaynağıdır. Biyogazın içeriği % 50–80 metan, % 20–50 karbondioksit, % 0–0,4 hidrojen ve az miktarda hidrojen sülfür ve azottan oluşmaktadır (Elango ve ark., 2006, Lantz ve ark., 2006). Biyogaz, hayvan gübreleri ve bitki atıkları gibi her türlü organik maddenin havasız koşullarda fermantasyonu sonucu elde edilen ve bileşiminde metan ve karbondioksit bulunan gaz karışımıdır (Deniz, 1987).

1.3.1. Biyogaz ve Bileşimi

Biyogaz, hidrojen dışında diğer gaz formunda bulunan enerji kaynaklarına göre daha düşük enerji içeriğine sahiptir. Ancak hidrojene göre ısı değeri daha yüksektir. Havadan daha hafiftir. Hava içerisinde bulunduğu durumda tabana çökmemektedir. Bu nedenle havayla daha hızlı karışır ve havadaki oranı düşer. Bu özelliği ani patlama ve yanma tehlikesini azaltmaktadır. Tutuşma sıcaklığının yüksek olması bu açıdan önemli bir avantajdır. Hava içerisinde yanma hızı (0,25 m/s) düşüktür. Bunun nedeni CO₂ içermesidir. Yanması için hava içerisinde en az % 5 oranında bulunması gerekmektedir. Ancak bu oran ideal bir yanmanın sağlanması

için % 20–30 olarak seçilmektedir. Biyogazın yanması için gerekli miktarda hava ile karışması ve tutuşma sıcaklığına ulaşması gerekmektedir. Bu nedenle yanma ortamından geriye doğru alevin ilerleme tehlikesi çok azdır. Biyogazın yanması sonucu su buharı, karbondioksit, sülfid dioksit, azot oksitler, karbonmonoksit ve is oluşmaktadır. SO₂'nin nedeni gazda bulunan H₂S'dir. Biyogazın temizlenmesi durumunda kükürt dioksitin oranı azalır. Gazın içerdiği H₂S tamamen temizlenmediği için yanma sonucu oluşan emisyon değerlerinin azaltılması zordur (Acaroğlu, 2003). Biyogaz, kokusuz, renksiz yanıcı ve kararlıdır, toksik değildir. Mavi dumanla yanan ve metan içeriği % 60–70 arasında olduğu zaman kalorifik değeri 4500–5000 kcal/m³ dür (İgoni ve ark., 2008). Biyogaz kaynakları; tarımsal biyokütle, arıtma çamuru ve çöp deponisidir (Erdin ve ark.) Çizelge 1.12.'de farklı atıklardan elde edilen biyogazların özellikleri verilmektedir.

Çizelge 1.12. Farklı Atıklardan Elde Edilen Biyogazların Özellikleri (Erdin ve ark.)

Gaz Bileşeni ve Birimi		Biyogaz Kaynağı		
		Tarımsal Biyokütle	Arıtma Çamuru	Çöp Deponisi
CH ₄	%	60-70	55-65	45-55
CO ₂	%	30-40	45-35	30-40
N	%	<1	<1	5-15
H ₂ S	Ppm	10-200	10-40	50-300

Organik katı atıklar anaerobik çürütmeye biyogaz elde edilmesi nedeniyle benzin yerine kullanılabilen mükemmel bir enerji kaynağıdır. Biyogaz elektrik üretiminde ve ısıtmada kullanılabilir (Krzystek ve ark., 2001). Biyogaz üretimi, önemli çevre sorunlarına yol açan katı atıkları araziye serme alışkanlığını ortadan kaldırır (Sorensen, 2004). Ülke ekonomisi ve tarımsal üretimle uğraşanlar açısından biyogazın bir diğer önemi de fermente olmuş değerli bir organik toprak şartlandırıcı elde edilmesidir. Böylece özellikle kırsal kesimde temiz bir çevrede yaşamın yanında gübrelerle yayılan hastalıklar da azaltılmış olacaktır. Bu nedenle biyogazın

tüm faydaları göz önüne alınıp yapılacak olan çalışmalarla ülke ekonomisine katkı sağlanmalıdır (Deniz, 1987).

Biyogaz üretiminin amaçları (Acaroğlu, 2003; Oerther ve ark., 2006);

- 1) Kaliteli toprak şartlandırıcı ve enerji elde edilmesi,
- 2) Diğer sistemlere kıyasla düşük koku problemi olması,
- 3) Patojen giderimi,
- 4) Toprak şartlandırıcının korozif etkisinin azaltılması,
- 5) Fermente edilmiş biyokütle algler için besin elementi olması,
- 6) Atmosferdeki metan ve amonyak miktarının azaltılması,
- 7) Besin maddeleri artıklarının değerlendirilmesi,
- 8) Organik maddelerin dezenfeksiyonu,
- 9) Organik katı ve sıvı atık sorununun çözümüne yardımcı olması olarak sıralanmaktadır.

Özellikle arazinin pahalı olduğu büyük şehirlerde katı atıkların araziye serilmesi uygun değildir. Piroliz ve yakma gibi diğer arıtma metotları hava kirliliğine sebep olmaları dolayısıyla biyogaz daha çok tercih edilmelidir (Elango, 2007).

1.3.2. Ülkemizde ve Dünyada Biyogazın Kullanımı ve Geleceği

Biyogaz, katı atıkların arıtımında, çamurların stabilizasyonunda ve organik substratların anaerobik parçalanmasında kullanılan eski bir proses olan anaerobik parçalanmanın ürünüdür (Yadvika, 2004).

Biyogaz Kullanımının Tarihçesi

Biyogaz kullanımının tarihçesi Asurlular'a dayanmaktadır. Asurlular ve daha sonra İranlılar banyo ısıtmasında biyogazı kullanmışlardır. 17. yüzyılda Jan Baptista Van Helmont, organik maddelerin bozunumu ile gaz oluştuğunu, 1776'da Alessandra Volta organik maddelerin bozunma hızı ile yanıcı gaz miktarı arasında bir paralellik olduğunu ortaya koymuştur. İlk kez 1859 yılında Hindistan'da biyogaz üretilmiştir (www.biyogaz.com).

Türkiye’de biyogaz konusundaki çalışmalar ilk akademik düzeyde başlamıştır. Projelere bağlı düzenli çalışmalar ise daha sonra başlamıştır. Biyogaz konusunda ülkemizde yapılan ilk çalışma, A.Ü. Fen Fakültesi’nde Kimya Yüksek Mühendisi Cengiz Işıksalan tarafından yürütülen ‘Çeşitli Tarımsal ve Endüstriyel Artıklardan Yüksek Humus Değerli Gübre ve Metan Gazı Üretimi’ konulu doktora tezi belirtilebilir (Tekinel ve Korukçu, 1982). Toprak ve Gübre Araştırma Enstitüsü’nde biyogaz çalışmaları 1957 yılında başlamıştır. O yıllarda son derece hevesli bir kadro bu iş için çalışmış, daha sonra 1962–1967 yılları arasında Eskişehir Bölge Topraksu Araştırma Enstitüsü’nde yapılan çalışmalarda ilk veriler elde edilmiştir. Konunun öneminin kavranamaması nedeniyle yapılan çalışmalara rağmen biyogaz tesisleri yaygınlaştırılamamıştır. Petrol krizi sebebiyle 1976 yılından sonra biyogaz tekrar gündeme gelmiştir. 1978 yılında Türkiye Şeker Fabrikaları Etimesgut çiftliğinde 54m³ kapasiteli plot bir tesis kurulmuştur. Daha sonra 1979 yılında Ankara Merkez Topraksu Araştırma Merkezi tarafından 2 adet biyogaz tesisi kurulmuştur. 1980 yılından sonra biyogaz için asıl önemli gelişmeler olmuştur. 1982 biyogaz için önemli bir yıldır. Bu yıl içerisinde biyogaz başmühendisliği kurulmuş ve biyogaz araştırma laboratuvarı inşaa edilmiştir. Bu sırada ülkemizde ciddi bir biyogaz projesi başlatılmış ve pilot uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Daha sonra biyogaz, Merkez Topraksu Araştırma Merkezi -Ankara’da daha sonra değiştirilen adıyla Köy Hizmetleri Ankara Araştırma Enstitüsü’nde çalışma alanı olmuştur. O tarihte, her ile 3 adet, bölge merkezlerine 5 adet biyogaz tesisi kurulumu planlanmış, işletmeye açılmıştır. Bu sırada da mevcut özel girişimlere kredi ve teknik yardım sağlanmıştır (Deniz, 1987).

Türkiyede 2000’li Yıllarda Biyogaz Kullanımı ve Geleceği

2000’li yıllara kadar biyogazla ilgili uygulama çalışmaları durgunluk dönemine girmiştir. Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü konuya hala önem vermektedir. 21 Ocak 2004 tarihinde T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİEİ) kurumunda biyogaz konusunda bir toplantı yapılmıştır. Çizelge 1.13.’de ülkelerin CO₂ emisyon göstergeleri temel dünya enerji istatistikleri kaynağından verilmiştir. 2002 yılı itibariyle yerel yönetimler de bu

konuya ilgi duymaya başlamıştır. Biyogaz T.C. Sanayi ve Ticaret Bakanlığı ve T.C. Tarım ve Köy işleri Bakanlığı'nca da bilinen ve desteklenen bir yakıttır. Türkiye'de biyogaz tesislerinin kurulması için uluslararası firmaların ilgisi çoktur. 2004 yılında önceliğin tavuk çiftliklerinde olmak üzere diğer büyükbaş ve küçükbaş hayvan çiftlikleri de bu konuya önem vermektedir. 8. Beş Yıllık Kalkınma Planı kapsamında 2005 yılında birçok yerleşim yerinde biyogaz tesisleri kurulmuştur. Yapılan çeşitli değerlendirmelerde Türkiye biyogaz potansiyeli 2,5–4,0 milyar m³ (Yaklaşık 25 milyon kWh) olarak belirtilmektedir (www.biyogaz.com). Ülkemizde sadece hayvan varlığımızdan elde edilecek gübrenin biyogaz üretiminde kullanılmasıyla yaklaşık 3–3,5 milyar m³/yıl oranında biyogaz üretiminin gerçekleşmesi mümkün görülmektedir. Bu enerjinin de yaklaşık olarak 2–2,5 milyon ton taşkömürü/yıl veya 20–25 milyar kWh elektrik enerjisine eşdeğer olduğu belirtilmektedir (www.kimyamuhendisi.com).

Gelişmekte olan ve gelişmiş ülkelerde olduğu gibi ülkemizde de ekonomik gelişmeler ve nüfus artışı her geçen gün enerji ihtiyacının artmasına neden olmaktadır. Bu enerji gereksinimi ülkemizde genellikle fosil yakıtlardan ve hidrolik kaynaklardan karşılanmaktadır. Ancak zamanla talebi karşılayamaz duruma gelen bu kaynakların kullanımı yoğun bir çevre kirliliğine neden olmaktadır. Doğadaki alıcı ortamların kirlilik özümleme kapasitelerinin hızla aşılmağa olduğu ve enerji darboğazıyla karşı karşıya kalındığı ülkemizde ucuz, temiz ve sürdürülebilir bir enerji politikası zorunlu hale gelmiştir. Bu enerji politikası ancak yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını içerdiği sürece çevresel ve ekonomik açıdan verimli olacaktır (Demirer, 2001). Gelecekte fosil yakıtların fiyatlarının artmasıyla ve siyasi özendirmelerin arttırılmasıyla rekabet ortamı gelişebilir (Lantz ve ark., 2007).

Ülkemizde küçük yerleşim yerlerinde hayvan gübre atıklarından ısınma, ısıtma amaçlı anaerobik yollarla metan gazı üretimi küçük ve pratik tesislerde uzun yıllardır yapılmaktadır. Ayrıca ülkemizde atık su arıtma tesislerinden çıkan çamurların anaerobik yollarla parçalanmasıyla oluşan metan gazı tesisin elektrik enerjisini karşılamaktadır. Avrupa Birliği uyum yasaları ve Tübitak 2023 yılına yönelik enerji gösterim planları da göz önünde bulundurularak metan gazı üretiminin arttırılmasına yönelik özellikle kırsal kesimlerde teşvik projeleri uygulanmaktadır.

Ülkemizde atık su altyapı ve evsel katı atık bertaraf tesisleri tarifelerinin belirlenmesine ilişkin yönetmeliğin üçüncü bölümünde kirleten öder ilkesi dikkate alınarak evsel katı atık idareleri tarafından her atık üreticisine sadece aldıkları maliyetleri dikkate alınarak çöp vergisi uygulanmaktadır. Gelişmiş ülkelerde atıklar geri kazanılarak ülke ekonomisine önemli faydalar sağlamaktadır. Ülkemizde bunun teknolojik ve toplumsal altyapısı kurulmalıdır (Recycling Industry, Kasım 2007). Ülkemizdeki mevcut belediyelere ait sadece 16 adet düzenli depolama tesisi ve 1 adet kompost tesisi bulunmakta ve evsel atıkların yaklaşık % 34'ü mevzuata uygun olarak bertaraf edilirken, % 66'sı düzensiz depolanmaktadır (Su ve Çevre Teknolojileri, 2005). Çevre ve Orman Bakanlığından alınan bilgilere göre ülkemizde günde 65.000 ton, yılda 23 milyon 400.000 ton çöp üretilmektedir. Üretilen çöp miktarı ve içeriği bölgelerde ve mevsimlerde farklılık göstermektedir. Toplanan çöp içerisinde geri dönüştürmeye değer plastik, cam, metal, kâğıt gibi maddelerin oranı % 15–25 arasında değişmektedir. Toplanan çöp içerisinde organik madde miktarı ise % 40–60 arasında değişmektedir (Mançuhan, 2006). Ülkemizde biyogaz üretimine yönelik altyapı çalışmaları uygulanmalıdır. Bunların başında halkın eğitimle bilinçlendirilmesi gelmektedir (Recycling Teknoloji, Kasım 2007).

İşçi ve Demirer 2006 yılında yaptıkları çalışmada pamuk atıklarından (pamuk tohumu, sapı ve yağ küspesi) biyogaz elde etmişlerdir. Ülkemizde üretim potansiyeli yüksek olan böyle bir tahıl atığından biyogaz elde edilmesi enerji ihtiyacını karşılamada ülke ekonomisine ve atığın değerlendirilmesi açısından çevrenin korunmasına fayda sağlamaktadır. Ayrıca geleceğe yönelik sürdürülebilir kalkınma planlamasında pamuk atıkları gibi birçok sanayi bitkisinin atıklarının da kullanımı öngörülebilir.

Kavacık ve Topaloğlu 2007 yılında 7. Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresinde peynir altı suyu ve gübre karışımından biyogaz üretimi adlı bildirimlerinde peynir altı suyunun fermantasyonu ve biyogaz üretim potansiyelini incelemişlerdir. Yaptıkları deneylerden peynir altı suyunun anaerobik koşullarda oluşturduğu metan gazıyla ülke ekonomisine olabilecek katkısı görülmektedir.

Ülkemizde biyoatıklardan biyogazla ve elektrik enerjisi üretim çalışmaları gün geçtikçe artmaktadır. Örneğin Konya' da Konet firması hayvan kesiminde günde

7 ton kan, 20–25 ton da işkembe atığı açığa çıkmaktadır. Kan ve işkembe atıklarından elektrik üretmek için proje geliştirilmiştir. Mevcut tesisin yanına kurulacak olan geri dönüşüm ünitesi ile kan ve işkembe gibi doğal atıkların önce biyoyakıta ardından da elektriğe dönüştürülmesi planlanmaktadır. Elde edilen elektrik enerjisi tesisin elektrik ihtiyacını fazlasıyla karşılayacağı düşünülmektedir. Yine Antalya’da merkez ve çevre ilçelerin çöplerinden elektrik enerjisi üretimi planlanmaktadır (Recycling Teknoloji, Eylül 2007).

Dünyada Biyogaz Kullanımı ve Geleceği

Dünyada yılda bir milyon tondan fazla organik atıktan biyogaz elde edilmektedir. Avrupa’da biyogaz elde edilmesi amacıyla evsel organik katı atıkların anaerobik çürütme çalışmaları artmaktadır (Angelidaki, 2006). Evsel katı atıkların planlanması çalışmalarının çevre koşullarını iyileştirmek amacıyla önemi artmaktadır (Wilson, 2001) Günümüzde arazi fiyatlarının ve fosil yakıtların vergilerinin artması nedeniyle yenilenebilir bir enerji kaynağı olan biyogaza ilgi artmaktadır. Evsel nitelikli atıkların parçalanmasında anaerobik çürütme prosesleri gelecekte iyi rekabetçi alternatif enerji kaynağı olacağı düşünülmektedir (Jianguo ve ark., 2007).

Asya’da son yıllarda milyonlarca ilkel teknolojide biyogaz tesisleri inşa edilmiştir. Hindistan’da bir milyon kadar, Çin’de ise yedi milyona yakın, biyogaz tesisi bulunmaktadır. Günümüzde Kuzey Amerika’da da biyogaz üretimine ilgi duyulmaktadır (Fischer and Krieg,).

Davidsson ve ark. (2007) organik atıkların, araziye serme ve yakma yerine anaerobik yollarla çürütülmesinin, İsveç ulusal hedeflerine ulaşmayla sürdürülebilir kalkınmayı artırma yollarından biri olduğunu belirtmişlerdir. İsveç’te özellikle 2005 yılından bu yana organik atıkların araziye serilmesinin yasaklanmasıyla, organik atıklardan yararlanma yollarına daha fazla ihtiyaç duyulmaktadır. Katı atıkları yakma işlemi İsveç’te yasak değildir. Fakat organik açıdan zengin olan atıkların anaerobik çürütülmesi yakılmasından daha uygundur (Davidsson ve ark., 2007). İsveç’te evsel atıkların çoğuna (% 70’den fazlası) yakma işlemi uygulanmaktadır (Lagerkvist, 2006). İsveç’te 200 den fazla biyogaz üretim tesisi bulunmaktadır. Bu tesislerden üretilen enerji İsveç’te tüketilen toplam enerjinin % 0,3’dür. Tesislerde üretilen bu

biyogazın % 10'u otobüs, kamyon, araba gibi araçlarda benzin yerine kullanılmaktadır. Geriye kalan biyogaz ise ısıtma amacıyla kullanılır (Lantz ve ark., 2006).

Katı atıkların anaerobik çürütülmesi ikinci uluslar arası sempozyum haziran 1999 yılında Barselona'da yapılmış ve sempozyuma 47 ülkeden 350 kişi katılmıştır. Bu toplantıda birçok araştırma ve gelişmeler sunulmuştur (Mata-Alvarez, 2000).

AB komisyonunca 27 Eylül 2001 tarihinde, 'İç Elektrik Piyasasında Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Elektrik Üretiminin Teşvik Edilmesi' isimli bir direktif yayımlanmıştır. Direktifin amacı, çevrenin korunması ve sürdürülebilir kalkınmaya katkıda bulunması şartıyla yenilenebilir enerji kaynaklarının teşvik edilmesidir. Bu direktife üye ülkeler belirlenen ulusal hedefleriyle uyumlu olacak şekilde yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisinin tüketiminin artırılması yönünde gerekli adımları atması ön görülmektedir. Avrupa komisyonun beklentilerine göre 2010 yılına kadar Avrupa Birliğinin toplam enerji tüketimi içerisindeki yenilenebilir kaynaklarının payı % 11,5'e ulaşması hedeflenmektedir (Dölgen ve ark., 2003).

EPA çevre koruma ajansı kuralları besin atıklarının arıtımında kompostlama gibi ucuz metotları kısıtlamaktadır. Ayrıca bu atıkların araziye serilmesinde sera gazlarını arttırması ve kokuya sebep olması nedeniyle anaerobik parçalanma prosesleri tercih edilmektedir (Dearman ve Bentham, 2007).

Kyoto Protokolü, yenilenebilir enerji kaynakları anlaşmasında; 2008–2012 yılları arasında sera gazlarını % 5 azaltmayı hedeflemiştir. Avrupa Birliği yasalarında 2000 yılında ise sera gazlarının 2010 yılına kadar % 12 azaltılması hedeflenmiştir (Cirne ve ark., 2006). Ayrıca Avrupa Birliği 1999 yasalarında 1995 yılından 2016 yılına kadar üretilen evsel nitelikli organik olarak ayrıştırılabilir organik katı atıkların, araziye serilmesinin % 65 oranında azaltılması gerektiği kararına varılmıştır (Neves ve ark., 2006).

Çizelge 1.13. Ülkelerin CO₂ Emisyon Göstergeleri, (Temel dünya enerji istatistikleri, IEA, 1998)

	CO ₂ Emisyonları (M ton)		CO ₂ Emisyonu/ GSYİİ (kg/1990US\$)		CO ₂ Emisyonu/ GSYİİ (PPP) (kg/1990US\$)		Kişi Başı CO ₂ Emisyonu (ton/kişi)	
		Sıra		Sıra		Sıra		Sıra
ABD	2410	1	0.77	9	0.77	6	20.1	1
Japonya	1128	2	0.34	23	0.44	20	8.9	13
Almanya	857	3	0.16	17	0.58	11	10.5	10
İngiltere	550	4	0.49	14	0.51	16	9.3	12
Kanada	477	5	0.73	10	0.78	5	15.8	4
İtalya	436	6	0.36	31	0.41	22	7.5	21
Fransa	376	7	0.28	35	0.33	36	6.4	23
Kore	370	8	0.96	5	0.69	8	8.0	16
Meksika	326	9	1.07	4	0.17	18	3.7	28
Polonya	320	10	4.10	2	1.24	2	8.3	14
Avustralya	311	11	0.81	8	0.86	3	16.6	3
İspanya	254	12	0.44	19	0.46	19	6.5	22
Türkiye	188	13	0.90	6	0.41	23	2.9	29
Hollanda	171	14	0.49	15	0.56	12	10.9	8
Belçika	122	15	0.55	13	0.63	10	12.0	5
Çek Cumhuriyeti	121	16	4.57	1	1.31	1	11.7	6
Yunanistan	83	17	0.85	7	0.70	7	7.9	17
Avusturya	62	18	0.33	24	0.40	24	7.6	20
Finelanda	60	19	0.10	20	0.64	9	11.6	7
Macaristan	57	20	1.62	3	0.8	4	5.7	26
Danimarka	57	21	0.35	22	0.49	17	10.8	9
Portekiz	54	22	0.65	11	0.42	31	5.5	27
İsviçre	54	23	0.21	38	0.33	38	6.1	24
İsviçre	41	24	0.17	29	0.27	29	5.7	25
İrlanda	38	25	0.17	16	0.24	14	10.4	11
Norveç	34	26	0.22	27	0.33	27	7.8	18
Yeni Zelanda	31	27	0.59	12	0.55	13	8.1	15
Lüksemburg	7	28	0.15	18	0.53	15	16.9	2
İzlanda	3	29	0.28	26	0.38	25	7.7	19

1.3.3. Biyogaz Üretiminin Verimliliğinin Arttırılması

Biyogaz verimi ve biyoprosesin dönüşümü, atığın özelliğine ve çevre şartlarının farklılığına bağlı olarak çeşitlilik gösterir (Rao ve ark., 2000). Uygun işletme koşullarının oluşturulmasıyla prosesin verimi arttırılarak daha fazla metan gazı oluşumu sağlanabilir (Björnsson, 2000). Fiziksel, kimyasal ve biyolojik ön işlemler veya bunların kombinasyonu hidroliz gibi hız sınırlayıcı adımda gereklidir (Torres ve ark., 2007).

Anaerobik sistemlerde biyogaz üretimini arttırmak için (Mendes ve ark., 2006);

1) Anaerobik çürütücüye enzim, asit, ağır metaller ve iz elementler eklenebilir.

2) Sistemde sıcaklık, pH, yükleme hızı gibi parametrelerde değişiklik yapılabilir.

3) Ön işlem yapılabilir.

4) Sisteme dışardan aşı çamur eklenebilir.

Yadvika ve ark. 2004 yılında yaptıkları çalışmada biyogaz üretimini arttırmak için farklı metotları;

1) Ekleyicilerin kullanılması,

2) Sistemde çamurun veya çamur süzütüsünün geri dönüşümü,

3) Sıcaklık, bekleme zamanı ve substratın partikül boyutu gibi işletimsel parametrelerin çeşitliliği,

4) Biyofiltre kullanımı olarak sıralamışlardır.

Kimyasal veya biyokimyasal maddelerin farklı işletim koşullarında eklenmesi de biyogaz üretimini arttırmaktadır. Bu maddeler, asetik asit ve metan gazı oluşum evrelerinde prosesin biyogaz üretim verimini ve hızını arttırmaktadır. Anaerobik çürütme proseslerinde metan gazı üretimini arttırmak için ön işlem gerekmektedir. Ön işlem, karmaşık organik yapıdaki maddelerin mikrobiyolojik yollarla daha kolay parçalanmış basit moleküllere indirgenmesini sağlar (Yadvika ve ark., 2004). Anaerobik parçalamada, verimi arttırmak için kimyasal madde ve enzim ekleme gibi biyokimyasal ön işlemler ve sıcaklık değişimi gibi fiziksel yöntemler uygulanabilir (Mendes ve ark., 2006). Atık su arıtma tesisi aktif çamur anaerobik parçalanmasında, hidroliz reaksiyonu hız belirleyici reaksiyondur. Mekanik, termal, kimyasal, ultrasonik gibi ön işlemler biyogaz üretim verimini arttırabilmektedir (Dewil, 2007).

Anaerobik arıtmada hijyenizasyon, ultrasonik arıtma ve enzim ekleme gibi ön işlemler, tek tek veya birlikte kullanılarak anaerobik çürütücüdeki metan gazı üretim hızı arttırılabilir (Davidsson ve ark., 2006). Ayrıca metan gazı üretim hızının artması tesisin depo hacmini azaltarak işletim masraflarını da düşürmektedir.

Anaerobik çürütme proseslerinde, aşı çamur eklenmesi sistemin daha hızlı adapte olmasını sağlayarak, bekleme zamanını azaltmaktadır. Sisteme eklenen aşı çamur metan gazı üretimini de arttırmaktadır (Yadvika ve ark.,2004).

Biyogaz üretiminde; biyogaz tesisinde kullanılacak maddelerin cinsi, içeriği, işlem sürecinde fermantasyon sıcaklığı, bekleme süresi, uçucu katı madde oranı gibi faktörler fermantasyonu etkileyerek oluşacak gaz miktarını ve gazın metan içeriğini etkiler (Deniz, 1987).

Önceki yıllarda evsel nitelikli organik katı atıkların stabilizasyonu mezofilik şartlar altında gerçekleşmekteydi. Anaerobik arıtımın başarısının kanıtlanmasıyla evsel nitelikli organik katı atıkların termofilik şartlarda stabilizasyonuna çalışılarak daha çok verim elde edilmiştir (Angelidaki ve ark., 2006).

Lastella ve ark. 2000 yılında yaptıkları çalışmada; çürütülmüş çamur kullanarak yaptıkları çürütme çalışmasından çıkardıkları sonuçlar;

1) Meyve, sebze ve market atıklarının anaerobik çürütülmesinde çürütülmüş çamurun geri kullanımıyla toprak kirliliği önlenmiştir.

2) Proses biyogaz üretimini arttırmanın yanında çıkış çamurundan meydana gelecek kirliliği azaltmıştır.

3) Çürütülmüş çamurun geri dönüşümü metan gazı üretiminin yanında metan gazı içeriğini de arttırmıştır.

Park ve ark. 2005 yılında yaptıkları çalışmada; atık su çamurunun çürütülmesinde metan gazı verimini arttırmak amacıyla kimyasal ve biyolojik olmak üzere 2 farklı hidroliz prosesi uygulamışlardır. Kimyasal ön işlemden biyolojik ön işleme göre daha iyi sonuçlar elde etmişlerdir. Termofilik ön işlemden metan gazı verimini daha fazla bulmuşlardır. Termokimyasal hidroliz biyolojik hidrolize göre daha hızlı arıtma ve yüksek verim sağlasa da kimyasalların pahalılığı ve yüksek sıcaklık gibi maliyetleri de vardır.

Torres ve ark. 2007 yılında yaptıkları çalışmada evsel katı atıkların organik kısımlarının anaerobik çürütülmesinde alkali ön işlemin karmaşık molekülleri parçalamada en faydalı yöntem olduğunu bildirmişlerdir.

1.3.4. Biyogazın Çevreye Etkileri

Organik maddenin biyogaza dönüşümünün birçok avantajı vardır. Bunlar; enerji kaynağı olması, çürütülmüş atığın toprak iyileştirici olarak kullanılabilmesi, atık giderme problemlerinin giderilmesi, prosesin oksijene ihtiyaç duymaması, fosil yakıtların kullanımını azaltarak atmosferdeki sera gazı emisyonlarını azaltmasıdır (Rao ve ark., 2000; Igoni ve ark., 2008). Biyogaz kararlı, kuvvetli patlayıcı ve enerjinin kaynaktan kontrol edilebildiği bir gazdır. Biyogaz ile birlikte karbondioksit de açığa çıkar ve atmosferdeki karbondioksit seviyesine katkıda bulunulacağı düşünülmemesinin nedeni karbondioksitin aslının bitkilerin atmosferden absorpladığı karbondioksit olmasıdır. Bu nedenle bu karbondioksitin sera gazları etkisine katkıda bulunmayacağı düşünülmektedir. Ayrıca biyogaz katı atıkların araziye serilmesi sonucu oluşacak kokuyu azaltmaktadır (Igoni ve ark., 2008).

Biyogaz üretilmesi sonucu atıkların rastgele atılmasından kaynaklanan su kirliliği, hava kirliliği ve görüntü kirliliğinin önlenmesi, işletmelerin enerji ihtiyacının karşılanması ve ayrışma sonucunda elde edilen ürünün tarımda toprak şartlandırıcı olarak kullanılması sağlanmış olacaktır (Dölgen ve ark., 2003). Çizelge 1.14’de bazı atık türlerinden elde edilen biyogaz verileri verilmektedir.

Çizelge 1.14. Bazı atık türlerinden elde edilen biyogaz verileri (Dölgen ve ark., 2003)

Atık türü	Metan üretimi m ³ / kg-UKM	Metan içeriği, %	Kaynak
Evsel katı atık	0,2	-	Chynoweth vd. (1983)
Tarımsal Kalıntılar	0,337	58,6	Badawi vd.
Tavuk	0,275	55	Alyanak ve Fibeli
%85 EKA + %15	0,29–0,23	57–53	Szikriszt (1992)

Biyokütlenin enerjiye dönüştürülmesi sırasında biyokütlerde kütle ve hacimsel bir azalma söz konusu olmaktadır. Büyük şehirlerde sorun haline gelen

evsel nitelikli çöplerin ve arıtma çamurlarının bertarafında bu atıklardan enerji eldesi, hem ekonomik bir kazanç getirecek hem de nihai bertaraf alanlarındaki depolama hacmi ihtiyacını azaltarak bu alanların ömrünün uzamasını sağlamış olacaktır. Ayrıca biyogaz üretimi sırasında metan oluşumunun engellenmesi, toprak şartlandırıcı değerinin artırılması, bitkilerden enerji eldesi, çiftlik gübresinden enerji üretimi gibi yollarla CO₂ emisyonlarında büyük oranda azalma elde etmek mümkün olmaktadır. Büyük oranlarda fosil yakıt kullanımıyla meydana gelen küresel ısınma biyokütle enerjisinin kullanımı ile belli oranlarda azaltılabilecektir (Erdin ve ark.).

Biyogaz üretimi sonucu açığa çıkan çamurun çok miktarda besi maddesi içermesi ve dezenfekte olmuş olması nedeniyle toprak şartlandırıcı olarak kullanımı tavsiye edilmektedir. Fakat biyolojik olarak ayrıştırılamayan çamurdaki kirlilik çürütücüde kalacak olması toprak şartlandırıcı olarak kullanımında kafa karıştırıcıdır (Igoni ve ark., 2008).

Biyogaz içerisinde, metan ve karbondioksin yanı sıra az miktarda iz elementler de bulunmaktadır. Biyogaz içerisindeki iz elementler ve çalışma ortamında izin verilebilecek en yüksek konsantrasyonlar (maksimum değerleri) mg/m³ olarak Çizelge 1.15'de verilmektedir. Biyogaz, çoğunlukla % 55–60 metan ve % 40–45 karbondioksit gazlarından oluşmaktadır. Metan gazı havayla hacimsel olarak % 5 ile 15'lik karışımlar oluşturduğunda patlayıcıdır. Havadan hafif bir gaz olan biyogaz, yüzeye çıkmak isterken gaz çekme kuyuları ve odalarında hava ile yer değiştirerek birikebilmektedir. Biyogazın birikmesi sonucunda; ortamdaki hacimsel oksijen oranının % 21'den % 17'nin altına düşmesi durumunda ortamdaki havanın 1/4'ü biyogaz ile yer değiştirmiş olacağı için boğulma tehlikesi meydana gelebilir. Biyogaz içerisinde bulunan hidrojen sülfür 800 ppm'i aşması durumunda toksik etki görülebilmektedir (Gönüllü, 1993).

Çizelge 1.15. Biyogaz içerisindeki iz elementler ve çalışma ortamında izin verilebilecek en yüksek konsantrasyonlar (Gönüllü, 1993).

İz elementler	Konsantrasyon mg/m ³	Maksimum değeri mg/m ³
Benzen	0.03–7	
Kloroetilen	0–264	
Propan	1.4–13	1800
Bütan	0.3–23	2350
Pentan	0–12	2950
Sikloheksan	0.03–11	1050
Heksan	3–18	180
Sikloheptan	2–6	1015
Heptan	3–8	2000
Oktan	0.05–75	2350
Cumol	0–32	245
Etilbenzol	0.5–236	435
Toluen	0.2–615	750
Ksilol	0–376	870
Diklorometan	0–6	360
Triklorometan	0–2	50
Tetrakloroetan	0–0.6	65
1,1,1 - Trikloroetan	0.5–4	1080
Dikloroetilen	0–294	40
Trikloroetilen	0–182	260
Perkloroetilen	0.1–142	345
Klorobenzol	0–0.2	230
Hidrojen Sülfür	0–600	15

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Singh ve ark., (1984) sığır atığından farklı katı konsantrasyonlarında biyogaz elde eden günlük 25 g/L beslemeli çürütücülerde 20 günde 30 °C'de metan gazı üretimini ve verimini ölçmüşlerdir. TK % 9 olan katı atıktan, metan gazı üretimini 620 mL, verimini ise 163 m³/ton UK ölçmüşlerdir. TK % 2,25 olan katı atıktan metan gazı üretimini 140 mL, verimini ise 37 m³/ton UK ölçmüşlerdir. Çizelge 2.1.'de farklı katı konsantrasyonlarında çürütücülerin performansları verilmiştir.

Çizelge 2.1. Farklı Katı Konsantrasyonlarında Çürütücülerin Performansları (sabit yükleme hızı 3,8 UK/L/gün)

Ort. Toplam Kati(%)	Bekletme Zamanı (gün)	Parçalanma yüzdesi			Gaz Üretimi	
		Toplam Kati	Uçucu Kati	Selüloz	Günlük (mL)	m ³ / ton UK
2,25	5	17,4	20,6	21,5	140	37
4,5	10	21,2	23,3	14,9	440	115
6,75	15	24,4	25,7	23,1	530	139
9	20	27,8	29,7	32,9	620	163
13,5	30	36,1	38,2	41,8	600	157
18	40	33,9	35,8	32,0	530	139

Organik katı atıkların anaerobik çürütülmesi üzerine Barcelona'da 1999 yılında sempozyum düzenlenmiştir. Bu sempozyumdan yola çıkarak, Mata ve ark. (2000), organik katı atıkların, anaerobik arıtımının en büyük avantajlarından olan sera gazlarını azaltması üzerine çalışmışlardır. Mata ve ark. yapılan çalışmalarını inceleyerek metan gazı üretim veriminin artırılmasının önemini vurgulamışlardır.

Rao ve ark., (2000) Hindistan'nın on birinci büyük ili olan Indora'nın organik atık oranı zengin olan evsel organik katı atıklarından biyogaz üretim veriminin 429-568 m³/ton UK, en yüksek ise 661 m³/ton UK olduğunu bildirmişlerdir. Evsel organik atığın kalorifik enerji değeri ise 5,04 kwh/ton UK'dır. Rao ve ark. yaptıkları deneyler sonucunda evsel atıkların yüksek potansiyelli biyoenerji kaynağı olduğunu ve biyogaz üretiminde faydalı olduğunu ispatlamışlardır.

Krzystek ve ark., (2000) Polanya'nın Lodz kenti evsel organik katı atıklarının anerobik-aerobik ve aerobik-anaerobik arıtma aşamalarından oluşan sistemlerde biyogaz üretimlerini incelemişlerdir. Aerobik arıtmada reaktör sıcaklığı 30 °C anaerobik arıtmada ise 36 °C'dir. Evsel organik katı atıkların anerobik-aerobik (580 m³/ton UK) arıtılmasında, biyogaz veriminin aerobik-anaerobik (175 m³/ton UK) arıtmaya göre daha fazla olduğunu bildirmişlerdir.

Sosnowski ve ark. (2003), farklı özelliklerdeki organik katı atıklar ve atık su çamurundan anaerobik çürütücüde termofilik ve mezofilik şartlarda metan gazı üretimini incelemiştir. Beş farklı atık özellikleri ve termofilik ve mezofilik şartlarda metan gazı üretim miktarı ve hızı karşılaştırılmıştır. Çizelge 2.2.'de deneylerin şartları ve atık özellikleri verilerek biyogaz üretim verimi karşılaştırılmıştır. Birinci ve ikinci deneyler ve diğer üç deneyin ikinci reaktörleri yukarı akışlı çamur yataklı anaerobik reaktördür. Üçüncü, dördüncü ve beşinci deneylerin ilk reaktörleri ise sürekli akışlı tank reaktördür. Tüm deneylerde karıştırma mekanizması mekaniktir. Isıtma elektrik enerjisiyle sağlanmaktadır. Çizelge 2.2'de görüldüğü gibi en çok biyogaz üretimi ve diğer üçüne göre en hızlı organik yükleme Deney 4'de elde edilmiştir.

Çizelge 2.2. Farklı deney koşullarında, biyogaz üretimlerinin karşılaştırılması (Sosnowski ve ark., 2003)

	Deney 1	Deney 2	Deney 3	Deney 4	Deney 5
Atık özellikleri	Aktif çamur	Aktif ç. (%75)+ Org.katı atık(%25)	Organik katı atık	Aktif çamur	Aktif ç. (%75)+Org.katı a. (%25)
Reaktör Hacmi (dm ³)	30	30	9(reaktör1) 14(reaktör2)	9(reaktör1) 14(reaktör2)	9(reaktör1) 14(reaktör2)
Reaktör sıcaklığı (°C)	56	56	56(reaktör1) 36(reaktör2)	56(reaktör1) 36(reaktör2)	56(reaktör1) 36(reaktör2)
Ort.Org. yük.hızı (gUAK/d m ³ gün)	0,392	1,512	2,76	0,669	3,084
H.beklme zamanı (gün)	35	38	8,9(reaktör1) 20,9(reaktör2)	7,33(reaktör1) 44,2(reaktör2)	11,1(reaktör) 17,13(reak.2)
Aşı bakteri (g/ dm ³ UK)	16,2	15,0	4,79(reaktör1) 1,34(reaktör2)	20(reaktör1) 16,2(reaktör2)	25,6(reaktör) 18,4(reaktör2)
Gaz üretimi (m ³ /gUK)	580	427	419	554	532
Biyogaz verimi (m ³ / m ³ ton UK)	19	14	18	24	23

Kim ve ark. (2003) yaptıkları çalışmada; aktif çamurun çürütülmesinden (37°C) önce; Isıl, kimyasal, ultrasonik ve termokimyasal ön işlemlerini uygulayarak metan gazı üretimini sırasıyla 3390, 2827, 3007, 3367 mL/L bulmuşlardır. Ön işlem uygulanmayan da ise 2507 mL/L. Isıl ön işlemde, atık aktif çamuru otoklavda 121°C 'de 30 dakika bekletmişlerdir. Kimyasal ön işlemde ise NaOH, KOH, $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ve $\text{Ca}(\text{OH})_2$ alkalileri eklenmiştir. Isıl-kimyasal ön işlemde ise 7 g/L NaOH eklenerek 121°C 'de 30 dakika otoklavda bekletmişlerdir.

Hansen ve ark., 2004 yılında yaptıkları çalışmada; organik evsel katı atıklardan 55°C 'de 50 günde elde ettikleri metan gazının verimini ölçmüşlerdir. Elde ettikleri metan gazı verimi $495 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{ton UK}$ 'dır. Katı atık; evsel nitelikli organik atıklar ve kâğıt torbalar, nişasta ve glikoz gibi farklı atıklardan oluşmaktadır. Kullanılmış kâğıdın bir kg'nın kalorifik değeri 3.500 Kcal'dir. Glikoz bir gramı 4 kaloridir. Bir gr karbonhidratın yanması 4,1 kalori verir.

Hartman ve Ahring (2005) evsel katı atıkların hipertermofilik (68°C) şartlarda anaerobik parçalanması üzerine çalışmışlardır. Elde ettikleri metan gazı verimi $640\text{--}790 \text{ m}^3 / \text{ton UK}$ 'dır.

Park ve ark. 2005 yılında yaptıkları çalışmada; atık su arıtma çamurunun anaerobik ortamda parçalanmasında biyolojik ve termokimyasal ön işlemi geliştirmişlerdir. Termokimyasal ön işlemde; NaOH (7 gram/L) ilave ederek 121°C 'de 30 dak uygulamışlardır. Biyolojik ön işlemde; aerobik ve anaerobik bakterilerle (1. aşama: Cellulomonasuda ve C. Biazotea, 2. aşama; Clastridium butyricum) hidrolize etmişlerdir. Termokimyasal ön işlem uyguladıkları prosesteki metan gazı verimi $520 \text{ m}^3 / \text{ton VS}$, biyolojik ön işlem uygulanan prosesteki metan gazı verimi $430 \text{ m}^3 / \text{ton UK}$ 'dır. Ön işlem uygulanmayan prosesteki metan gazı verimi $290 \text{ m}^3 / \text{ton UK}$ 'dır.

Oerther, 2006, 21. yüzyılda anaerobik parçalanma üzerine yaptıkları araştırmada anaerobik parçalanmanın tercih edilmesinde prosesin performansının ve ekonomik gelirinin yüksek olmasının en önemli sebep olduğunu bildirmiştir. Oerther aynı çalışmasında organik katı maddenin enerjiye dönüşüm kapasitesi, hidrojen ve asitler gibi faydalı ürünlerin üretilme performansı ve biyokatıların stabilizasyonu ile aynı zamanda patojenlerin giderilmesi gibi pozitif özelliklerini bildirerek anaerobik

arıtımın önemini vurgulamıştır.

Angelidaki ve ark. (2006) evsel organik katı atıkların termofilik şartlarda anaerobik çürütülmesi üzerine yaptıkları çalışmada; 5^oC–65^oC’de ve farklı katı oranlarında (% 1,5–30) metan gazı verimlerini ölçmüşlerdir. Çizelge 2.3’de elde edilen metan gazı verimleri verilmiştir.

Çizelge 2.3. Farklı katı oranlarında (% 1,5–30) elde edilen metan gazı verimleri (Angelidaki, 2006)

UK içeriği (%)	Metan Gazı Verimi (m ³ /ton UK)	Sıcaklık (°C)	Metan Gazı Verimi (m ³ /ton UK)
1,5	410	5	1
3	410	15	3
4,5	350	20	130
6	260	30	300
7,5	260	45	580
9	300	55	420
30	İnhibisyon	65	520

Davidsson ve ark., (2006) yaptıkları çalışmada; atık su çamuru 35^oC’de 40 gün çürütülmeden önce; enzim ekleme (% 6 oranında proteaz enzimi), ultrasonik arıtma ve hijyenizasyon (70^oC 1 saat) ön işlemlerini birlikte ve ayrı ayrı uygulamışlardır. Çalışmalarının sonucunda; en fazla metan gazı verimini (370 m³/ton UK) enzim eklenmiş ultrasonik ön işlemlerde elde etmişlerdir.

Neves ve ark. (2006) yaptıkları çalışmada; arpa atığından metan gazı üretimini arttırmak amacıyla alakali ön işlem uygulamışlardır. 0,3 g NaOH 37^oC’de karıştırılarak eklenmiştir. Alkali ön işlemleri ile elde edilen metan gazı verimi 222 m³ CH₄ /ton UK’dır. Ayrıca % 60 oranında organik evsel atıkla arpa atığını 37^oC’de karıştırarak anaerobik şartlarda elde ettikleri metan gazı verimi 363 m³ CH₄ /ton UK’dır.

Mendes ve ark. 2006 yılında yaptıkları çalışmada; lipit açısından zengin atık su çamurunun (50 mL) 15 günde 35 ± 1 °C'de çürütülmesinde farklı sürelerde (4, 8, 12, 24 sa) enzimatik işlemin (lipaz enzimi, 37 °C) etkisini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada; ham atık su numunesi, enzimatik ön işlem uygulanan ve lipaz ilave edilen numunelerin anaerobik parçalanmasıyla üretilen mL cinsinden biyogaz hacimleri Çizelge 2.4'de görülmektedir.

Çizelge 2.4. Ham atık su numunesi, enzimatik ön işlem uygulanan ve lipaz ilave edilen çamurların çürütülmesi ile üretilen biyogaz hacimleri (Mendes ve ark. 2006)

Numuneler	Üretilen biyogaz hacmi (mL)
Ham atık su numunesi	209 ± 47
Atık su numunesi lipaz eklenmiş	354 ± 34
Atık su numunesi (4 saat enzimatik ön işlem yapılmış)	403 ± 4
Atık su numunesi (8 saat enzimatik ön işlem yapılmış)	383 ± 2
Atık su numunesi (12 saat enzimatik ön işlem yapılmış)	445 ± 29
Atık su numunesi (24 saat enzimatik ön işlem yapılmış)	437 ± 0

Davidsson ve ark. (2007a) Malmö'de üç farklı tip atığın mezofilik şartlarda (35 °C) anaerobik arıtımında metan gazı üretim verimini arttırmak amacıyla beş farklı çalışma yapmışlardır. Atık su arıtma çamuru, kaynakta ayrılmış evsel organik katı atıklar, yağ, sebze ve meyve atıklarının ayrı, ikisinin ve üçünün birlikte anaerobik arıtım alternatifleri ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Beş farklı durumda ele aldıkları çalışmada; 1. durumda sadece atık su arıtma çamuru, 2. durumda organik atık ve çamur ayrı, 3. durumda çamur ve organik atık (uçucu katı: % 80 / % 20) dan oluşmaktadır. 4. durumda çamur+çamur ve yağ tutucu çamuru birlikte (uçucu katı: % 90 / % 10), 5. durumda çamur ve yağ tutucu çamuru (UK: % 90 / % 10)+çamur ve organik katı (UK: % 63 / % 37)+sebze ve meyve atığından oluşmaktadır. Davidsson ve ark. Çizelge 2.5.'de beşinci durumda gösterildiği gibi üç tip atığın karıştırılarak çürütülmesinde en fazla metan gazı veriminin elde edildiğini bildirmişlerdir. Yapılan deneylerin sonuçları Çizelge 2.5.'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 2.5. Farklı durumlarda çeşitli atıkların yıllık atık miktarları, metan gazı verimi ve metan gazı üretimleri (Davidsson ve ark., 2007)

	Çürütülmüş madde türü	Miktar (ton/yıl)	Metan gazı verimi Nm³ton/UK	Metan gazı üretimi (10⁶Nm³/yıl)	Metan gazı üretimi (GWh/yıl)
Durum 1	Çamur	285.000	270	2.3	24
Durum 2	Çamur Organik atık	285.000 20.000	270 395	2.3 1.7 4.0	4.1
Durum 3	Çamur+organik atık	285.000 + 10.059	326	3.5	36
Durum 4	Çamur Çamur+yağ tutucu ç.	237.500 47.500 + 8000	270 301.5	1.9 0.5 2.4	25
Durum 5	Çamur+yağ tutucu ç. Çamur+organik atık Meyve ve sebze atık	47.500+8000 237.500+ 20.000 400	301.5 326 386	0.5 3.7 0.01 4.2	43

Davidsson ve ark. (2007b), evsel organik katı atıklardan metan gazı üretimi çalışmasında; farklı belediyelere ait binalar ve müstakil evlerden alınan 17 çeşit atığın farklı ön ayırma işlemlerinden geçirilerek 60 günde termofilik şartlarda anaerobik çürütücüde metan gazı üretim verimlerini karşılaştırdı. Atıklar farklı illerde bulunan binalar ve müstakil evlerden alınmış ve içerisinde plastik ve kâğıt mutfak atık ambalajları bulunmaktadır. En fazla metan gazı verimi 410 Nm³ / ton UK müstakil evden alınan plastik mutfak ambalajlı katı atığın pervaneli sıkıştırıcı ön işleminden geçirilen sistemden elde edilmiştir. Bu atığın kalorifik değeri 20 MJ/kg TK (8,1 kWh / ton TK)'dir. En az metan gazı verimi ise 275 Nm³ / ton UK müstakil evden alınan kâğıt mutfak ambalajlı katı atığın pervaneli sıkıştırıcı ön işleminden geçirilen sistemden elde edilmiştir. Bu katı atığın kalorifik değeri 21 MJ/kg TK (6,1

kWh / ton TK'dır.

Zupancic ve ark., (2007) Solenya'da yaptıkları çalışmada evsel atık su arıtma tesisinden alınan çamurların mezofilik sürekli beslemeli anaerobik çürütücüdeki uçucu katı, toplam katı ve biyogaz üretim miktarlarını bir yıl boyunca gözlemlemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlarda sistem çıkış suyundaki uçucu katıda artma görülmemiştir ve azalma hızı ise % 71 den % 81'e çıkmıştır. Biyogaz miktarında % 80 artış ve biyogaz üretim veriminin $320 \text{ Nm}^3 / \text{ ton UK}$ 'dan $670 \text{ Nm}^3 / \text{ ton UK}$ 'ya çıktığını bildirmişlerdir. Elektrik enerjisi üretiminin % 130 ve ısı enerjisi üretiminin % 55 arttığı görülmüştür.

Climent ve ark., (2007) İspanya'da yaptıkları çalışmada; çürütülmüş aktif çamurdan termofilik koşullarda ($55 \text{ }^\circ\text{C}$) biyogaz üretiminde, mekanik ve termal ön işlemin etkisini araştırmışlardır. Çamura, ön işlem uygulanmasının hidroliz aşamasını hızlandırması çamurun stabilizasyonu için gerekli bekleme zamanını etkili şekilde azaltması amacıyla uygulamışlardır. Evsel atık su arıtma tesisi aktif çamurunu (500 mL) $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de dört farklı saatte (9, 24, 48, 72 saat) termal ön işleme tabii tutmuşlardır. Elde ettikleri biyogaz üretimi 9, 24, 48, 72 saat ön işlem ile sırasıyla 330 ± 20 , 520 ± 70 , 460 ± 40 , 460 ± 10 , 297 ± 4 mL bulmuşlardır. Termofilik ön işlemin termofilik bakterilerin biyolojik aktivitelerini arttırdığını bildirmişlerdir.

Borowski ve ark, 2007 yılında yaptıkları çalışmada; evsel atık su çamurunun $35 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 60 gün anaerobik koşullarda çürütülmeden önce $55 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de farklı sürelerde (12, 24,36, 48 saat) aerobik ön işlem uygulamışlardır. Farklı sürelerde (12, 24,36, 48 saat) aerobik ön işlem uygulanan evsel atık su çamurunda elde ettikleri biyogaz verimleri sırasıyla; 369, 441, 378 ve $320 \text{ m}^3 / \text{ ton UK}$ 'dır.

İşçi ve Demirer, (2007) pamuk atıklarından biyogaz üretim potansiyeli üzerine yaptıkları çalışmada; pamuk atıklarından kesikli reaktörlerde $35 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de metan gazı üretim verimini araştırmışlardır. Pamuk atıkları; pamuk sapı, pamuk tohumu ve pamuk yağı küspesinden oluşmaktadır. Yapılan çalışmada, pamuk üretiminin ülkemizdeki önemi de göz önünde bulundurularak pamuk atıklarının anaerobik olarak arıtılabilirliği ve önemli bir biyogaz kaynağı olduğu belirtilmiştir. İşçi ve Demirer mikro ve makro elementler eklemek suretiyle 1 gram pamuk

atığından ortalama 65 mL, 86 mL ve 78 mL metan gazının 23 günde üretmişlerdir.

Forster-Carneiro ve ark., İspanya’da 2007 yılında yaptıkları ‘Evsel katı atıkların organik kısımlarının kuru-termofilik anaerobik çürütülmesinde farklı aşı çamur kaynakları’ adlı çalışmasında 6 çeşit aşı çamur kullanmışlardır. Yaptıkları 60 günlük çalışmada; tahıl yem, lokanta atığı, gübre, domuz, çürütülmüş çamur ve sığır kaynaklı aşı çamurları evsel organik katı atığa % 25 oranında eklemişlerdir. En fazla metan gazı verimini çürütülmüş aşı çamurla beslenen reaktörde $530 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{ton UK}$ elde etmişlerdir.

Davidsson ve ark., (2007) yaptıkları çalışmada; atık su çamurunun anaerobik çürütülmesinde enzim ekleme yöntemlerini uygulamışlardır. Sistemde; enzimatik ön işlem ile ve direk enzim ekleme yöntemleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca enzimi; boru hattının girişinden ham çamura ekleme ve geri dönüşüm boru hattından çürütülmüş çamura ekleme yöntemlerini uygulamışlardır. Aktif çamur eklenmesi, çamur partiküllerini kolay azaltması açısından ve çürütülmüş çamur ise çürütücüde çamurun enzimle iyi karışması açısından avantajlıdır. Çürütücülerde emilsülfür + lipaz ve proteaz olmak üzere 2 farklı enzim kullanılmıştır. Enzim ekleme işlemi $45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ’de 4 saat sürmüştür. Elde ettikleri metan gazı verimleri Çizelge 2.6.’da verilmiştir.

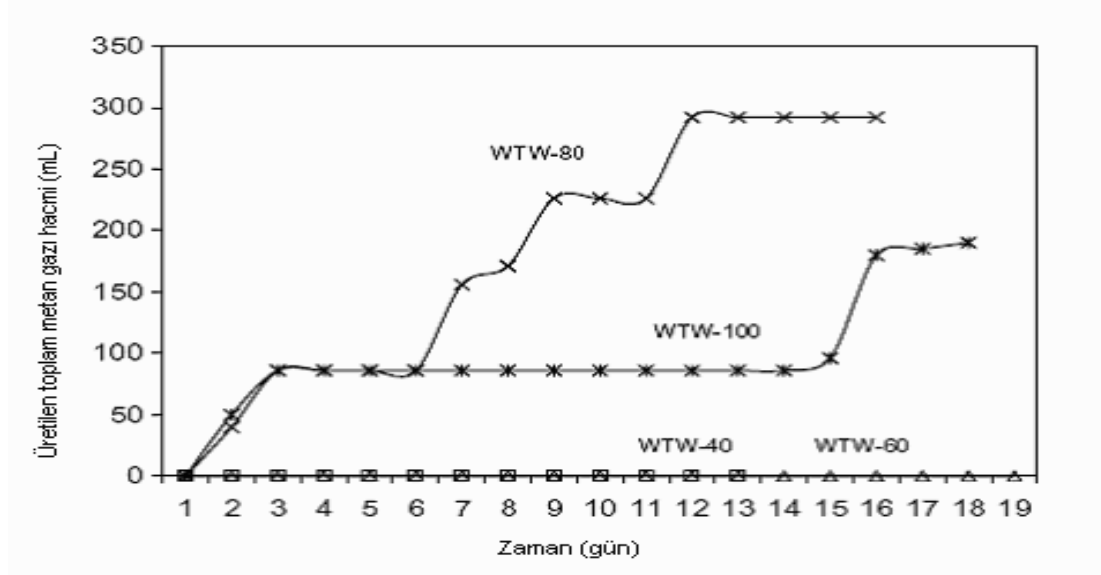
Çizelge 2.6. Enzimatik ön işleme ile elde edilen metan gazı verimleri (Davidsson ve ark., 2007)

Enzimatik ön işlem ve direk enzim ekleme		Ham çamura ve çürütülmüş çamura enzim ekleme	
Eklene Enzim Dozajı	Metan Gazı Verimi m ³ CH ₄ / ton UK	Eklene Enzim Dozajı	Metan Gazı Verimi m ³ CH ₄ / ton UK
% 100 enzim ön işlem ile	426	% 100 enzim ham çamura	398
% 100 enzim direk	420	% 100 enzim çürütülmüş çamura	366
% 20 enzim direk	319	Çürütülmemiş Çamur	233
Çürütülmemiş Çamur	263		

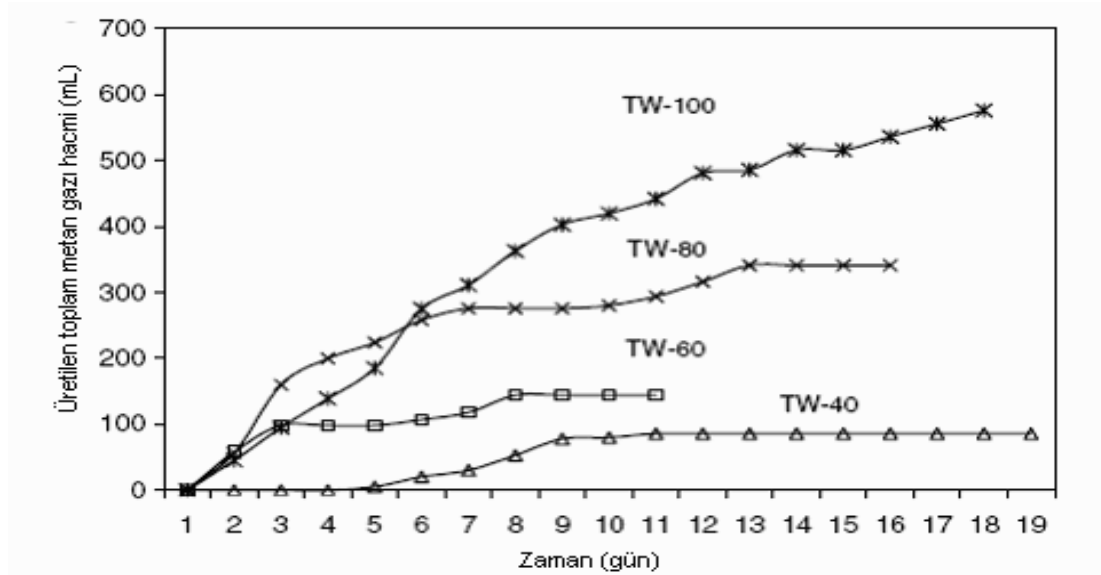
Forster-Carneiro ve ark., İspanya’da 2007 yılında yaptıkları çalışmada; 30 gün ve 90 gün süresince lokanta atıkları, sentetik atıklar ve mekanik olarak ayrılmış evsel atıkları anaerobik reaktörlerde 55 °C’de çürütmüşlerdir. En fazla metan gazı üretimi; 90 gün süresince birinci reaktörde evsel atıkların, ikinci reaktörde mezofilik şartlarda aşırı çamurun çürütüldüğü sistemde görülmüştür. Bu sistem sonunda 90 günde elde edilen toplam metan gazı hacmi 22.700 mL’dir.

Lopez ve Espinosa Küba’da 2007 yılında yaptıkları ‘Katı atıkların anaerobik çürütülmesinde alkali ön işlemin etkisi’ adlı çalışmasında; farklı konsantrasyonlarda (40 mL, 60 mL, 80 mL, 100 mL) besleme yapılan 1 L karıştırmalı reaktörlere kireç (Ca(OH)₂) eklenerek ön işlem uygulanmıştır. Alkali ön işleminde kireç ilavesiyle pH’da ani bir artışa neden olmuştur. Sonuç olarak 40 mL, 60 mL, 80 mL, 100 mL konsantrasyonlarında besleme yapılan alkali ön işlemin metan gazı üretim verimleri sırasıyla 41, 53, 101 ve 150 m³ CH₄ / ton UK’dır. Ön işlem uygulanmadan kireç (Ca(OH)₂) eklenerek elde edilen metan gazı üretim verimleri sırasıyla 0, 0, 53 ve 55 m³ CH₄ / ton UK’dır. Şekil 2.1.’de ve Şekil 2.2.’de kireçle ön işlem uygulanan ve

uygulanmayan anaerobik çürütücü reaktörlerinin toplam metan gazı hacimlerinin günlere bağlı grafikleri görülmektedir. Lopez ve Espinosa'nun çalışmasında Şekil 2.1 ve Şekil 2.2.'de görüldüğü gibi alkali ön işlemi metan gazı hacmini artırmıştır.



Şekil 2.1. Evsel organik katı atıkların ön işlem uygulanmadan metan gazı hacimlerinin günlere bağlı grafiği (Lopez ve Espinosa, 2007)



Şekil 2.2. Evsel organik katı atıkların ön işlem uygulanarak elde edilen metan gazı hacimlerinin günlere bağlı grafiği (Lopez ve Espinosa, 2007)
Parawira ve ark., (2007) bitkisel atıklardan metan gazı üretim verimi üzerine

çalışmışlardır. Şeker pancar yaprakları, patates, soyulmuş patates enerji değerleri sırasıyla 2100, 2500 ve 3400 kWh / ton UK'dır. Şeker pancarı yaprakları, patates, soyulmuş patates, pancar/patates (1/2) ve pancar/patates (1/3)'den mezofilik şartlarda evsel katı atık aşı çamur eklenerek yapılan anaerobik parçalanma sonucunda elde edilen enerji değerleri sırasıyla; 2100, 2500, 3400, 3900 ve 3900 kWh / ton UK'dır.

Azbar ve ark., (2008) kimyasal ön işlem ile zeytinyağı atık suyunun kesikli sistemde anaerobik parçalanmasındaki gelişmeyi incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada sülfürik asitle parçalama, demir klorür ($FeCl_3$), demir sülfat (Fe_2SO_4) ve alüminyum sülfat (Al_2SO_4) ekleyerek 46 günde üretilen toplam biyogaz miktarını karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlarda 46 günlük toplam biyogaz miktarlarını 124 mL (H_2SO_4), 111 mL ($FeCl_3$), 124 mL (Fe_2SO_4) ve 170 mL (Al_2SO_4) bulmuşlardır.

Satyanarayan ve ark., (2008) sığır gübresinden biyogaz üretiminde hardal yağı küspesinin % 0, 10, 15, 20, 25 ve 30 oranlarında eklenmesiyle elde ettikleri biyogaz miktarları sırasıyla 222, 239, 261, 287, 310 ve 329 m³ / ton UK'dır

Zhu ve ark.; (2008) yapısal özelliklerin biyokütlenin enzimatik parçalanmasına etkisi üzerine yaptıkları çalışmada; lignoselülozik biyokütlenin (kavak ağacı tahtaları) enzimatik hidrolizinin uzunluğu ve hızının enzim yüklemesine, hidroliz sürelerine ve ön işlemlerden sonuçlanan yapısal özelliklere bağlı olduğunu bildirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada; lignin içeriği, asetil içeriği ve biyokütle kristalinitesinin etkileri 1, 6 ve 72 saat parçalanmada farklı enzim yüklemelerinde araştırmışlardır. Selüloz aktivitesini, NREL (1996) standart tayini metoduna göre 65 FPU/mL bulmuşlardır. Kavak tahtalarının enzimatik hidrolizini 50 mL'lik erlenmeyer şişelere doldurup 50 °C'de 1 dakikada 100 devir karıştırıcıda gerçekleştirmişlerdir. Hidrolizi 0,2 mL seyreltilmiş selülaz ve 0,05 mL β -glukosidaz ekleyerek başlatmışlardır. Uzun hidroliz süresinde, lignin miktarının az olduğu durumlarda kristalinitenin önemli derecede artmadığını gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak tüm yapısal özelliklerin biyokütlenin enzimatik parçalanmasına bir arada etkilediğini belirtmişlerdir.

3. MATERYAL VE METOD

3.1. Materyal

Ön deneyler ‘Çukurova Üniversitesi’ Çevre Mühendisliği Bölümü Laboratuvarlarında, diğer deneyler İsveç’in ‘Högskolan i Boras’ Üniversitesi Biyoteknoloji Bölümü laboratuvarlarında yapılmıştır.

Hammadde olarak katı atık parçalama ve biyogaz üretim tesisi çürütücüsünden alınan çürütülmüş çamur kullanılmıştır. Çürütülmüş organik katı atık çamuru, çamur içerisinde kalan organik maddeden maksimum faydalanmak amacıyla tekrar çürütülmüştür. Çürütme işleminden önce, lignoselülozik maddeleri parçalanmasını kolaylaştırarak metan gazı üretim verimliliğini artırmak amacıyla enzimatik ve asidik ön işlemleri uygulanmıştır. Böylece; organik katı atıktan daha kısa sürede, maksimum biyogaz üretimi sağlamak amaçlanmıştır.

3.1.1. Kullanılan Katı Atık Kaynağı ve Özelliği

Numuneler İsveç’in 150.000 nüfuslu Boras ilindeki Sobacken katı atık ayırma ve biyogaz üretim tesisinden alınmıştır. Tesis 1995 yılının Ocak ayında işletilmeye başlanmıştır. Şekil 3.1.’de katı atık ayırma ve biyogaz üretim tesisi görülmektedir. Tesiste yılda 300.000 ton atık gelmektedir. Bu atıkların 65.000 tonu biyolojik yollarla parçalanabilir atıklardan oluşmaktadır. Organik katı atık giriş uçucu katı oranı %5, çıkış ise % 1,2’dir. Üretilen metan gazı hacmi $800 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{ton UK}$ ’dır. Katı atığın enerji değeri ise $7600 \text{ kWh} / \text{ton UK}$ ’dır.



Şekil 3.1. Katı Atık Ayırma ve Biyogaz Üretim Tesisi (Sobacken)

Tesise gelen katı atıkların kaynağı evsel ve endüstriyel katı atıklardır. Endüstriyel katı atık kaynaklarını; besin üretim tesisleri, marketler, lokanta ve mezbahalardan gelen evsel nitelikli organik katı atıklar oluşturmaktadır. Evsel katı atıkları ise yerleşim yerlerinden gelen katı atıklar oluşturmaktadır. Yerleşim yerlerine yakın yerlerde katı atık geri dönüşüm kutuları bulunmaktadır. Geri dönüşüm kutularında cinslerine göre ayrılıp biriktirilen katı atıklar Boras ili Gatukontoret geri dönüşüm merkezine konteynırlarla taşınmaktadır. Boras ili Gatukontoret katı atık geri dönüşüm merkezi Şekil 3.2.'de görülmektedir.



Şekil 3.2. Katı Atık Geri Dönüşüm Merkezi (Gatukontoret)

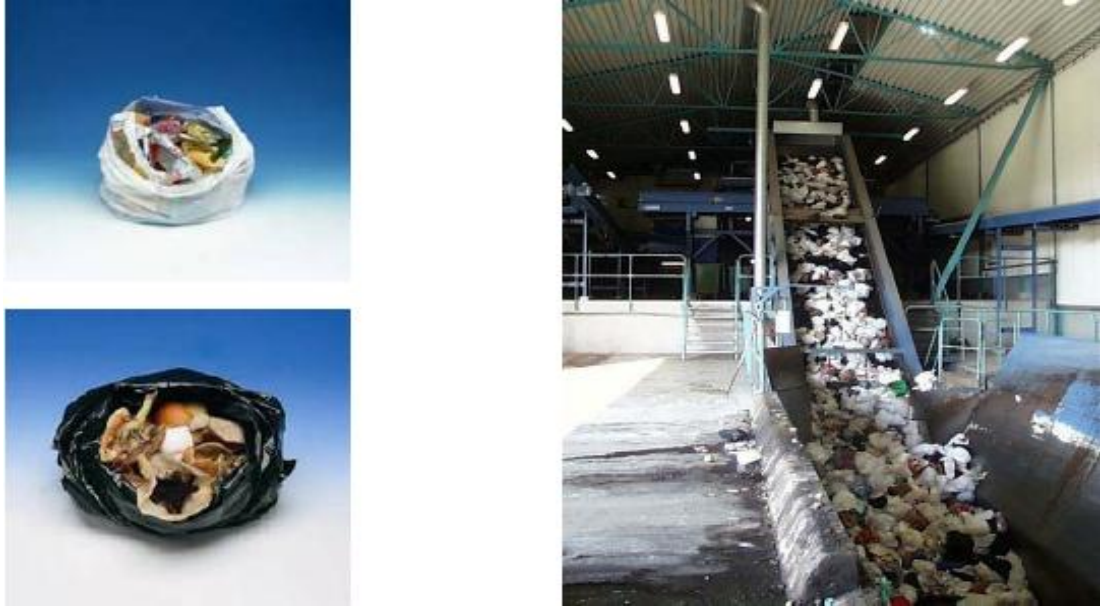
Yerleşim yerlerinde evlerde katı atıklar siyah ve beyaz olmak üzere iki farklı renkte poşete koyularak çöp kutularına atılmaktadır. Şekil 3.3.'de Boras'da her bina için ayrılmış çöp kutusu resmi görülmektedir. Çöp kutuları betondan yapılmış ağız kapalı odacıklar şeklindedir. Bu tür çöp kutularının yaygın kullanılmasının sebebi; böcek, sinek, fare gibi hastalık yapıcı haşeratlardan çöpleri korumak ve zor kış şartlarında kutuların zarar görmesini önlemektir. Boras'da katı atıkların ayrımında kaynakta ayrılma yöntemi uygulanmaktadır. Çöp kutularına atılacak poşetler evlerde organik atıkların atıldığı siyah poşetler ve diğer plastik, jelâtin, kâğıt vs. atıldığı beyaz poşetler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Çöp kutularına atılan poşetler katı atık ayırma tesisine konteynırlarla taşınmaktadır.



Şekil 3.3. Çöp Kutusu (Boras ili)

3.1.2. Katı Atık Ayırma ve Biyogaz Üretim Tesisi

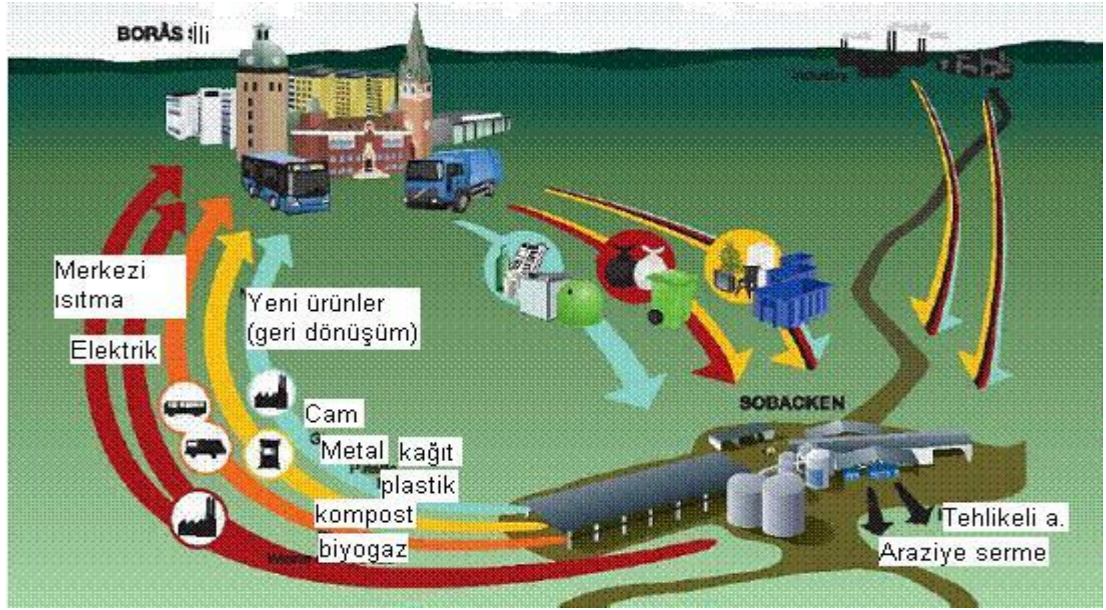
Katı atık ayırma ve biyogaz üretim tesisine konteynırlarla getirilen katı atıklar; organik katı atıkları inorganik katı atıklardan ayırmak amacıyla mekanik ayırma işlemine tabii tutulmaktadır. Optik renk ayırıcı özellikteki mekanik ayırıcıya içerisinde organik katı atıklar bulunan siyah poşetler ve inorganik atıklar bulunan beyaz poşetler boşaltılmaktadır. Katı atık ayırma tesisinde optik renk ayırıcıyla siyah poşetler beyaz poşetlerden ayrılmaktadır. Şekil 3.4.'de tesisin optik ayırıcı sistemi görülmektedir.



Şekil 3.4. Organik Katı Atıkların Ayrıldığı Optik Ayırıcı (Sobacken katı atık ayırma tesisi, PURAC)

Biyogaz tesisine getirilen biyoatıklar, kaynaktan ayrılan evsel katı atıklar ve organik endüstriyel katı atıkların katı ve sıvı formlarından oluşmaktadır. Katı atıklar biyoayırıcıda plastikler gibi kalıntılar ve diğer çözünemeyen partiküller ayrışmayan kısımlarını ayırmak amacıyla parçalanır ve suyla seyreltilir. Katı atık biyoayırıcıda çamur haline getirilir.

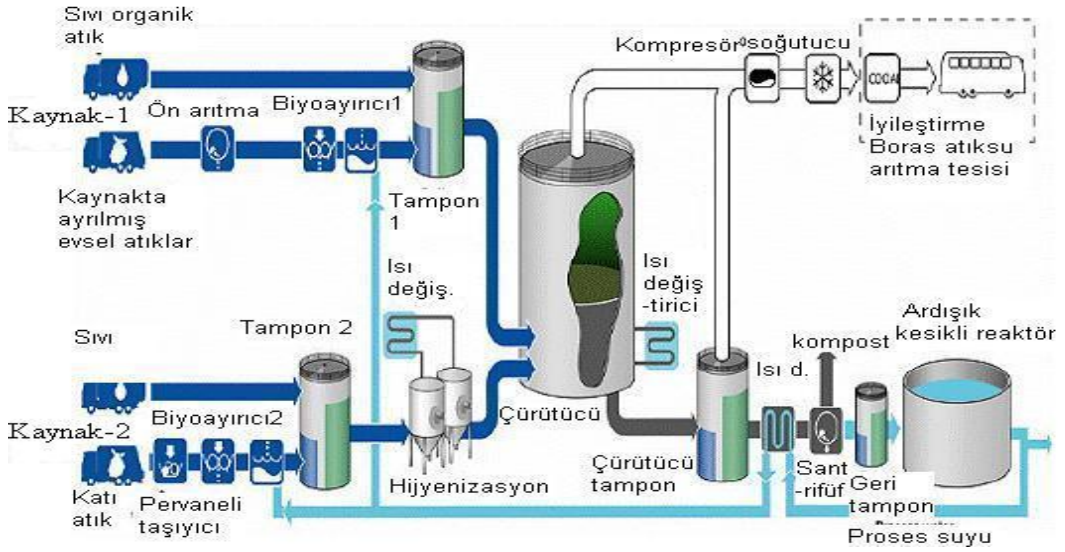
Çamur kıvamına getirilen organik katı atıklar biyogaz elde etmek amacıyla anaerobik çürütücüye verilir. Çürütücüden çıkan artık ürünler suyu alınarak toprak şartlandırıcı olarak kullanılmak üzere kompostlanır. Proses suyu azot giderimi için arıtıldıktan sonra proseste tekrar kullanılır. Fazla su ise belediye atık su arıtma tesisine gönderilir. Tesiste diğer organik olmayan katı atıklar geri dönüştürülmek üzere ayrılarak atıkların tekrar kullanımı sağlanır. Şekil 3.5.'de katı atık ayırma ve biyogaz üretim tesisi atık kaynakları ve çıkan ürünler gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Katı atık ayırma ve biyogaz üretim tesisi atık kaynakları ve oluşan ürünler (Sobacken, PURAC)

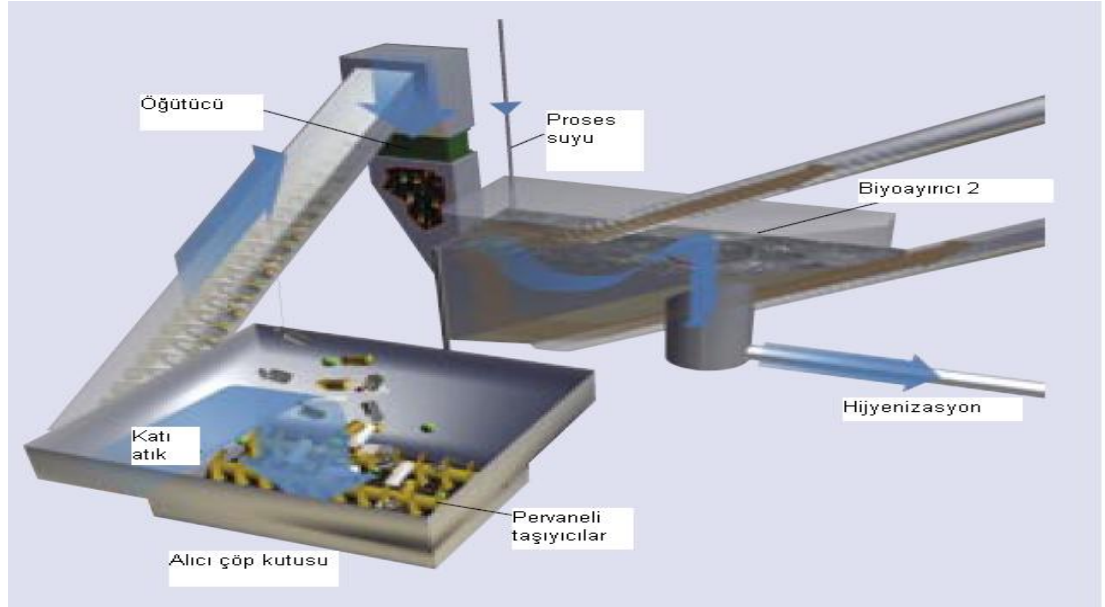
Tesiste Şekil 3.6.'da görüldüğü gibi endüstriyel ve evsel katı atıklar olmak üzere iki çeşit kaynak bulunması nedeniyle ön işlemler iki kısma ayrılmaktadır.

Birinci kısım akışkan organik atıklar, daha çok sebze kaynaklı atıklar ve kaynaktan ayrılmış evsel katı atıklardan oluşmaktadır. Katı atık biyoayırıcıya gelmeden önce de plastik poşetlerden parçalanarak ayrılır. Biyoreaktör içerisinde katı atık parçalanır ve çamur kıvamını alması için ısıtılmış suyla karıştırılır. Çamur havalandırılmış kum kapanı içerisinde ağır parçacıkların ayrılmasıyla plastik ve diğer çözünmez maddelerden ayrılır. Daha sonra ayrılan akıcı organik atık tampon 1'e verilir. Organik atık tampon 1'e termofilik çürütme için 55 °C'da en az 6 saat yeterli hijyenizasyonu elde etmek amacıyla pompalanır.



Şekil 3.6. Biyogaz Üretim Sistemi Akım Şeması (Sobacken, PURAC)

İkinci kısım ön işlem aşamasında ise daha çok hayvansal kaynaklı katı ve organik sıvı atıklar bulunur. Teneke kutular gibi katı atıklar ve sebzeler özel alıcı çöp kutusuna gönderilir. Bu alıcı çöp kutusu içerisinde yerden pervaneli teçhizat bulunur. Katı atıklar pervanelerle ezilerek birinci kısım ile anlatılan özellikteki biyoayırıcıya gönderilir. Biyoayırıcının saatte maksimum akış yükü 2x3,5 ton'dur. Biyoayırıcıda çamur haline gelen organik katı atık tampon 2'ye verilir. Tampon 2 de katı atıklar akışkan çamur formundadır. Çamur takım halinde tampon 2 içerisinde 1 saat 55⁰C'da yeterli hijyenizasyonu elde etmek amacıyla pompalanır. Hijyenizasyon tanklarının boyutu 2x8 m³'dür. Hijyenizasyon tankının günde maksimum akış yükü 96 m³'dür. Biyoayırıcıdan sonra çamur uygun sıcaklığa ulaşmak amacıyla ısı değiştiriciye gönderilir. Daha sonra çamur çürütücüye gönderilir. Şekil 3.7.'de katı atık arıtma tesisi biyoreaktörü görülmektedir.



Şekil 3.7. Katı Atık Ayırma Tesisi Biyoreaktörü (Sobacken)

Çürütücü içerisinde organik madde, çeşitli mikroorganizmalar yardımıyla metan gazı ve karbondioksit'e dönüştürülür. İki kademeli anaerobik çürütücü kapasitesi 32.000 m³'dür. Anaerobik çürütücünün günde maksimum akış yükü 250 m³'dür. Şekil 3.8.' de anaerobik çürütücünün iç kısmı görülmektedir. Anaerobik çürütücü termofiliktir ve reaktör sıcaklığı 55 °C'dır. Çürütücünün hacmi 3.100 m³'dür. Termofilik proses birinci kısımdan da hijyenize olmuş çamur elde etmek amacıyla yarı-sürekli bir prosestir. Çürütülmüş madde tampon tankında bekletilir. Bekletilen çamur santrifüjde suyu alınmadan önce ısı değiştiriciye gönderilir. Susuzlaştırılmış ürün kompostlanır ve toprak şartlandırıcı olarak kullanılır. Katı atık arıtma tesisinden yılda yaklaşık 2.500 ton toprak şartlandırıcı elde edilmektedir. Ham biyogaz sıkıştırılır ve iyileştirilmek üzere belediye atık su arıtma tesisine gönderilir. Teknik iyileştirilmeden sonra biyogazın metan gazı içeriği % 99,5'dur. Günde 100–200 m³'lük biyoatıktan 5.000–10.000 m³ biyogaz üretilmektedir.



Şekil 3.8. Katı atık ayırma tesisi anaerobik çürütücünün iç kısmı (Sobacken)

Anaerobik çürütücüden çıkan zengin nitrat içeren su ardışık kesikli reaktörde arıtılır. Ardışık kesikli reaktörün günde maksimum akış yükü 300 m³'dür. Su nitrifikasyon ve denitrifikasyona uygun oksik ve anoksik şartlarda reaktörde arıtılır. Nitrat giderildikten sonra reaktörden çıkan su proses içerisinde tekrar kullanılır. Fazla su Boras atık su arıtma tesisine gönderilir. Prosesten çıkan fazla çamur çürütücü tamponlara verilerek sistemde geri dönüştürülür. Birikmiş tuzlanmayla meydana gelebilecek korozyon etkisi azaltmak amacıyla su musluk suyuyla karıştırılır.

Tesiste anaerobik çürütme işlemi süresince oluşan çamur ve sistemden çıkan su Şekil 3.9.'da görülmektedir.



Şekil 3.9. Biyogaz üretimi süresince sistemde oluşan çamurlar ve sular (Sobacken)

3.2. Metod

Metan gazı üretim verimliliğini arttırmak amacıyla çürütücülerden alınan çürütülmüş katı atık çamurları iki farklı ön işleme tabii tutulmuştur. Bu işlemler esnasında asit ve enzim ile ön işlem yapılmıştır. Bu işlemler ile prosesin hızı artırılarak daha kısa sürede biyogaz üretimi elde etmek ve katı atığın parçalanmış organik kısmının artırılması planlanmıştır. Yapılan ön işlemler ile hidroliz aşamasının hızlandırılacağı düşünülmüştür.

Üretilen biyogaz miktarı ve hızı, atığın özelliklerine bağlıdır. Çamurun özelliklerini belirlemek için karbonhidrat, protein, toplam katı, uçucu katı, pH gibi parametreler önemlidir.

3.2.1. Alınan Numuneler

Deney süresince kullanılan numuneler; katı atık parçalama ve biyogaz üretim tesislerinin çürütücülerinden alınan çamurlardır. Çamurlar Sobacken, Falköping ve

Västerås katı atık parçalama ve biyogaz üretim tesislerinden alınmıştır. Sobacken tesisinden santrifüjden geçirilmeden önce alınan çürütülmüş çamur ve santrifüjden geçtikten sonra alınan çürütülmüş çamur olmak üzere iki tip numune alınmıştır. Falköping ve Västerås tesislerinden ise karşılaştırma amacıyla alınan çürütülmüş çamur numuneleri santrifüj uygulanmadan önce alınmıştır. Getirilen çamurlar ve aşı çamur soğutucu odasında yaklaşık 7 °C'de korunmuştur. Aşı çamuru 24 saat boyunca soğutucu odasında bekletilmiştir. Şekil 3.10.'da tesisten çürütülmüş çamur numunesi alınırken görülmektedir. Şekil 3.11.'de tesisten santrifüjden geçirilmeden önce alınan çürütülmüş çamur numunesi verilmiştir.



Şekil 3.10. Tesisten santrifüjden geçirilmeden önce alınan çürütülmüş çamur (Sobacken)



Şekil 3.11. Tesisten santrifüjden geçirildikten sonra alınan çürütülmüş çamur (Sobacken)

3.2.2. Karbonhidrat Tayini ve Selüloz Tayini

Anaerobik çürütücüden alınan çamurların karbohidrat tayini sıvı yüksek basınçlı kromatografi (HPCL) cihazıyla NREL/MRI metoduna göre belirlenmiştir (National Renewable Energy Laboratory, Midwest Research Institute, 1996).

Selüloz aktivitesinin tayini NREL/MRI metoduna göre belirlenmiştir (National Renewable Energy Laboratory, Midwest Research Institute, 1996).

3.2.3. Toplam Katı ve Uçucu Katı Tayini

Çamurların Toplam Katı ve Uçucu Katı tayinleri NREL/MRI metoduna göre yapılmıştır (National Renewable Energy Laboratory, Midwest Research Institute, 1994).

Toplam katı tayininde; numuneler ısıya dayanıklı porselen kaplar 105 ± 3 °C'de 24 saat fırın içerisinde bekletilmiştir. Daha sonra desikatörden alınan porselen kaplar tartılmıştır. Kapların içerisine çamur numunelerinden ilave edilerek tartılır. İçerisine çürütülmüş çamur doldurulan kaplar 105 ± 3 °C'de 24 saat fırın içerisinde bekletilmiştir ve bu süre sonunda bekletilen kurutulmuş çamurlar tartılmıştır. Toplam katı tayininde şu formül kullanılmıştır:

$$\% \text{ Toplam Katı} = \frac{(kap + \text{çamur}) - kap}{\text{çamur}(yaş)} \times 100 \quad (3.1)$$

Uçucu katı tayini metodunda ise farklı olarak numuneler ısıya dayanıklı porselen kaplar içerisinde 550 ± 25 °C'de 24 saat fırın içerisinde bekletilmiştir. Daha sonra 40–60 dakika desikatör içerisinde bekletildikten sonra ölçülmüştür. Şekil 3.12.'de Gallenkamp marka fırın (550 ± 25 °C) verilmiştir. Şekil 3.13.'de 550 ± 25 °C'de 24 saat fırın içerisinde bekletilip sonra desikatöre alınan numuneler görülmektedir. Uçucu katı tayini formülü:

$$\% \text{ Uçucu Katı} = \frac{(kap + \text{çamur}) - (\text{kurutulmuş çamur} + kap)}{(kap + \text{çamur}) - kap} \times 100 \quad (3.2)$$



Şekil 3.12. Gallenkamp Marka Fırın (550 ± 25 °C)



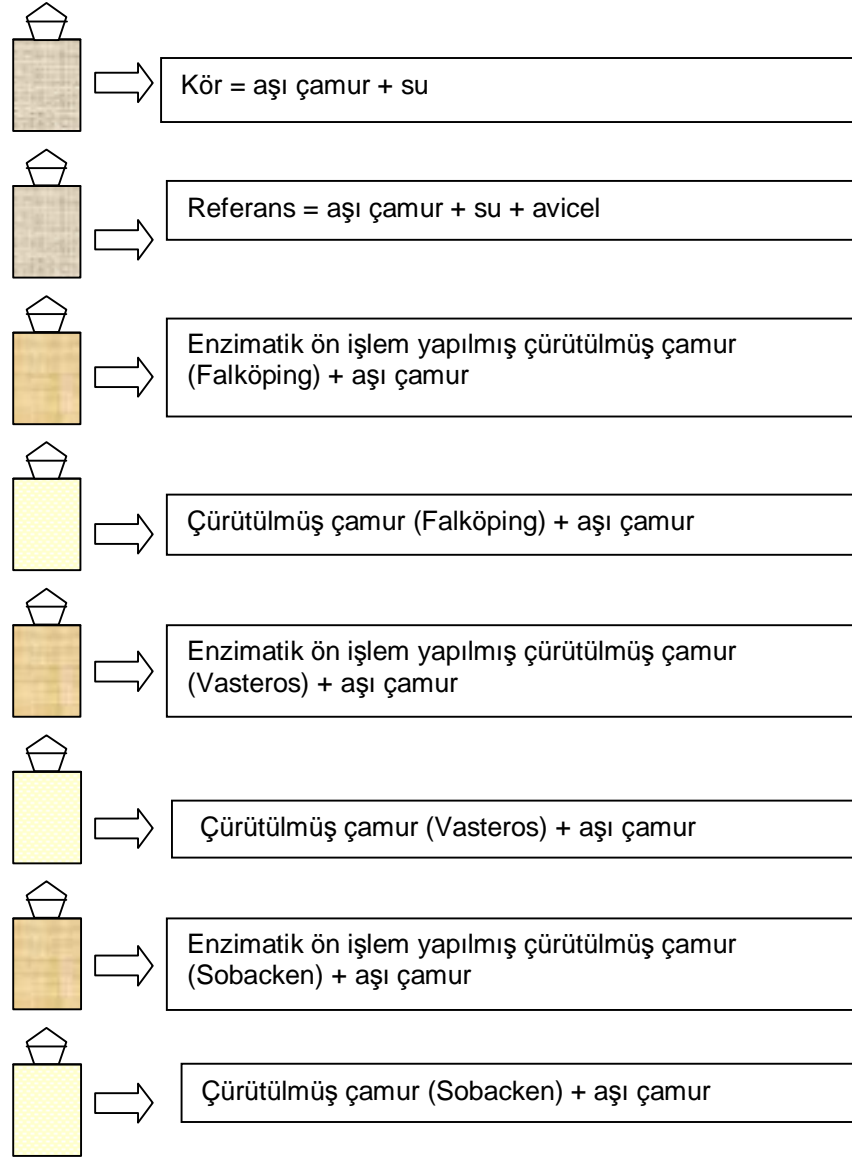
Şekil 3.13. Desikatör içerisinde fırında yakılmış çamurlar

3.2.4. Enzimatik Ön İşlem

Uygulanan yöntemler Hansen ve ark., 2004 çalışmalarından faydalanılarak yapılmıştır.

Yapılan çalışmada bir polisakkarit olan selülozun parçalanması amacıyla numunelere selülaz enzimiyle ön işlem uygulanmıştır. Bitkisel bir enzim olan selülaz enzimiyle yapılan ön işlem sonucunda selülozun disakkarit sellobiyozla çevrileceği düşünülmüştür. Bu nedenle hidroliz aşaması hızlandırılıp anaerobik parçalanma sisteminin veriminin artırılması planlanmıştır. Sisteme eklenecek olan selülaz enzimi miktarı 15 FPU/gr UK (uçucu katı) olarak bulunmuştur. Biyogaz üretim tesisleri anaerobik çürütücülerinden alınan çürütülmüş çamurlardan 100 mL ve 0,15 mL selülaz enzimi şişelere eklenmiştir. Hazırlanan cam şişelerdeki çamurlar 50 °C'de karıştırıcılı inkübatörde 24 saat bekletilmiştir. Şişeler hazırlanmadan önce inkübatörde bekletilen çamurların pH'ı 5 olarak ölçülmüştür. NaOH eklenerek pH yaklaşık 7 civarlarına getirilmiştir. Hazırlanan çamurlar için 118 mL'lik üç cam şişe seçilmiştir.

Aşı çamur, Sobacken anaerobik çürütme tesisinden getirilmiştir. Aşı çamur 55 °C'de 24 saat inkübatörde bekletilmiştir. Şişelere ön işlem uygulanmış çürütülmüş çamurlardan 20 mL eklenmiştir. Şişelerin herbirine inkübatörde bekletilen aşı çamurdan 30 mL eklenmiştir. Şişelere toplam 50 mL aşı çamur ve çürütülmüş çamur eklenmiştir. Ayrıca ön işlem uygulamadan her çürütülmüş çamurdan 20 mL'de olmak üzere 3'er şişe daha hazırlanmıştır. Yine hazırlanan şişeler de 30 mL aşı çamur eklenerek toplam 50 mL'ye tamamlanmıştır. Kör, 20 mL saf su ve 30 mL aşı çamur olmak üzere toplam 50 mL'ye tamamlanmıştır. Referans ise avicel (1,12 gr her 30 mL saf su için), 20 mL saf su ve 30 mL aşı çamur olmak üzere toplam 50 mL'ye tamamlanmıştır. Doğrulama amacıyla her bir şişeden 3'er tane hazırlanmıştır. Böylece enzimatik ön işlem projesinde toplam 24 şişe hazırlanmıştır. Şekil 3.14.'de enzimatik ön işlem projesinde hazırlanan şişeler ve içerikleri verilmiştir.



Şekil 3.14. Enzimatik ön işlem projesinde hazırlanan şişeler ve içerikleri

Hazırlanan tüm şişelerin ağızları orta kısmı mantar olan kapaklarla özel bir sıkıştırma aletiyle kapatılmıştır. Anaerobik şartların sağlanması için şişelerin havası iğneyle alınmıştır ve 1 dakika % 80 N₂ ve % 20 CO₂ karışımı şişelere verilmiştir. Daha sonra şişeler 55 °C'de inkübatöre koyulmuştur. Şişelerde bir hafta sonra 250 µL'lik basınç kilitli iğne yardımıyla alınıp Perkin Elmer (Auto System) Gaz Kromatografi cihazıyla metan gazı ölçümü gözlenmiştir. Gaz Kromatografi cihazı, termal FID (Flame Ionization Detector), taşıyıcı gaz olarak N₂, H₂ ve standart

olarak da % 100 metan kullanılmıştır. Metan gazı üretimi şişelerin kapaklarının baş kısımlarına (mantar tıpalı kısım) bastırılarak metan gazı üretimi kontrol edilmiştir. Şişelerin mantarlı kısımlarında gaz üretimiyle oluşan basınçla sertlik hissedildiği zamanlarda 3–5 gün aralıklarla metan gazı ölçümü Gaz Kromatografi cihazında yapılmıştır. Enzimatik ön işlemden metan gazı üretimi 26 gün süresince gözlemlenmiştir.

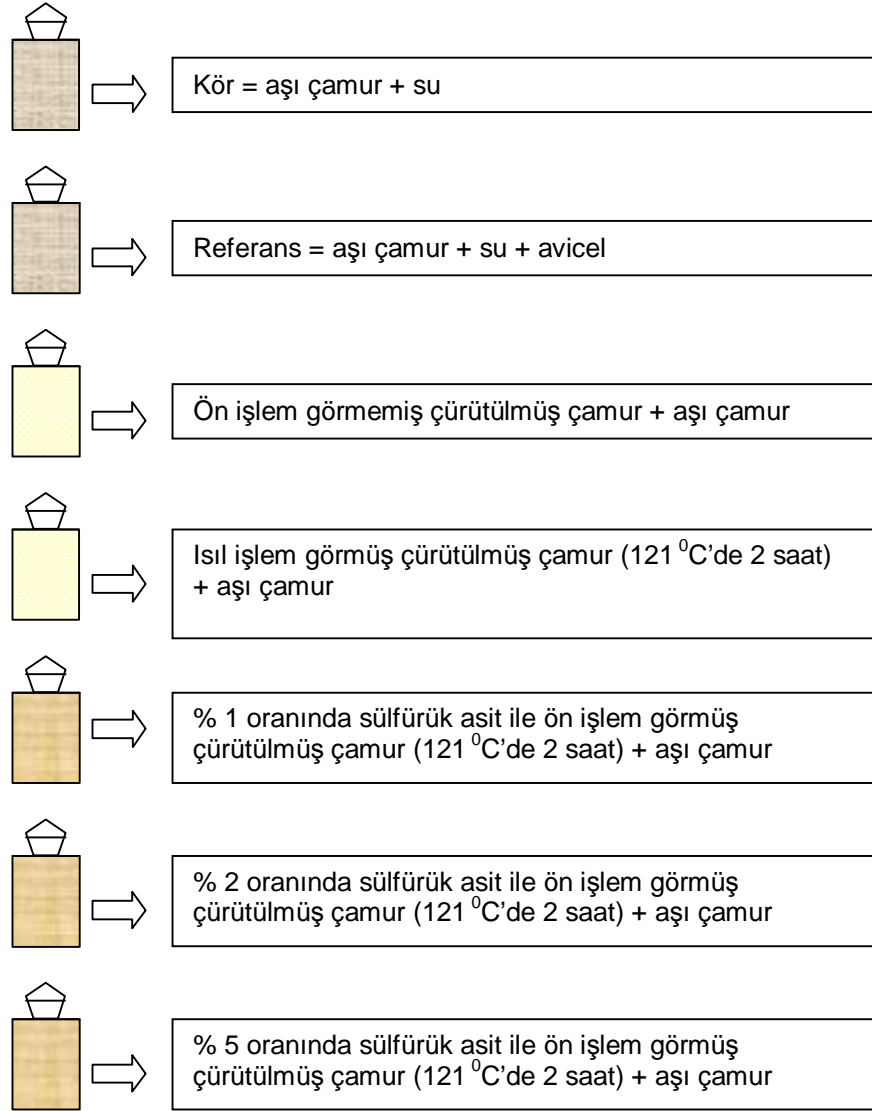
3.2.5. Asidik Ön İşlem

Uygulanan yöntemler enzimatik ön işlemden olduğu gibi Hansen ve ark., 2004 çalışmalarından faydalanılarak yapılmıştır.

Selüloz, hemiselüloz ve lignin gibi lignoselülozik yapıdaki biyolojik yollarla zor parçalanabilen maddeler tam olarak parçalanamamaktadır. Asidik ön işlem ile mikroorganizmaların kolay parçalayamadıkları selüloz, hemiselüloz ve lignin gibi lignoselülozik yapıdaki maddelerin parçalanması öngörülmüştür. Asidik ön işlem çalışmasında Sobacken tesisinden alınan susuzlaştırılmış çürütülmüş çamurlardan 100'er mL, beherler içerisine koyularak farklı oranlarda (% 0, % 1, % 2, % 5) sülfürik asit eklenerek ağzı alüminyum folyoyla kapatılmıştır. Belirli oranlarda sülfürik asit eklenen bu çamurlara otoklavda 121 °C'de 2 saat ısı işlem uygulanmıştır. Şekil 3.16.'da farklı oranlarda (% 0, % 1, % 2, % 5) sülfürik asit eklenip otoklavda bekletilen çamurlar verilmiştir. Sülfürik asit ile ön işlemde geçirilmiş çamurların Toplam Katı ve Uçucu Katı tayinleri NREL/MRI metoduna göre yapılmıştır (National Renewable Energy Laboratory, Midwest Research Institute, 1994).

Anaerobik çürütme tesisinden getirilen aşılı çamur 55 °C'de 24 saat inkübatörde bekletilmiştir. Sülfürik asit eklenerek ön işlem uygulanmış olan çürütülmüş çamur numunelerinden 10 mL cam şişelere alınmıştır. Çürütülmüş çamur eklenen şişelere inkübatörde bekletilen aşılı çamurdan 20 mL eklenmiştir. Böylece şişelere aşılı çamur ve çürütülmüş çamur olmak üzere toplam 30 mL numune eklenmiştir. Kör şişesi, 10 ml saf su ve 20 mL aşılı çamur olmak üzere toplam 30 mL'ye tamamlanmıştır. Referans ise 1,12 gr avicel (cellulose microcrystalline) ve 20 mL saf su ve 30 mL aşılı bakteri olmak üzere toplam 30 mL'ye tamamlanmıştır. Şekil

3.15.'de Asidik ön işlem projesinde hazırlanan 7 şişe gösterilmiştir. Doğrulama amacıyla her bir şişeden 3'er tane hazırlanmıştır. Böylece asidik ön işlem projesinde toplam 21 şişe hazırlanmıştır.



Şekil 3.15. Asidik ön işlem projesinde hazırlanan şişeler ve içerikleri

Anaerobik şartların sağlanması için şişelerin havası iğneyle alınmıştır ve 1 dakika % 80 N₂ ve % 20 CO₂ karışımı şişelere verilmiştir. Daha sonra şişeler 55 °C'de inkübatöre anaerobik şartların sağlanması için koyulmuştur. Şekil 3.17.'de asidik ön işlem projesinde hazırlanan şişeler 55 °C'de inkübatörde görülmektedir.

Şişelerden bir hafta sonra 250 µL'lik haciminde basınç kilitli şırınga yardımıyla alınıp Perkin Elmer (Auto System) Gaz Kromatografi cihazında metan gazı ölçümü gözlenmiştir. Gaz Kromatografi cihazı, termal FID (Flame Ionization Detector), taşıyıcı gaz olarak N₂ ve H₂ ve standart olarak da % 100 metan kullanılmıştır. Şekil 18'de basınçlı şırınga ile şişeden alınan metan gazının gaz kromatografi cihazında ölçümü görülmektedir. Şişelerin kapaklarının baş kısımlarına (mantar tıpalı kısım) bastırılarak gaz üretimi kontrol edilmiştir. Şişelerin mantarlı kısımlarında gaz üretimiyle oluşan basınçla sertlik hissedildiği zamanlarda 3-5 gün aralıklarla metan gazı ölçümü Gaz Kromatografi cihazında yapılmıştır. Son alınan sonuçlarda 10 gün arayla metan gazı ölçümü yapılmıştır. Asidik ön işlemden metan gazı üretimi 29 gün süresince gözlemlenmiştir.



Şekil 3.16. Farklı oranlarda (% 0, % 1, % 2, % 5) sülfürik asit eklenmiş çamurlar otoklavda (121 °C'de 2 saat) bekletildikten sonra



Şekil 3.17. Asidik ön işlem projesinde hazırlanan şişeler 55 °C'de inkübatörde



Şekil 3.18. Basıncılı iğneyle şişeden alınan metan gazının gaz kromatografi cihazıyla ölçümü

3.2.6. Metan Gazı Ölçümlerinin Hesaplanması

Metan gazı üretim hacmi ideal gaz denkleminde faydalanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{İdeal Gaz Denklemi: } P \times V = n \times R \times T \quad (3.3)$$

$$V_m = R \times \frac{n \times T}{P} \quad (3.4)$$

$P \Rightarrow$ Açık hava basıncı (1 atmosferik basınç = 101325 Paskal (N/m²))

$V_m \Rightarrow$ İğne içerisindeki metan gazının hacmi 250 $\mu\text{L} = 250 \times 10^{-9} \text{ m}^3$

$$R \Rightarrow \text{Gaz Sabiti } 8,314 \text{ J} \frac{\text{J}}{\text{mol} \times \text{K}} \quad n \Rightarrow \text{Mol sayısı} \quad (3.5)$$

$T \Rightarrow$ Sıcaklık 21 $^{\circ}\text{C} = 273 + 21 = 294 \text{ }^{\circ}\text{K}$

$$n_{s \text{ tan dart}} = \frac{P \times V_m}{R \times T} \quad (3.6)$$

$$\text{Şişe içerisindeki metan gazı mol sayısı} \Rightarrow n_{\text{şişe}} = \frac{A}{A_{s \text{ tan dart}}} \times n_{s \text{ tan dart}} \times \frac{V_{\text{şişe}}}{V_{\text{iğne}}} \quad (3.7)$$

$A \Rightarrow$ Gaz Kromatografi cihazından ölçülen metan gazının alanı ($\mu\text{V} \cdot \text{s}$)

$A_{\text{standart}} \Rightarrow$ Gaz Kromatografi cihazından ölçülen % 100 metan gazının alanı

$$V_{\text{üretilen}} = \frac{(n_{a+1} - n_b) \times R \times T}{P} \quad (3.8)$$

$n_{\text{şişe}} \Rightarrow n_b \Rightarrow$ İğneyle yapılan metan gazı ölçümü (şişenin basıncı alındıktan sonra)

$n_{\text{şişe}} \Rightarrow n_{a+1} \Rightarrow$ Bir sonraki gün iğneyle yapılan metan gazı ölçümü (şişenin basıncı alınmadan önce)

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Enzimatik Ön İşlem Metan Gazı Ölçüm Sonuçları

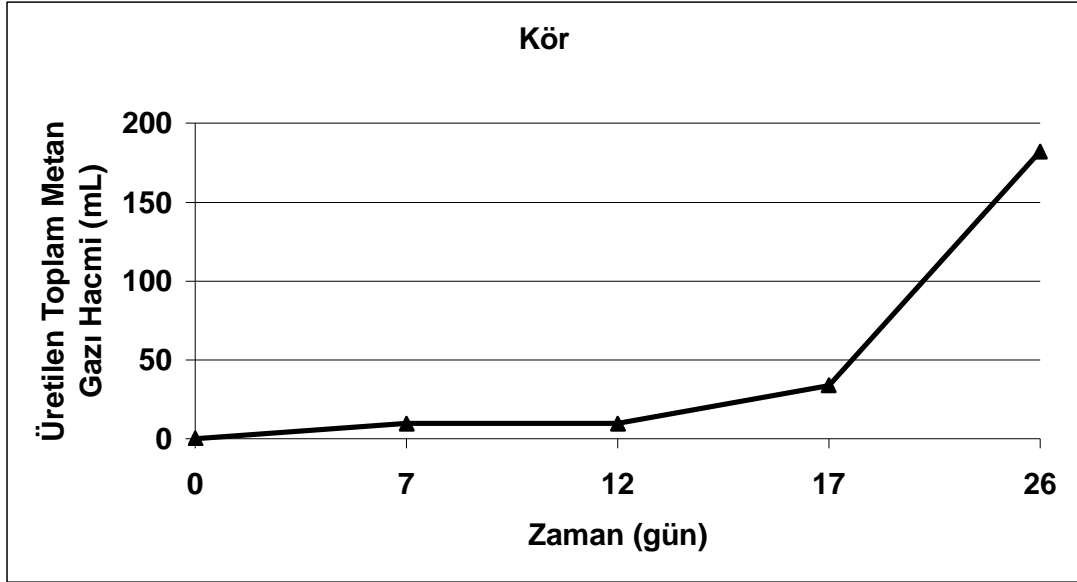
Yapılan çalışmaların ilkinde, çürütülmüş çamura selülaaz enzimi eklenerek ön işlem yapılmıştır. Enzimatik ön işlem yapılan çürütülmüş çamurların tekrar çürütülmesi sonucunda elde edilen metan gazı ölçülmüştür. Bununla birlikte kör ve referanstan elde edilen metan gazı sonuçları da ölçülmüştür. Ayrıca şişeler 55 °C’de inkübatörde bir hafta bekletildikten sonra metan gazı ölçümlerine başlanmıştır. 20 mL çürütülmüş çamurdan üretilen 26 günlük kümülatif metan gazı hacimleri mL cinsinden Şekil 4.1-8’de verilmiştir.

Çamurun özelliklerini belirlemek için öncelikle karbonhidrat tayini, selülaaz tayini, toplam katı (TK) ve uçucu katı (UK) tayinleri yapılmıştır. Çürütülmüş çamurların karbonhidrat miktarı yüksek basınçlı kromatografi (HPLC) cihazıyla NREL/MRI metoduna göre % 2,7 bulunmuştur. Anaerobik çürütücüden alınan çamurların selülaaz aktivitesinin tayini NREL/MRI metoduna göre yapılan ölçümler sonucu FPU (Fitler Paper Units) 100 bulunmuştur. Sisteme eklenecek olan enzim miktarı 15 FPU/gr UK olarak bulunmuştur. Çizelge 4.1.’de ön işlem uygulanan çürütülmüş çamurların TK ve UK oranları görülmektedir.

Çizelge 4. 1. Çürütülmüş çamurların ortalama Toplam Katı ve Uçucu Katı oranları

Çürütülmüş Çamurlar	% TK	% TK daki UK
Çürütülmüş çamur (Sobacken)	2	66
Çürütülmüş çamur (Falköping)	4,5	70
Çürütülmüş çamur (Västerås)	1,4	72,5

Aşı bakteri ve distile su ile hazırlanan körde üretilen metan gazı hacminin (mL) zamana (gün) bağlı kümülatif ölçümleri Şekil 4.1.'de verilmiştir. Çizelge 4.2.'de enzimatik ön işlemden önce üretilen toplam metan gazı hacimleri verilmiştir. 7'nci ve 12'nci günlere kadar metan gazı üretiminin (9,5 mL) düşük olmasının nedeni; anaerobik parçalanmada sistemin adapte olması için zamana ihtiyaç duyulmasıdır. Şekil 4.1.'de görüldüğü gibi; metan gazı miktarı, 17'nci güne kadar 33,5 mL, 26'nci güne kadar ise 182 mL'ye ulaşmıştır. Şekil 4.1.'de üretilen metan gazı miktarının zamanla arttığı görülmektedir.

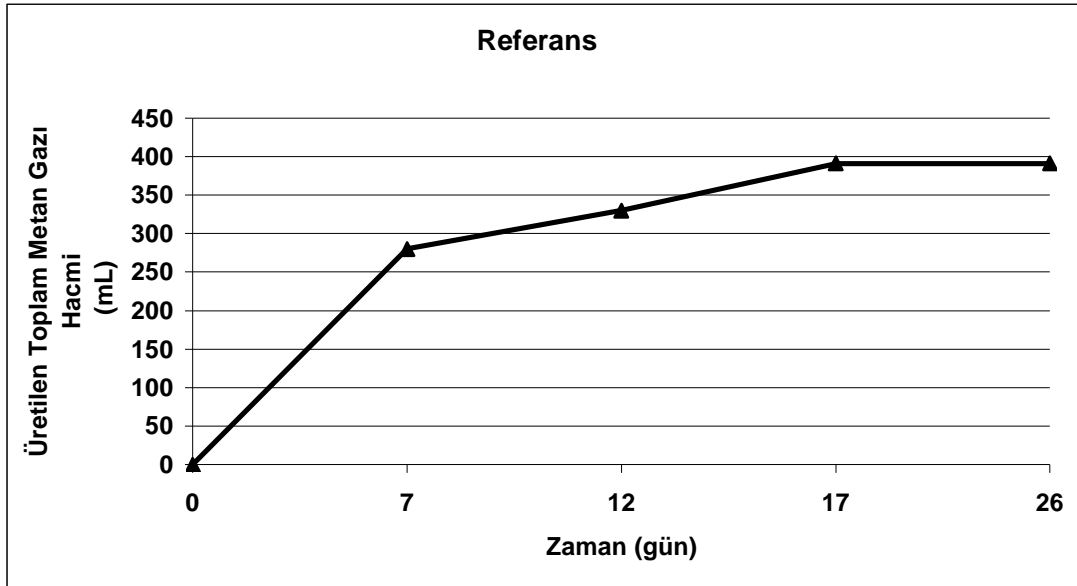


Şekil 4.1. Enzimatik ön işlemden önce üretilen metan gazı hacminin zamana bağlı kümülatif ölçümleri

Çizelge 4.2. Enzimatik ön işlemden önce üretilen toplam metan gazı hacimleri

	Zaman (gün)			
	7	12	17	26
Toplam Metan Gazı Hacmi (mL)	9,5	9,5	33,5	182

Aşı bakterisi, Avicel ve distile su ile hazırlanan referansta üretilen metan gazı hacminin (mL) zamana (gün) bağlı kümülatif ölçümleri Şekil 4.2.'de verilmiştir. Çizelge 4.3.'de enzimatik ön işleminde referanstan üretilen toplam metan gazı hacimleri verilmiştir. Şekil 4.2.'de zamanla metan gazı miktarı ilk 7 gün içerisinde artarak 280 mL'ye ulaşmıştır. Referansta üretilen metan gazı miktarı kör ile karşılaştırıldığında çok daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun nedeni; Referansa körden farklı olarak avicel (selüloz mikrokristalin) eklenmesi olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.2.'de görüldüğü gibi; metan gazı üretimi, 12'nci ve 17'nci günde sırasıyla 330 mL ve 391 mL'ye ulaşmıştır. Ayrıca 17'nci günden itibaren metan gazı miktarı durduğu görülmektedir.

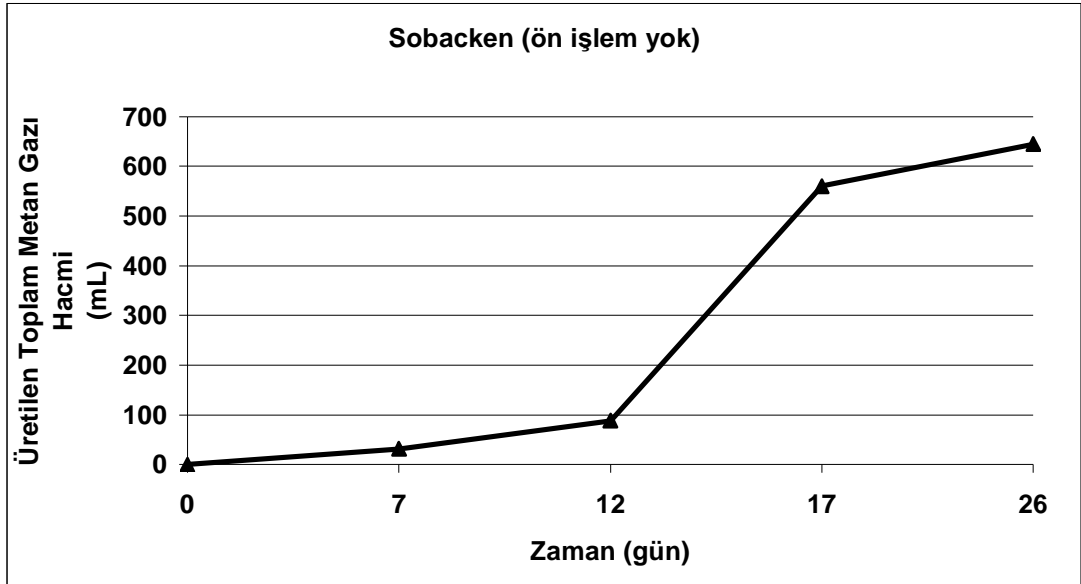


Şekil 4.2. Enzimatik ön işleminde referanstan üretilen toplam metan gazı hacminin zamana bağlı kümülatif ölçümleri

Çizelge 4.3. Enzimatik ön işleminde referanstan üretilen toplam metan gazı hacimleri

	Zaman			
	7	12	17	26
Toplam Metan Gazı Hacmi (mL)	280	330	391	391

Çürütülmüş çamurdan (Sobacken) ön işlem uygulanmadan hazırlanan sistemde üretilen metan gazı hacminin (mL) zamana (gün) bağlı kümülatif ölçümleri Şekil 4.3.'de verilmiştir. Ayrıca Çizelge 4.4.'de çürütülmüş çamurdan (Sobacken) üretilen toplam metan gazı hacimleri verilmiştir. Şekil 4.3.'de zamanla metan gazı miktarı ilk 7 gün içerisinde 31,5 mL olmuştur. Metan gazı üretimi 12'nci günde ise 88,5 mL'ye ulaşmıştır. Metan gazı üretimi 12'nci gün ile 17'nci gün arasında en fazla artış göstererek 560 mL'ye çıkmıştır. Şekil 4.3.'de 26'nci günde toplam metan gazı hacminin 645 mL olduğu görülmektedir.

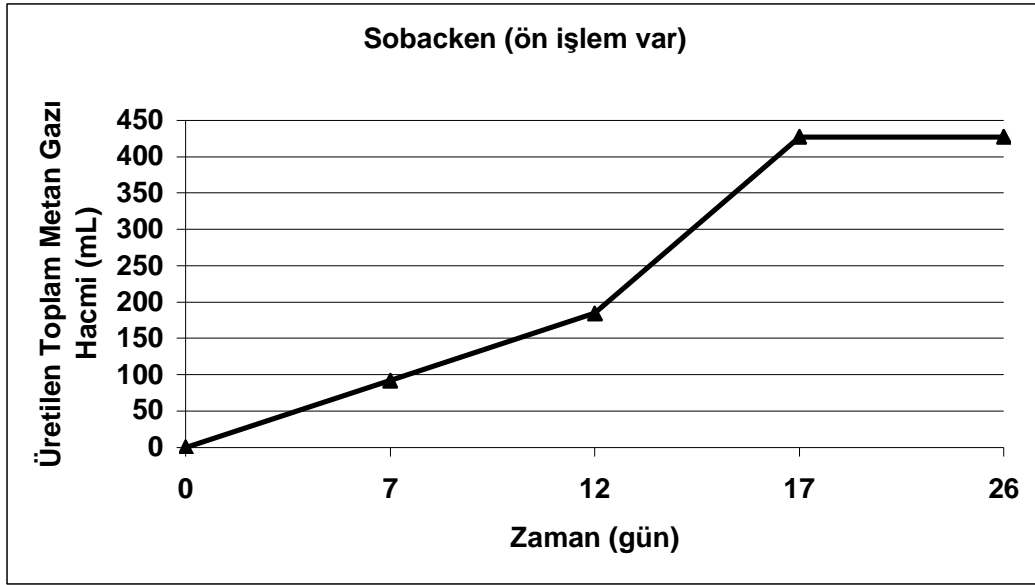


Şekil 4.3. Çürütülmüş çamurdan (Sobacken) üretilen metan gazı hacminin zamana bağlı kümülatif ölçümleri

Çizelge 4.4. Çürütülmüş çamurdan (Sobacken) üretilen toplam metan gazı hacimleri

	Zaman			
	7	12	17	26
Toplam Metan Gazı Hacmi (mL)	31,5	88,5	560	645

Çürütülmüş çamura (Sobacken) enzimatik ön işlem uygulanmış sistemde üretilen metan gazı hacminin (mL) zamana (gün) bağlı kümülatif ölçümleri Şekil 4.4.'de verilmiştir. Ayrıca Çizelge 4.5.'de çürütülmüş çamura (Sobacken) enzimatik ön işlem uygulanmış sistemde üretilen toplam metan gazı hacimleri verilmiştir. Şekil 4.4.'de zamanla metan gazı miktarı 7'nci, 12'nci ve 17'nci günde zamanla artarak sırasıyla 92 mL, 184 mL, 427 mL olduğu görülmektedir. Ön işlem uygulanan çürütülmüş çamurlardan (Sobacken) ilk 12 günde elde edilen metan gazı hacimleri ön işlem uygulanmayan ile karşılaştırıldığında 2 kat daha fazla olduğu Şekil 4.3. ve Şekil 4.4.'de görülmektedir. Böylece; çürütülmüş çamura (Sobacken) enzimatik ön işlem uygulanmasının metan gazı üretimini hızlandırdığı söylenebilir. Şekil 4.4.'de 17'nci gün ile 26'nci gün arasında metan gazı üretiminin durduğu görülmektedir.

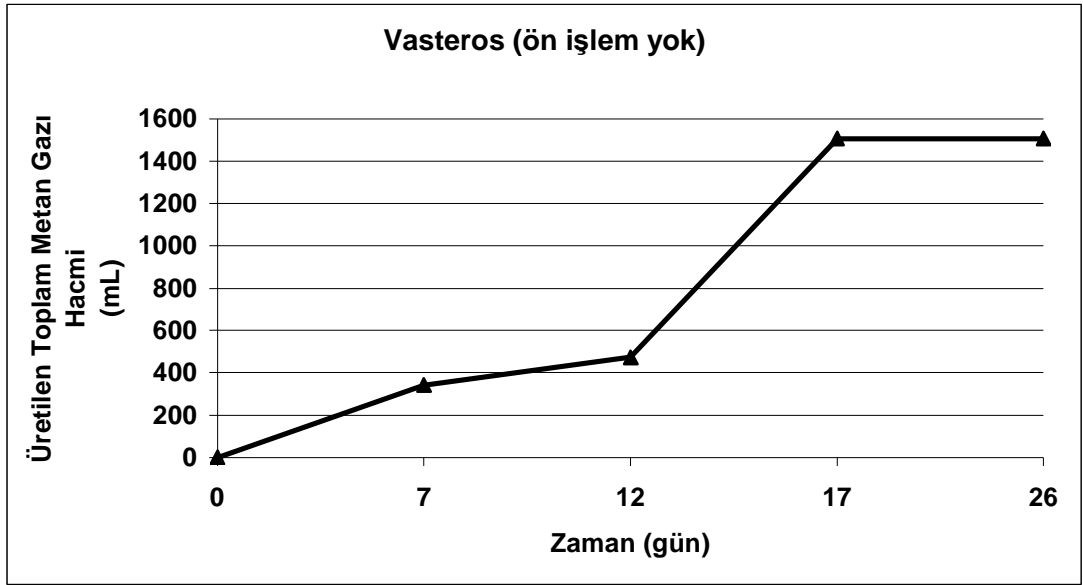


Şekil 4.4. Çürütülmüş çamura (Sobacken) enzimatik ön işlem uygulanmış sistemde üretilen metan gazı hacminin zamana bağlı ölçümleri

Çizelge 4.5. Çürütülmüş çamura (Sobacken) enzimatik ön işlem uygulanmış sistemde üretilen toplam metan gazı hacimleri

	Zaman			
	7	12	17	26
Toplam Metan Gazı Hacmi	92	184	427	427

Çürütülmüş çamura (Vasteros) ön işlem uygulanmadan hazırlanan sistemde üretilen metan gazı hacminin (mL) zamana (gün) bağlı kümülatif ölçümleri Şekil 4.5.'de verilmiştir. Ayrıca Çizelge 4.6.'da çürütülmüş çamurdan (Vasteros) üretilen toplam metan gazı hacimleri verilmiştir. Şekil 4.5.'de metan gazı miktarı 7'nci, 12'nci ve 17'nci günde zamanla artarak sırasıyla 341 mL, 472 mL, 1507 mL olduğu görülmektedir. 17'nci gün ile 26'ncı gün arasında metan gazı üretimi görülmemiştir.

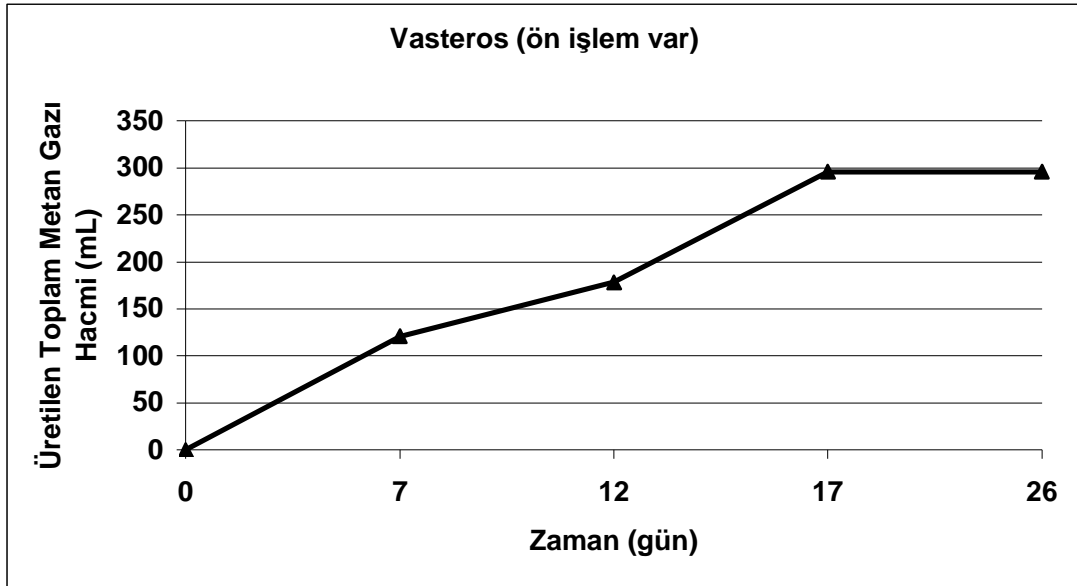


Şekil 4.5. Çürütülmüş çamurdan (Vasteros) üretilen metan gazı hacminin zamana bağlı kümülatif ölçümleri

Çizelge 4.6. Çürütülmüş çamurdan (Vasteros) üretilen toplam metan gazı hacimleri

	Zaman			
	7	12	17	26
Toplam Metan Gazı Hacmi	341	472	1507	1507

Çürütülmüş çamura (Vasteros) enzimatik ön işlem uygulanmış sistemde üretilen metan gazı hacminin (mL) zamana (gün) bağlı kümülatif ölçümleri Şekil 4.6.'da verilmiştir. Ayrıca Çizelge 4.7.'de çürütülmüş çamura (Vasteros) enzimatik ön işlem uygulanmış sistemde üretilen toplam metan gazı hacimleri verilmiştir. Şekil 4.6.'da metan gazı miktarı 7'nci, 12'nci ve 17'nci günde zamanla artarak sırasıyla 121 mL, 178,5 mL ve 296 mL olduğu görülmektedir. Şekil 4.6.'da 17'nci gün ile 26'ncı gün arasında metan gazı üretimi görülmemiştir. Elde edilen sonuçlardan enzimatik ön işlemin, ön işlem uygulanmayan Vasteros tesisinden alınan çürütülmüş çamurlar ön işlem uygulanan çürütülmüş çamurlar ile karşılaştırıldığında elde edilen metan gazı miktarını arttırmadığı görülmüştür.

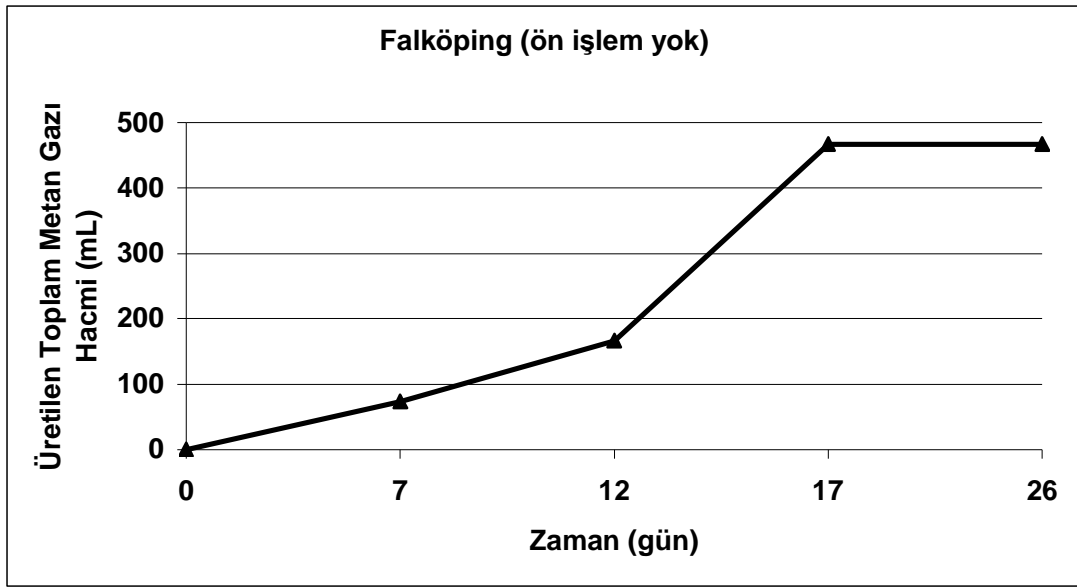


Şekil 4.6. Çürütülmüş çamura (Vasteros) enzimatik ön işlem uygulanmış sistemde üretilen metan gazı hacminin zamana bağlı kümülatif ölçümleri

Çizelge 4.7. Çürütülmüş çamura (Vasteros) enzimatik ön işlem uygulanmış sistemde üretilen toplam metan gazı hacimleri

	Zaman			
	7	12	17	26
Toplam Metan Gazı Hacmi	121	178,5	296	296

Çürütülmüş çamura (Falköping) enzimatik ön işlem uygulanmamış sistemde üretilen metan gazı hacminin (mL) zamana (gün) bağlı kümülatif ölçümleri Şekil 4.7.'de verilmiştir. Ayrıca Çizelge 4.8.'de çürütülmüş çamurdan (Falköping) ön işlemde geçirilmeden hazırlanan sistemde üretilen toplam metan gazı hacimleri verilmiştir. Şekil 4.7.'de metan gazı miktarı 7'nci, 12'nci ve 17'nci günde zamanla artarak sırasıyla 73 mL, 166,5 mL ve 467 mL olduğu görülmektedir. Şekil 4.7.'de 17'nci gün ile 26'ncı gün arasında metan gazı üretimi görülmemiştir.

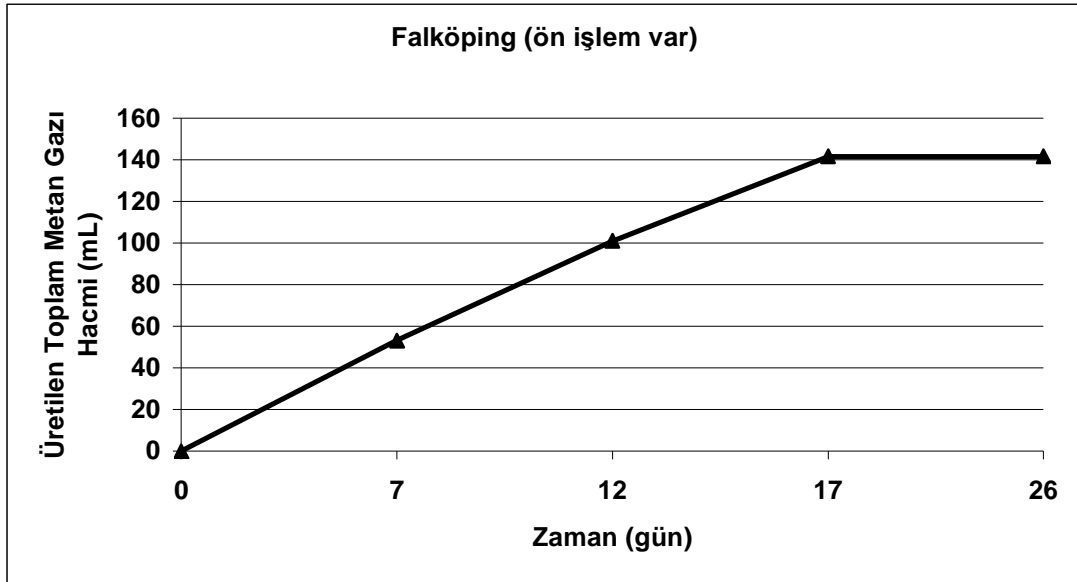


Şekil 4.7. Çürütülmüş çamurdan (Falköping) ön işlemde geçirilmeden hazırlanan sistemde üretilen metan gazı hacminin zamana bağlı kümülatif ölçümleri

Çizelge 4.8. Çürütülmüş çamurdan (Falköping) ön işlemde geçirilmeden hazırlanan sistemde üretilen toplam metan gazı hacimleri

	Zaman			
	7	12	17	26
Toplam Metan Gazı Hacmi	73	166,5	467	467

Çürütülmüş çamura (Falköping) enzimatik ön işlem uygulanmış sistemde üretilen metan gazı hacminin (mL) zamana (gün) bağlı kümülatif ölçümleri Şekil 4.8.'de verilmiştir. Ayrıca Çizelge 4.9.'da çürütülmüş çamurdan (Falköping) ön işlem uygulanmış sistemde üretilen toplam metan gazı hacimleri verilmiştir. Şekil 4.8.'de metan gazı miktarı 7'nci, 12'nci ve 17'nci günde zamanla artarak sırasıyla 53 mL, 101 mL ve 141,5 mL olduğu görülmektedir. Şekil 4.8.'de 17'nci gün ile 26'ncı gün arasında metan gazı üretimi görülmemiştir. Elde edilen sonuçlardan enzimatik ön işlemin, ön işlem uygulanmayan Falköping tesisinden alınan çürütülmüş çamurlar ön işlem uygulanan çürütülmüş çamurlar ile karşılaştırıldığında elde edilen metan gazı miktarını arttırmadığı görülmüştür.



Şekil 4.8. Çürütülmüş çamurdan (Falköping) ön işlem uygulanmış sistemde üretilen metan gazı hacminin zamana bağlı kümülatif ölçümleri

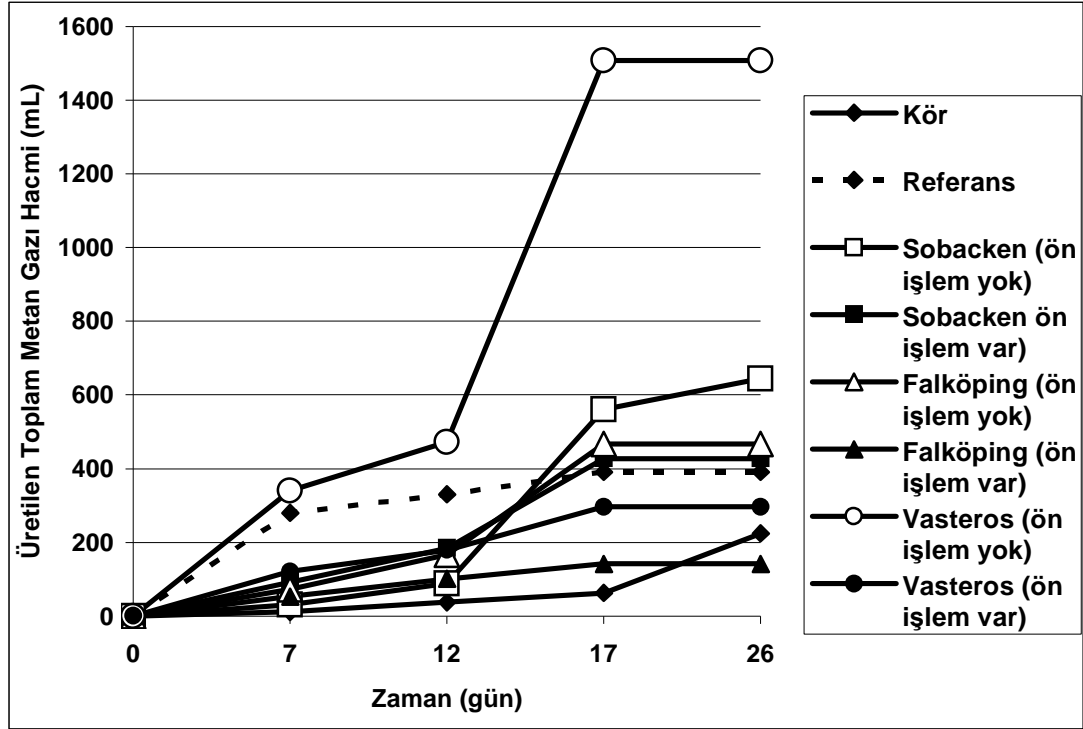
Çizelge 4.9. Çürütülmüş çamurdan (Falköping) ön işlem uygulanmış sistemde üretilen toplam metan gazı hacimleri

	Zaman			
	7	12	17	26
Toplam Metan Gazı Hacmi (mL)	53	101	141,5	141,5

4.2. Enzimatik Ön İşlem Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Enzimatik ön işlem uygulanarak yapılan deneysel çalışmalar sonucunda; Şekil 4.9.'da görüldüğü gibi enzimatik ön işlemde; ilk 17 günde çürütülmüş çamurdan (Sobacken) üretilen metan gazı hacminde artış görülmektedir. Ancak enzimatik ön işlem uygulanmış ve uygulanmamış çürütülmüş çamurlardan (Falköping, Sobacken, Vasteros), üretilen toplam metan gazı miktarları karşılaştırıldığında; enzimatik ön işlem uygulanmamış çamurlardan elde edilen toplam metan gazı miktarının daha fazla olduğu görülmektedir (Şekil 4.9.). Dolayısıyla enzimatik ön işlemin toplam metan gazı üretimine olumsuz etki yaptığı söylenebilir.

Şekil 4.9.'da metan gazı üretiminin 17. ve 26. gün arasında durduğu görülmektedir. İlk 7 günde Falköping ve Vasteros tesisleri çürütülmüş çamurlarından üretilen metan gazı hacimleri düşüktür. Bu nedenle Falköping ve Vasteros tesisleri çamurları için metan gazı üretiminin 17 gün uygulanması önerilmektedir. İlk 12 günde Sobacken tesisi enzimatik ön işlem uygulanmış çürütülmüş çamurdan üretilen metan gazı hacmi yüksektir. Buna göre; Sobacken tesisi enzimatik ön işlem uygulanmış çürütülmüş çamurdan metan gazı üretiminin 12 gün uygulanması depo hacmi masrafını düşüreceği düşünülerek önerilmektedir. Bununla birlikte; 17 günde, TK (% 1,4) oranı en az olan Vasteros tesisi çürütülmüş çamurundan üretilen metan gazı hacminin (1507 mL) en fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 4.9. Enzimatik ön işlem uygulanmış çürütülmüş çamurlardan üretilen metan gazı hacimlerinin (mL) zamana (gün) bağlı kümülatif ölçümleri

Çürütülmüş aktif çamur ile yapılan çalışmalarda, enzim ekleyerek yapılan ön işlemin metan gazı üretimini artırdığı bildirilmiştir (Mendes ve ark. 2006; Davidsson ve ark., 2006; Davidsson ve ark., 2007). Yapılan bu çalışmada; enzim ile ön işlem uygulanmamış çamurla karşılaştırıldığında enzimatik ön işlemin, üretilen toplam metan gazı miktarını artırmadığı gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmada; çürütülmüş çamura 50 °C'de 24 saat selüloz enzimi ile ön işlem uygulanmıştır. Çalışma literatür ile karşılaştırıldığında; çürütülmüş aktif çamura, 37 °C'de 4-24 saat lipaz enzimi (Mendes ve ark., 2006); 45 °C'de 4 saat lipaz ve proteaz enzimi (Davidsson ve ark., 2007) ile ön işlem uygulanmıştır.

Enzimatik ön işleminde uygulanan sıcaklığın literatür ile karşılaştırıldığında çok fazla olduğu ve bu sıcaklığın enzimlerin yapısını bozmuş olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca literatür ile karşılaştırıldığında çamura eklenen enzimlerin farklı olduğu görülmektedir.

4.3. Asidik Ön İşlem Metan Gazı Ölçüm Sonuçları

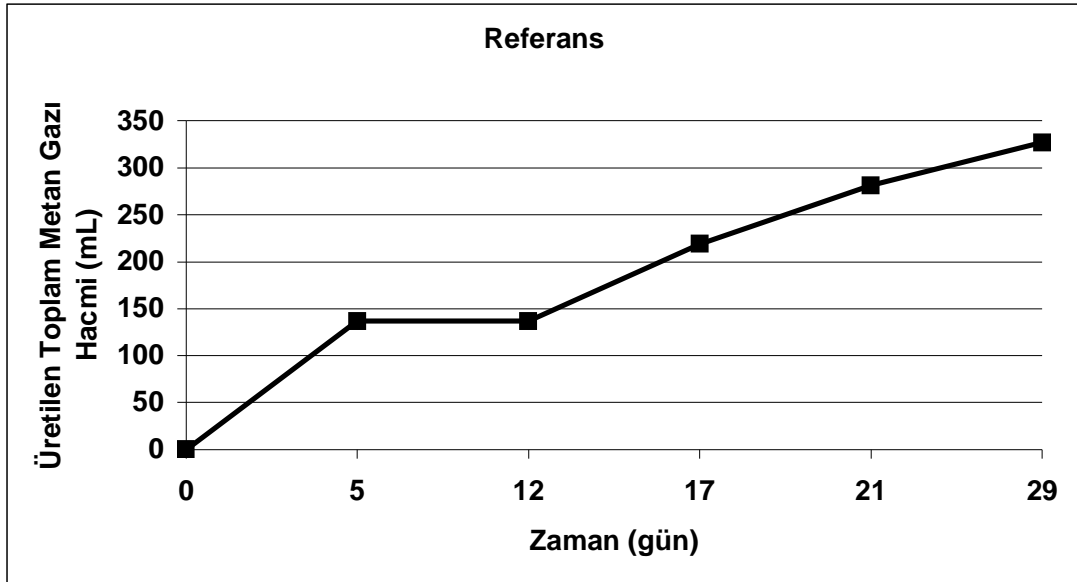
Yapılan ikinci çalışmada; Sobacken tesisi anaerobik çürütücüsünden alınan çürütülmüş çamurlara, % 1, % 2 ve % 5 oranlarında sülfürik asit eklenerek ısı ön işlem uygulanmıştır. Ayrıca çürütülmüş çamura, sadece ısı ön işlem de uygulanarak da ön işlem yapılmıştır. Yapılan ön işlemin ardından çamurun çürütülmesi sonucu elde edilen metan gazı hacimleri mL cinsinden 29 günlük sonuçları Şekil 4.10-17'de kümülatif olarak verilmiştir. Ayrıca kör ve referans da hazırlanmıştır. Şişeler 55 °C'de inkübatörde 5 gün bekletildikten sonra metan gazı ölçümlerine başlanmıştır.

Çizelge 4.10.'da sülfürik asit ile ön işlem uygulanan çamurların TK ve UK oranlarında düşüş görülmektedir. Çürütülmüş çamurların TK oranları, % 1, % 2, % 5 oranlarında asidik ön işlem uygulandıktan sonra % 21'den sırasıyla % 14, % 12,5 ve % 16'ya düştüğü görülmektedir. Asit eklenmeden otoklavda 121 °C'de 2 saat ısı ön işlem uygulanan çürütülmüş çamurun toplam katı oranı ise yaklaşık % 12'ye düşmüştür. TK içerisinde bulunan UK oranları ise; % 73'den % 67, % 48 ve % 36'ya düştüğü gözlemlenmiştir. Sadece ısı ön işlem uygulanmış çamurda ise TK içerisindeki UK oranı % 73'den % 76'ya çıktığı görülmektedir.

Çizelge 4. 10. Sülfürik asit ile ön işlem ve ısı ön işlem uygulanmış çürütülmüş çamurların (Sobacken) Toplam Katı ve Uçucu Katı oranları

Ön İşlem Uygulanmış Çamurlar	% TK	% TK daki UK
Susuzlaştırılmış çürütülmüş çamur (ön işlemsiz)	21	73
Sadece ısı ön işlem	12	76
% 1 asit + ısı ön işlem	14	67
% 2 asit + ısı ön işlem	12,5	48
% 5 asit + ısı ön işlem	15,7	36

Aşı bakterisi, Avicel ve distile su ile hazırlanan referansta üretilen metan gazı hacminin (mL) zamana (gün) bağlı kümülatif ölçümleri Şekil 4.10.'da verilmiştir. Ayrıca Çizelge 4.11.'de asidik ön işlemden referanstan üretilen toplam metan gazı hacimleri verilmiştir. Şekil 4.10.'da zamanla metan gazı miktarı ilk 5 gün içerisinde artarak 136,5 mL'ye ulaşmıştır. Metan gazı üretimi 5'inci ve 12'nci gün arasında durmuştur. 450 mL'ye ulaşmıştır. Şekil 4.10.'da zamanla metan gazı miktarı 17'nci, 21'nci ve 29'uncu günde zamanla artarak sırasıyla 219 mL, 281 mL, 327 mL olduğu görülmektedir.

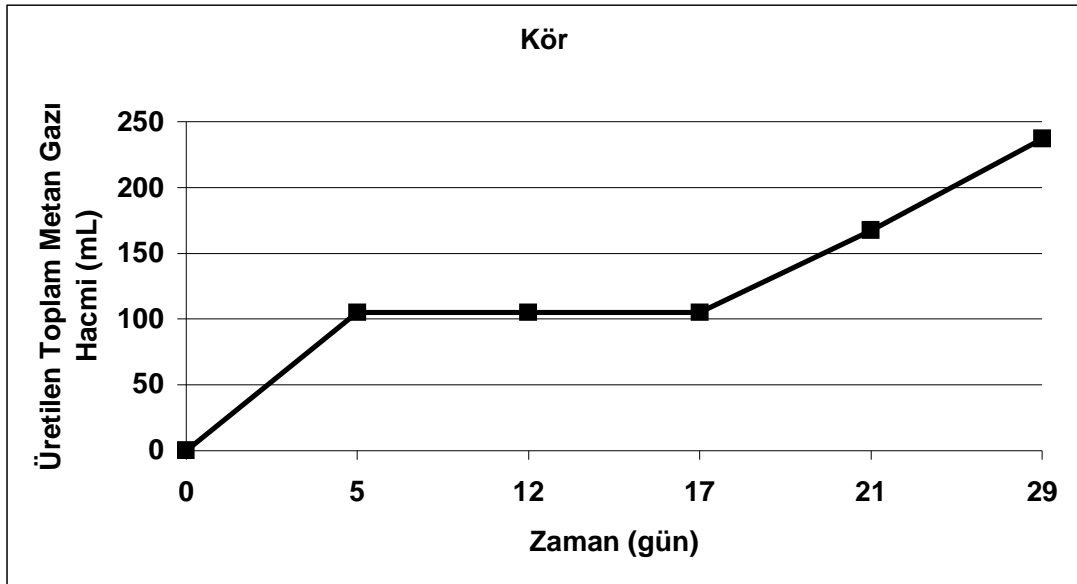


Şekil 4.10. Asidik ön işlemden referanstan üretilen toplam metan gazı hacminin zamana bağlı kümülatif ölçümleri

Çizelge 4.11. Asidik ön işlemden referanstan üretilen toplam metan gazı hacimleri

	Zaman				
	5	12	17	21	29
Toplam Metan Gazı Hacmi (mL)	136,5	136,5	219	281	327

Aşı bakteri ve distile su ile hazırlanan körde üretilen metan gazı hacminin (mL) zamana (gün) bağlı kümülatif ölçümleri Şekil 4.11.'de verilmiştir. Ayrıca Çizelge 4.12.'de asidik ön işlemden üretilen toplam metan gazı hacimleri verilmiştir. Şekil 4.11.'de zamanla metan gazı miktarı ilk 5 gün içerisinde artarak 105 mL'ye ulaşmıştır. Metan gazı üretimi 5'inci ve 17'nci gün arasında durmuştur. Şekil 4.11.'de 21'nci ve 29'uncu günde zamanla artarak sırasıyla 167 mL ve 237 mL olduğu görülmektedir. Körde üretilen metan gazı miktarı referans ile karşılaştırıldığında daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun nedeni; Referansa körden farklı olarak avicel (selüloz mikrokristalin) eklenmesi olduğu gözlemlenmiştir.

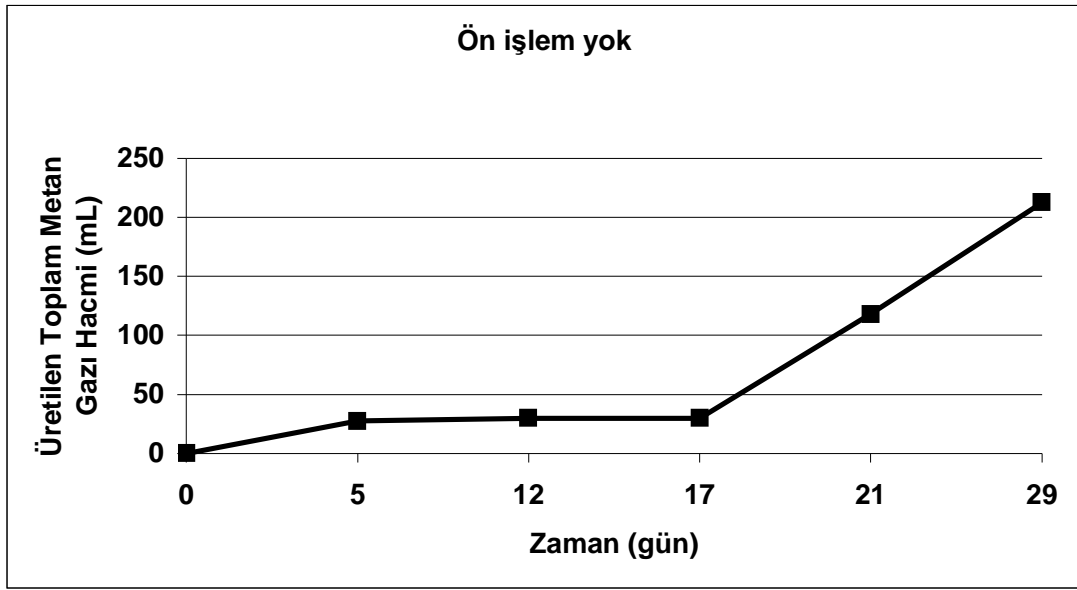


Şekil 4.11. Asidik ön işlemden körde üretilen toplam metan gazı hacminin zamana bağlı kümülatif ölçümleri

Çizelge 4.12. Asidik ön işlemden körde üretilen toplam metan gazı hacimleri

	Zaman				
	5	12	17	21	29
Toplam Metan Gazı Hacmi (mL)	105	105	105	167	237

Ön işlem yapılmamış çamurdan (Sobacken) üretilen metan gazı hacminin zamana bağlı kümülatif ölçümleri Şekil 4.12.'de verilmiştir. Ayrıca Çizelge 4.13.'de ön işlem yapılmamış çamurdan (Sobacken) üretilen toplam metan gazı hacimleri verilmiştir. Şekil 4.12.'de zamanla metan gazı miktarı artarak 5'nci ve 12'nci günde sırasıyla 27 mL ve 30 mL olduğu görülmektedir. Metan gazı üretimi 12'inci ve 17'nci gün arasında durmuştur. Şekil 4.12.'de 21'nci ve 29'uncu günlerde zamanla artarak sırasıyla 116 mL ve 212,5 mL olduğu gözlenmiştir.

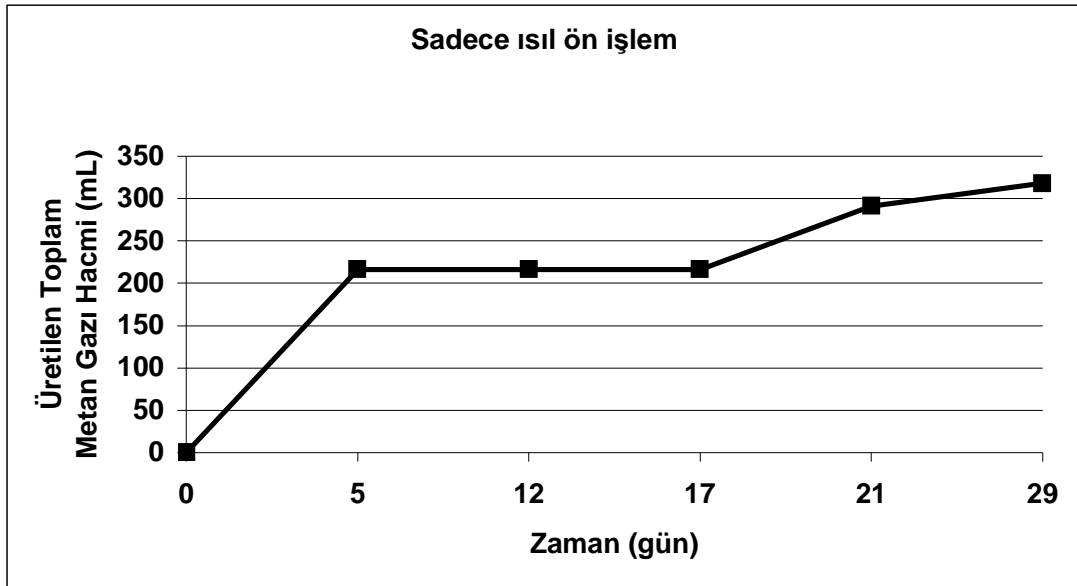


Şekil 4.12. Ön işlem yapılmamış çamurdan (Sobacken) üretilen toplam metan gazı hacminin zamana bağlı kümülatif ölçümleri

Çizelge 4.13. Ön işlem yapılmamış çamurdan (Sobacken) üretilen toplam metan gazı hacimleri

	Zaman				
	5	12	17	21	29
Toplam Metan Gazı Hacmi (mL)	27	30	30	118	212,5

Çürütülmüş çamura (Sobacken) sülfürik asit eklenmeden otoklavda 121 °C’de 2 saat bekletilerek ısı ön işlem uygulanmıştır. Isıl ön işlem uygulanmış çamurdan üretilen metan gazı hacminin (mL) zamana (gün) bağlı kümülatif ölçümleri Şekil 4.13.’de verilmiştir. Ayrıca Çizelge 4.14.’de ısı ön işlem uygulanan çürütülmüş çamurdan üretilen toplam metan gazı hacimleri verilmiştir. Şekil 4.13.’de metan gazı miktarı ilk 5 günde zamanla artarak 216 mL’ye ulaşmıştır. Şekil 4.13.’de 5’inci gün ile 17’nci gün arasında metan gazı üretimi durmuştur. Şekil 4.13.’de görüldüğü gibi 21’inci gün ile 29’uncu gün arasında metan gazı üretiminde sürekli artış görülmüştür.

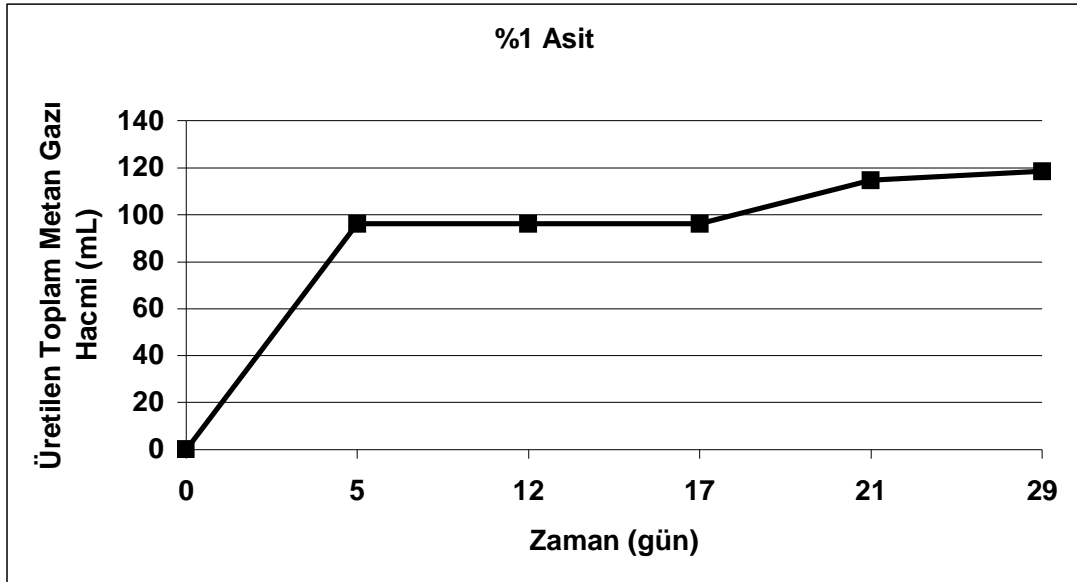


Şekil 4.13. Isıl ön işlem uygulanan çürütülmüş çamurdan üretilen metan gazı hacminin zamana bağlı kümülatif ölçümleri

Çizelge 4.14. Isıl ön işlem uygulanan çürütülmüş çamurdan üretilen toplam metan gazı hacimleri

	Zaman				
	5	12	17	21	29
Toplam Metan Gazı Hacmi (mL)	216	216	216	291	318

Anaerobik çürütücüden alınan çürütülmüş çamura % 1 oranında sülfürik asit eklenerek otoklavda 121 °C’de 2 saat bekletilmiştir. Ön işlem görmüş çamur çürütülerek üretilen metan gazı hacminin (mL) zamana (gün) bağlı kümülatif ölçümleri Şekil 4.14.’de verilmiştir. Şekil 4.14.’de zamanla metan gazı miktarı ilk 5 günde 96 mL’ye yaklaşmıştır. Şekil 4.14.’de 5’inci gün ile 17’nci gün arasında metan gazı üretiminin görülmemektedir. 17’nci gün ile 29’uncu gün arasında metan gazı üretimi sırasıyla 115 mL ve 118,5 mL olduğu Şekil 4.14.’de görülmektedir. gözlemlenmektedir.

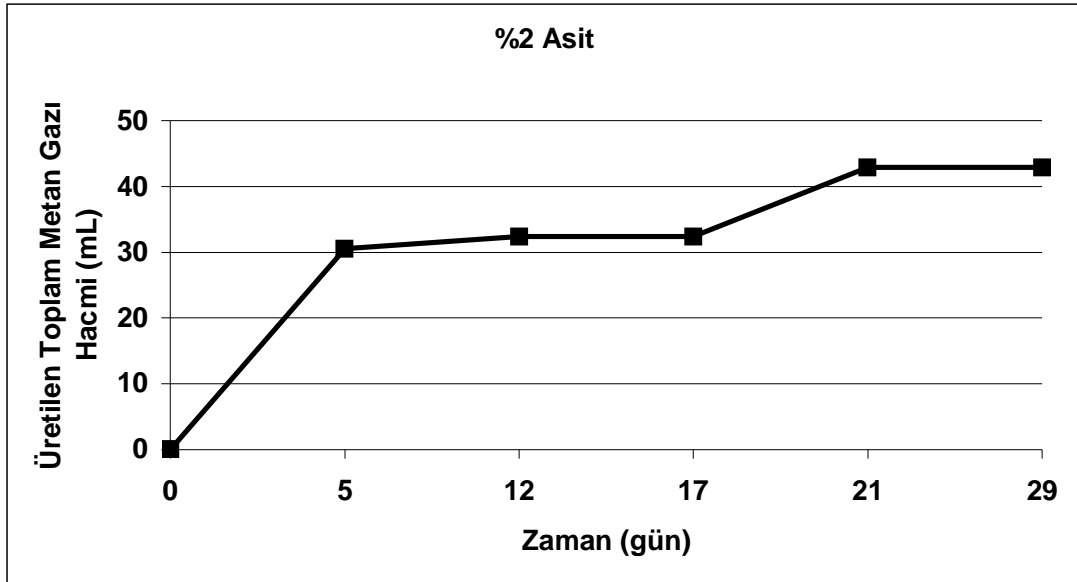


Şekil 4.14. Sülfürik asit (% 1 oranında) eklenen çürütülmüş çamurdan (Sobacken) üretilen metan gazı hacminin zamana bağlı kümülatif ölçümleri

Çizelge 4.15. Sülfürik asit (% 1 oranında) eklenen çürütülmüş çamurdan üretilen toplam metan gazı hacimleri

	Zaman				
	5	12	17	21	29
Toplam Metan Gazı Hacmi (mL)	96	96	96	115	118,5

% 2 oranında sülfürik asit eklenen çürütülmüş çamurdan (Sobacken) üretilen metan gazı hacminin zamana bağlı kümülatif ölçümleri Şekil 4.15.'de verilmiştir. Ayrıca Çizelge 4.16.'da sülfürik asit (% 2 oranında) eklenen çürütülmüş çamurdan üretilen toplam metan gazı hacimleri verilmiştir. Şekil 4.15.'de zamanla metan gazı miktarı 5'nci ve 12'nci günde artarak sırasıyla 30,5 mL ve 32 mL olmuştur. Şekil 4.15.'de 17'nci ve 21'nci gün arasında toplam metan gazı üretimi daha az artış göstererek 43 mL olduğu görülmektedir. 12 ile 17'nci ve 21 ile 29'uncu günler arasında metan gazı üretimi olmadığı Şekil 4.15.'de görülmektedir.

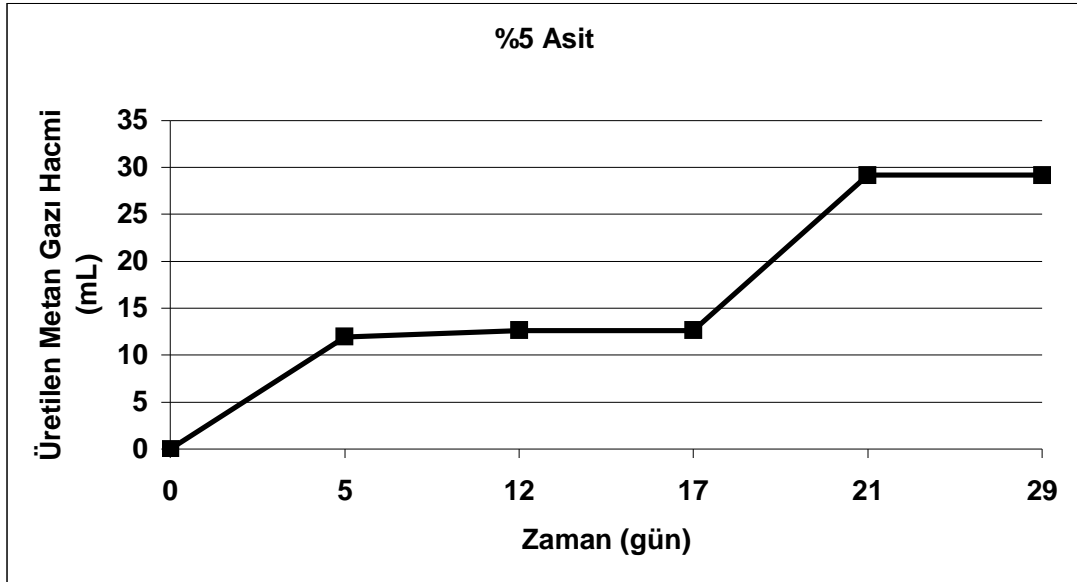


Şekil 4.15. Sülfürik asit (% 2 oranında) eklenen çürütülmüş çamurdan (Sobacken) üretilen metan gazı hacminin zamana bağlı kümülatif ölçümleri

Çizelge 4.16. Sülfürik asit (% 2 oranında) eklenen çürütülmüş çamurdan üretilen toplam metan gazı hacimleri

	Zaman				
	5	12	17	21	29
Toplam Metan Gazı Hacmi (mL)	30,5	32	32	43	43

% 5 oranında sülfürik asit eklenen çürütülmüş çamurdan (Sobacken) üretilen metan gazı hacminin zamana bağlı kümülatif ölçümleri Şekil 4.16.'da verilmiştir. Ayrıca Çizelge 4.17.'de sülfürik asit (% 5 oranında) eklenen çürütülmüş çamurdan üretilen toplam metan gazı hacimleri verilmiştir. Şekil 4.16.'da zamanla metan gazı miktarı ilk 5 günde 12 mL olduğu görülmektedir. Şekil 4.16.'da 12'nci gün ile 17'nci gün arasında metan gazı üretiminin durduğu, 17'nci, 21'nci ve 29'uncu günde metan gazı üretiminin artış göstererek sırasıyla 13 mL, 29 mL ve 29 mL olduğu görülmektedir.



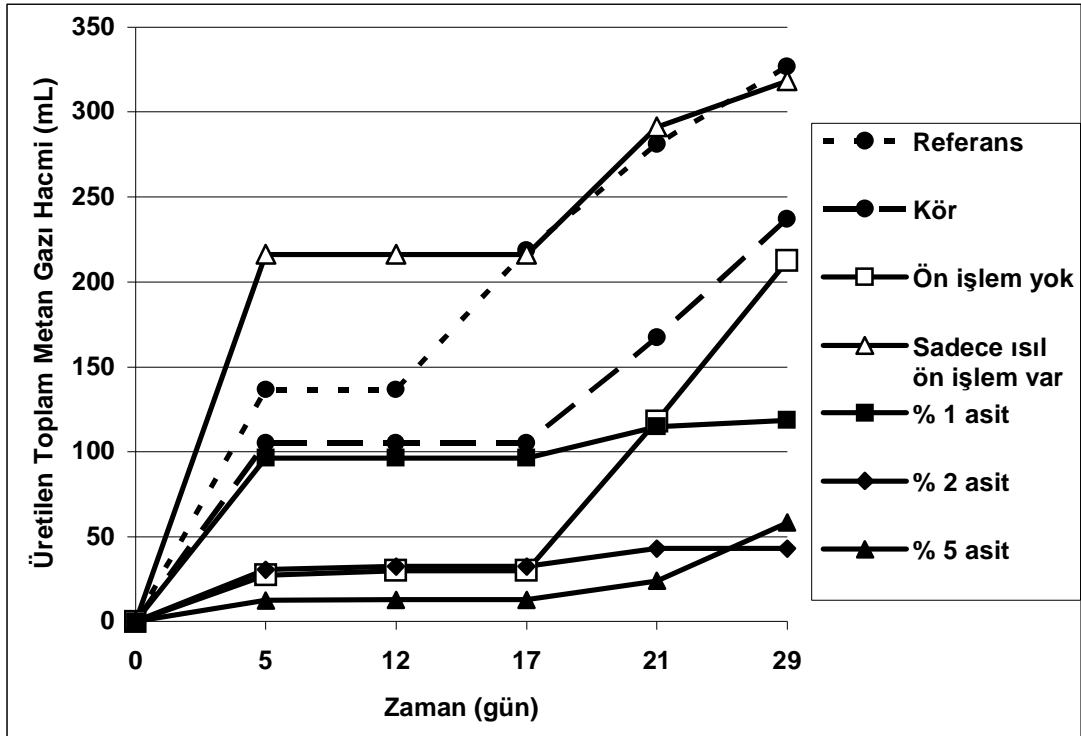
Şekil 4.16. Sülfürik asit (% 5 oranında) eklenen çürütülmüş çamurdan (Sobacken) üretilen metan gazı hacminin zamana bağlı kümülatif ölçümleri

Çizelge 4.17. Sülfürik asit (% 5 oranında) eklenen çürütülmüş çamurdan üretilen toplam metan gazı hacimleri

	Zaman				
	5	12	17	21	29
Toplam Metan Gazı Hacmi (mL)	12,4	13	13	29	29

4.4. Asidik Ön İşlem Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Asidik ön işlem uygulanarak yapılan deneysel çalışmalar sonucunda; Şekil 4.17.'de farklı oranlarda (% 1, % 2, % 5) asidik ve ısıl ön işlem (121°C 'de 2 saat) uygulanmış sistemlerde 10 mL çürütülmüş çamurdan üretilen toplam metan gazı hacimleri verilmiştir. Şekil 4.17.'de ilk 5 günde üretilen metan gazı hacminde artışın çok olduğu görülmektedir. Bu nedenle; çürütme işleminin 5 gün uygulanması depo hacmi ihtiyacı açısından daha ekonomik olacağı öngörülmektedir. Şekil 4.17.'de 5. ve 17. gün arasında metan gazı üretiminin durduğu görülmektedir. Şekil 4.17. incelendiğinde; 17. ve 29. gün arasında metan gazı hacminde tekrar artış olmuştur. En fazla metan gazı sadece ısıl ön işlem uygulanan şişeden 29 günde 318 mL elde edilmiştir. % 1 oranında asit eklenerek ısıl ön işlem uygulanan şişelerden elde edilen metan gazı miktarı ise 118,5 mL'dir. % 2 ve % 5 oranında asit ile ön işlem uygulanan şişelerden 29 günde üretilen metan gazı hacimlerinin (43 mL ve 29 mL) düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 4.17. Asidik ön işlem ve ısıl işlem uygulanmış çürütülmüş çamurdan üretilen metan gazı hacimlerinin (mL) zamana (gün) bağlı kümülatif ölçümleri

Çürütülmüş evsel aktif çamur ile yapılan çalışmalarda termokimyasal ve termal ön işlemin metan gazı üretimini artırdığı bildirilmiştir (Kim ve ark., 2003; Climent ve ark., 2007). Ayrıca yüksek sıcaklıklarda çürütülen evsel katı atıklardan elde edilen metan gazı miktarı düşük sıcaklıklara göre daha fazladır. Böylece sıcaklığın anaerobik çürütmede metan gazı üretimini artırdığı gözlemlenmiştir (Hartman ve Ahring, 2005; Angelidaki ve ark., 2006).

İşçi ve Demirer (2007), mikro ve makro elementler eklemenin pamuk atığından üretilen metan gazını artırdığını bildirmişlerdir.

Borowski ve ark. (2007), yaptıkları çalışmada; evsel atık su çamuruna çürütmeden önce farklı sürelerde aerobik arıtma uygulamanın biyogaz üretimini artırdığını bulmuşlardır.

Yapılan çalışmanın literatür ile uyumlu olduğu görülmektedir. Çürütülmüş çamurun ön işleme tabi tutulduktan sonraki ikincil çürütmede metan gazı üretiminin arttığı görülmektedir. Çizelge 4.18.'de organik katı atıkların çürütülmesi üzerine yapılan çalışmalar bu çalışma ile karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.18.'e bakıldığında araştırmacıların uyguladıkları yöntemler farklı olsa da metan gazı veriminin arttığı görülmektedir.

Çizelge 4.18. Organik katı atıkların çürütülmesi üzerine yapılan çalışmalar

	Deney Koşulları	Ön İşlemi	Biyogaz Verimleri (m³ /ton UK)
Lopez ve Espinosa, 2007	Farklı miktarda besleme: 40 mL, 60 mL, 80 mL, 100 mL 55 °C'de 11–19gün	Kireç Ca(OH) ₂ ilavesi + Isıl İşlem 25 °C'de 6 saat	40 mL kons: 0 → 41 60 mL kons: 0 → 53 80 mL kons: 53 → 101 100 mL kons: 55 → 150
Rao ve ark., 2000	Reaktör: 26±4 °C'da 240 gün	Ön işlemsiz	661
Hansen Ve ark, 2004	Reaktör: 55 °C'de 50 gün	Ön işlemsiz	495
Hartman ve Ahring 2005	Reaktör: 55 °C'de 25 gün	Hipertermofilik 68 °C 1–2 gün	185–216 (ön işlemsiz) 640–790 (ön işlemlili)
Forster-Carneiro ve ark., 2007	6 çeşit aşu çamur (% 25): tahıl yem, lokanta atığı, gübre, ç. çamur, domuz, sığır atığı 55 °C'de 60 gün	Ön işlemsiz	tahıl yem → 190 lokanta atığı → 340 gübre → 420 çürütülmüş çamur → 530 domuz atığı → 440 sığır atığı → 60
Krzystek ve ark., 2000	Aerobik Reaktör: 30 °C'de 3 gün Anaerobik Reaktör: 36 °C'de 25 gün	Anaerobik-aerobik Aerobik-anaerobik	Anaerobik-aerobik → 580 Aerobik-anaerobik → 175
Neves ve ark., 2006	Reaktör: 35 °C'de 120 gün	Alkali ön işlem: 0,3 gNaOH/g UK + Isıl İşlem 37 °C'de 1gece	Ön işlemsiz → 25 Arpa atığı → 222 E.O.K.A. (%60)+Arpa A. (%40) → 363
Bu Çalışma: Çürütülmüş evsel organik katı atık	Reaktör: 55 °C'de 17 gün	Enzimatik ön işlem: Selülaz enzimi + Isıl İşlem 50 °C'de 24 saat	Sobacken → 1867 Sobacken (ön işlemlili) → 1424 Falköping → 667 Falköping (ön işlemlili) → 202 Vasteros → 5022 Vasteros (ön işlemlili) → 1286
	Reaktör: 55 °C'de 5 gün ve 29 gün	Ön işlem: sülfürik asit + Isıl İşlem 121 °C'de 2 saat	Ön İşlemsiz (5 gün) → 20 (29 gün) → 142 Isıl işlem (5 gün) → 144 (29 gün) → 212 % 1 asit (5 gün) → 64 (29 gün) → 79 % 2 asit (5 gün) → 20 (29 gün) → 29 % 5 asit (5 gün) → 8 (29 gün) → 39

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada; çürütülmüş çamur, anaerobik parçalanma sonucunda parçalanamayan organik maddelerin parçalanması amacıyla tekrar çürütülmüştür. Çürütme işlemini kolaylaştırmak amacıyla çürütülmüş çamura ön işlem uygulanmıştır. Literatür incelendiğinde, etkili ön işlemin bulunmasıyla prosesin veriminin arttığı gözlemlenmiştir. Böylece uygun ön işlem ile daha fazla metan gazı üretimi sağlanması hedeflenmiştir.

Yapılan çalışmada; çürütülmüş çamura, selülaz enzimi ile enzimatik ön işlem, sülfürik asit ile ise asidik ön işlem ve ısı ön işlem uygulanmıştır.

Enzimatik ön işlem uygulanan çürütülmüş çamurlardan (Falköping, Sobacken, Vasteros), elde edilen 26 günlük metan gazı miktarları incelendiğinde enzimatik ön işlemin, metan gazı üretimine olumsuz etki yaptığı gözlemlenmiştir. Fakat ön işlem uygulanan çürütülmüş çamurdan (Sobacken) ilk 12 günde elde edilen metan gazı hacimleri ön işlem uygulanmayan ile karşılaştırıldığında 2 kat daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Sadece ısı ön işlemin uygulandığı deneylerden; çürütülmüş çamurun ön işleme tabi tutulduktan sonraki ikincil çürütmede metan gazı üretiminin arttığı görülmektedir. Ayrıca yapılan deneylerden; % 1 oranında asit ile ön işlem uygulanan çürütülmüş çamurdan, ilk 17 günde metan gazı üretiminin ön işlem uygulanmayan çürütülmüş çamurdan elde edilen metan gazı miktarı ile kıyaslandığında daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte; % 1 oranında asit ile ön işlem uygulanan ve sadece ısı ön işlem uygulanan çürütülmüş çamurdan ilk 5 günde elde edilen metan gazının verimi ön işlem uygulanmayan çürütülmüş çamurdan elde edilen metan gazının veriminden sırasıyla 3 ve 7 kat daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Sülfürik asit ile yapılan ön işleminde 29 günlük metan gazı üretiminde artış devam etmektedir. Sürenin kısıtlı olması nedeniyle çalışma durdurulmuştur. İleride yapılacak çalışmalarda sürecin metan gazı üretimi bitene kadar takip edilmesi önerilmektedir. Bununla birlikte asidik ön işlem projesinde, ilk 5 günde üretilen metan gazı hacminde artış görülmüştür. Metan gazı miktarının artması da tesisin depo hacmini azaltarak işletim masraflarını da düşürmektedir. Bu nedenle; asidik ön işlem

projesinde çürütme işleminin 5 gün uygulanması depo hacmi ihtiyacı açısından daha ekonomiktir.

Çürütülmüş çamurların katı madde muhtevasının asidik ön işlem uygulandıktan sonra azaldığı görülmüştür. Bu durumda çürütülmüş çamur asit ile parçalandığında çözünmüş maddeye dönüşmesi sebebi ile görülmüştür.

Katı atıklardan biyogaz üretimi, organik kökenli atıklardan hem enerji elde edilmesine hem de atıkların toprağa kazandırılmasına imkân vermektedir. Biyogaz üretiminden sonra atıklar yok olmamakta üstelik çok daha değerli toprak iyileştirici haline dönüşmektedir.

Elde edilen sonuçlardan; kullanılan evsel katı atık için, asidik ön işlemin kullanılan enzimatik ön işleme göre daha uygun bir yöntem olduğu gözlemlenmiştir.

Organik katı atıklar, toprağa verilmeden önce organik maddeden maksimum faydalanmak amacıyla tam olarak çürütülmelidir. Evsel katı atığın tam çürütülmesi için parçalanma işlemini kolaylaştırmada uygun olan farklı ön işlemlere başvurulabilir.

KAYNAKLAR

- ACAROĞLU, M., 2003. Alternatif Enerji Kaynakları, Nobel Basımevi, Ankara, 341s.
- ANGELIDAKI, I., CHEN X., CUIA J., KAPARAJU, P. ve ELLAGAARD, L., 2006. Thermophilic Anaerobic Digestion of Source-Sorted Organic Fraction of Household Municipal Solid Waste: Start-up Procedure for Continuously Stirred Tank Reactor. *Water Research*, 40: 2621–2628.
- ANONYMOUS, Kasım 2007. Katı Atıkta Süreç Çok Hızlı İşliyor. *Recycling Industry*, 2: 60–61
- ANONYMOUS, Ekim 2007. Atık su Altyapı ve Eysel Katı Atık Bertaraf Tesisleri Tarifelerinin Belirlenmesine İlişkin Yönetmelik. *Recycling Industry*, 1: 102–104
- ANONYMOUS, Eylül 2007. Konya’da Konet, Hayvan Kanından Elektrik Üretecek. *Recycling Teknoloji*, 1: 31
- ANONYMOUS, Eylül 2007. Antalya Elektrikliğini Çöpten Üretecek. *Recycling Teknoloji*, 1: 31
- ANONYMOUS, Kasım-Aralık 2007. Çöpün Sahibi ve Sorumlusu Belediyelerdir. *Recycling Teknoloji*, 2: 74–77
- ANONYMOUS, Eylül-Ekim 2005. Uşak’ta Katı Atıklar için Belediyeler Birlik Oluşturdu. *Su ve Çevre Teknolojileri*, 4: 8.
- ANONYMOUS, www.Kriegfisher.de. 14 Ağustos 2007.
- ANONYMOUS, www.kimyamuhendisi.com. 14 Ağustos 2007.
- ANONYMOUS, www.biyogaz.com. 14 Ağustos 2007.
- ANONYMOUS, www.wwf.org.tr. 14 Ağustos 2007.
- ANONYMOUS, http://www.lackebywater.se/inc/pdf/en_sobacken.pdf. 22 Ocak 2008.
- AZBAR, N., KESKİN, T., COKAY CATALKAYA, E., 2008. Improvement in Anaerobic Degradation of Olive Mill Effluent (OME) By Chemical Pretreatment Using Batch Systems. *Biochemical Engineering Journal*, 38: 379–383.

- BABEL, S., Fukushi, K. ve Sitanarassamee, B., 2004. Effect of Acid Speciation on Solid Waste Liquefaction in An Anaerobic Acid Digester. *Water Research*, 38: 2417–2423.
- BJÖRNSSON, L., 2000. Intensification of the Biogas Process by Improved Process Monitoring and Biomass Retention. Doctoral Dissertation, Department of Biotechnology, Lund University, İsveç.
- BOROWSKI, S. ve SZOPA, J. S., Experiences with the Dual Digestion of Municipal Sewage Sludge. *Bioresource Technology*, 98: 1199–1207.
- BUEKENS, A., 2005. Energy Recovery from Residual Waste by Means of Anaerobic Digestion Technologies. Conference “The Future of Residual Waste Management in Europe” 2005, Brussel.
- CHYNOWETH, D.P., OWENS, J.M. ve LEGRAND, R., 2001. Renewable Methane from Anaerobic Digestion of Biomass, *Renewable Energy*, 22: 1–8.
- CIRNE, D.G., LEHTOMÄKI, A., BJÖRNSSON, L. ve BLACKALL, L.L., 2007. Hydrolysis and Microbial Community Analyses in Two-Stage Anaerobic Digestion of Energy Crops. *Journal of Applied Microbiology*, 103: 516–527.
- CLIMENT, M., FERRER, I., BAEZA, M., ARTOLA, A., VAZQUEZ, F. Ve FONT, X., 2007. Effects of Thermal and Mechanical Pretreatments of Secondary Sludge on Biogas Production under Thermophilic Conditions. *Chemical Engineering Journal*, 133: 335–342.
- CROWE, M., NOLAN, K., COLLİNS, C., CARTY, G., DONLON, B., 2002. Biodegradable Municipal Waste Management in Europe, Part 1: Strategies and Instruments. European Environment Agency, Copenhagen, 48s.
- CROWE, M., NOLAN, K., COLLİNS, C., CARTY, G., DONLON, B., 2002. Biodegradable Municipal Waste Management in Europe, Part 3: Technology and Market Issues. European Environment Agency, Copenhagen, 32s.
- ÇELİK, E., BAHÇECİ, İ., YILMAZ, V. ve KÜLCÜ, R., 2004. Katı Atıkların Biyolojik Yöntemlerle Bertarafında Türk Çevre Mevzuatının AB Mevzuatı ile Karşılaştırılması. *Katı Atık ve Çevre*, 54: 15–21.
- ÇEVRE BAKANLIĞI, 1998. Çevre Notları, 60s.

- ÇEVRE ve ORMAN BAKANLIĞI, 22 Temmuz 2006. Endüstri Tesislerinden Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği.
- _____, 05 Nisan 2005. Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği.
- DAVIDSSON, Å. ve JANSEN, J.L.C., 2006. Pre-treatment of Wastewater Sludge Before Anaerobic Digestion; Hygienisationi Ultrasonic Treatment and Enzyme Dosing. *Vatten*, 62: 335–340.
- DAVIDSSON, Å., JANSEN, J.L.C., APPELQVIST, B., GRUVBERGER C. ve HALLMER, M., 2007a. Anaerobic Digestion Potential of Urban Organic Waste: a Case Study in Malmö. *Waste Management & Research*, 25: 162–169.
- DAVIDSSON, Å., GRUVBERGER, C., CHRISTENSEN, T. H., HANSEN, L.T., JANSEN, J.I.C., 2007b. Methane Yield in Source-Sorted Organic Fraction of Municipal Solid Waste. *Waste Management*, 27: 406–414
- DAVIDSSON, Å., WAWRZYNCZYK, J., NORRLÖW, O. ve J. LA COUR, J., 2007c. Strategies for Enzyme Dosing to Enhance Anaerobic Digestion of Sewage Sludge. *Residuals Science Technology*, 4: 1–10.
- DEARMAN, B., BENTHAM, R.H., 2007. Anaerobic Digestion of Food Waste: Comparing Leachate Exchange Rates in Sequential Batch Systems Digesting Food Waste and Biosolids . *Waste Management*, 27: 1792–1799.
- DEMİREL, B., YENİGÜN, O., 2006. Changes in Microbial Ecology in an Anaerobic Reactor. *Bioresource Technology*, 97: 1201–1208.
- DEMİRER, G.N., DURAN, M., GÜVEN, E., UĞURLU, O., ERGÜDER, T.H., TEZEL, U., ŞEN, S., KORKUSUZ, E.A. ve VAROLAN, N., 2001. Organik Atıklardan Anaerobik Yöntemlerle Biyogaz Eldesi: Türkiye’de Uygulanabilirlik. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, 18–20, Ocak, İzmir, 99–105.
- DENİZ, Y., 1987. Türkiye’ de Biyogaz Potansiyeli ve Biyogazın Sağlayacağı Yararlar, T.C. Tarım Orman ve Köyişleri Bakanlığı, Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü, Ankara Toprak ve Su Kaynakları Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü Yayınları, 41s.

- DEWIL, R., APPELS, R., BAEYENS, J., DEGREVE, J., 2007. Peroxidation Enhances The Biogas Production in the Anaerobic Digestion of Biosolids. *Journal of Hazardous Materials*, 146: 577–581.
- DÖLGEN, D., KÜÇÜKGÜL, O. ve ALPARSLAN, M. N., 2003. Kentsel Uzaklaştırma Alternatiflerinin Ekonomik Analizi: İzmir Örneği. *Katı Atık ve Çevre*, 52: 3–10.
- EDGÜ, Y., ATABARUT, T., 2004. Erzurum Şehri Katı Atık Yönetimi ve Erzurum Katı Atık Belediyeler Hizmet Birliği. *Katı Atık ve Çevre*, 54: 23–28.
- ELANGO, D., PULIKESİ M., BASKARALINGAM, P., RAMAMURTHI, V. ve SIVANESAN, S., 2006. Production of Biogas from Municipal Solid Waste with Domestic Sewage. *Journal of Hazardous Materials*, 141: 301–304.
- ERDİN, E., ŞİRİN, G., ALTEN, A., *Biyokütle Enerjisi ve Avrupa Birliği*. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi.
- FANCHI, J.R., 2004. *Energy: Technology and Directions for the Future*. Elsevier's Science & Technology Rights Department in Oxford, 516s.
- FISCHER, T. ve KRIEG, A., *Agricultural Biogas Plants-Worldwide*. Krieg & Fischer Ingenieure GmbH (mühendislik şirketi), Almanya, www.Kriegfisher.de.
- FORSTER-CARNEIRO, T., PE'REZ GARCIA, M., ROMERO, L. I., SALES, D., 2007. Dry-Thermophilic Anaerobic Digestion of Organic Fraction of The Municipal Solid Waste: Focusing on the Inoculum Sources. *Bioresource Technology*, 98: 3195–3203.
- FORSTER-CARNEIRO, T., PE'REZ, M. ve ROMERO, L.I., 2007. Composting Potential of Different Inoculum Sources In The Modified SEBAC System Treatment of Municipal Solid Wastes. *Bioresource Technology*, 98: 3354–3366.
- GÖKÇAY, C., DURAN, M., DEMİRER, G., 2001. *Anaerobik Biyoteknoloji Teorik Altyapı ve Uygulamalar Eğitim Semineri Notları*, 7–10 Kasım, İçel.
- GÖNÜLLÜ, T., 1993. Çöp Depo Yerlerinde Can Emniyeti ve Halk Sağlığı İle İlgili Tedbirler. *Ekoloji Dergisi*, 9: 9–14.

- GÜLEN, J., ve ARSLAN, H., 2005. Biyogaz. Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 121–129.
- HANSEN, T.L., SCHMIDT, J.E., ANGELIDAKI, I., MARCA, E., JANSEN, J.L.C., MOSBÆK, H. ve CHRISTENSENA, T.H., 2004. Method for Determination of Methane Potentials of Solid Organic Waste. Waste Management, 24: 393–400.
- HARTMANN, H., AHRING, B., 2005. A Novel Process Configuration for Anaerobic Digestion of Source- Sorted Household Waste Using Hyper-Thermophilic Post-Treatment .Biotechnology and Bioengineering, 90: 830 – 837.
- HU, Z.-H., YU H.-Q. ,2006. Anaerobic Digestion of Cattail by Rumen Cultures. Waste Management, 26: 1222–1228.
- HWU C.S. VE LETTINGA, G., 1997. Acute Toxicity of Oleate to Acetate-Utilizing Methanogens in Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Sludges. Enzyme and Microbial Technology, 21: 297–301.
- IGONI A. H., AYOTAMUNO, M.J., EZE C.L., OGAJI, S.O.T., PROBERT, S.D., 2008. Designs of Anaerobic Digesters for Producing Biogas from Municipal Solid-Waste. Applied Energy, 85: 430–438.
- İLERİ, R., 2000. Çevre Biyoteknolojisi. Değişim yayınları, Adapazarı, 661s.
- İSCİ, A. ve DEMİRER, G.,N., 2007. Biogas Production Potential from Cotton Wastes. Renewable Energy, 32: 750–757.
- JIANGUA, J., JICHAO, S., SHIYAO, W., YING, Y., LIMINIG, W., August 2007. Prospects of Anaerobic Digestion Technology in China. Tsinghua Science and Technology, 12: 435– 440.
- JUANGA, J.P., 2005. Optimizing Dry Anaerobic Digestion of Organic Fraction of Municipal Solid Waste. Asian Institute of Technology, Thailand, 170s.
- KARPUZCU, M., 1996. Çevre Kirlenmesi ve Kontrolü. Kubbealtı Neşriyatı, İstanbul, 318s.
- KARRİ, S., REYES S.A. VE FIELD, J.A., 2006. Toxicity of Copper to Acetoclastic and Hydrogenotrophic Activities of Methanogens and Sulfate Reducers in Anaerobic Sludge. Chemosphere, 62: 121–127.

- KAVACIK, B. ve TOPALOĞLU, B., 2007. Peynir Altı Suyu Ve Gübre Karışımından Biyogaz Üretimi. 7. Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi, 24–27, Ekim, İzmir: 443–458.
- KIM, J., PARK, C., KIM, T-H., LEE, M., KIM, S., KIM, S-W. ve LEE, J., 2003. Effects of Various Pretreatments for Enhanced Anaerobic Digestion with Waste Activated Sludge. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 95: 271–275.
- KRZYSTEK, L., LEDAKOWICZ, S., KAHLE, H., J., KACZOREK, K., 2001. Degradation of Household Biowaste in Reactors. *Journal of Biotechnology*, 92: 103–112.
- LAGERKVIST, A., 2006. Academic Research on Solid Waste in Sweden 1994–2003. *Waste Management*, 26: 277–283.
- LANTZ, M., SVENSSON M., BJÖRNSSON L. ve BÖRJESSON P., 2006. The Prospects for an Expansion of Biogas Systems in Sweden—Incentives, Barriers and Potentials. *Energy Policy*, 35: 1830–1843.
- LASTELLA G., TESTA C., CORNACCHIA G., NOTORNICOLA M., VOLTASIO F., SHARMA V. K., 2002. Anaerobic Digestion of Semi – Solid Organic Waste: Biogas Production and Its Purification. *Energy Conversion and Management*, 43: 63–75.
- LIAO, B.Q., KRAEMER, J.T., BAGLEY, D.M., 2006. Anaerobic Membrane Bioreactors: Applications and Research Directions, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 36: 489-530.
- LOPEZ, M., ESPINOSA, M.C., 2007. Effect of Alkaline Pretreatment on Anaerobic Digestion of Solid Wastes. *Waste Management*.
- MACIAS-CORRAL, M. A., 2007. Biogas Production via Anaerobic Digestion of High Solids Livestock Manure. New Mexico State University. 289s.
- MALTA–ALVAREZ, J., MACÉ, S., LLABRÉS P., 2000. Anaerobic Digestion of Organic Solid Wastes. An Overview of Research Achievements and Perspectives. *Bioresource Technology*, 74: 3–16.
- MANÇUHAN, C., 2006. Değersiz Bilinen ‘Değer’ Çöp. *Su ve Çevre Teknolojileri*, 2: 24–25.

- MARAÑÓN, E., CASTRILLÓ, L., FERNÁNDEZ, Y., FERNÁNDEZ, E., 2005. Anaerobic Treatment of Sludge from a Nitrification – Denitrification Landfill Leachate Plant. *Waste Management*, 1–6.
- MAZLUM, N., MAZLUM, S., 2004. Kentsel Organik Katı Atıkların Kompostlaştırılması. *Katı Atık ve Çevre*, 55: 23–30.
- MENDES A., A., ve CASTRO, H. F., 2005. Effect on the Enzymatic Hydrolysis of Lipids from Dairy Wastewater by Replacing Gum Arabic Emulsifier for Sodium Chloride. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 48: 135–142.
- MENDES, A., A., PEREIRA, E., B. ve CASTRO, H.F., 2006. Effect of the Enzymatic Hydrolysis Pretreatment of Lipids-Rich Wastewater on the Anaerobic Biodigestion. *Biochemical Engineering Journal*, 32: 185–190.
- METCALF & EDDY, 2003. *Wastewater Engineering*, Mc Graw Hill, New York, 1819s.
- MIGNONE, N., A., 2005. Biological Inhibition / Toxicity Control in Municipal Anaerobic Digestion Facilities. *Journal Water Pollution Control Federation*, 37: 392–406.
- MOSES, V. ve CAPE, E.R., 1999. Underlying Technologies and Economics. (D. SPRINGHAM, editör). *Biotechnology the Science and the Business*, 2. baskı, OPA (Overseas Publishers Association) N. V., Florida, s 225–230.
- MUSLU, Y., 1994. *Atıksuların Arıtılması*. Teknik Üniversite Matbaası, Ankara, 860s.
- NEVES, L., RIBEIRO, R., OLIVEIRA, R., ALVES, M., M., 2006. Enhancement of Methane Production from Barley Waste. *Biomass and Bioenergy*, 30: 599–603.
- NREL/MRI (National Renewable Energy Laboratory, Midwest Research), 1994. Standard Method for Determination of Total Solids in Biomass.
- _____, 1996. Determination of Carbohydrates in Biomass by High Performance Liquid Chromatography.

- _____, 1996. Measurement of Cellulase Activities.
- OERTHER, D.B., 2006. Anaerobic Treatment in the 21st Century. *Water Environment Research*, 78: 459.
- OSTREM, K., 2004. Greening Waste: Anaerobic Digestion for Treating The Organic Fraction of Municipal Solid Wastes. *Earth Engineering Center Colombia University*, 59s.
- ÖKTEM, Y. A., SİVRİ, N., 2005. İki Fazlı Anaerobik Arıtmada İşletme Parametreleri ve Sistem Uygulamaları. II. Mühendislik Bilimleri Genç Araştırmacılar Kongresi, Kasım, İstanbul, 519–525.
- ÖZTÜRK, İ., 1999. Anaerobik Biyoteknoloji ve Atık Arıtımındaki Uygulamaları. *İTÜ İnşaat Fakültesi*, 320s.
- ÖZTÜRK, M., 2005. Hayvan Gübresinden Biyogaz Üretimi. *Çevre ve Orman Bakanlığı Yayınları*, Ankara, 53s.
- ÖZTÜRK, İ., TİMUR, H., KOKAN, U., 1999. Atıksu Arıtımının Esasları: Eysel, Endüstriyel Atıksu Arıtımı ve Arıtma Çamurlarının Kontrolü, *Çevre ve Orman Bakanlığı Yayınları*, Ankara, 450s.
- PARAWIRA, W., READ J. S., MATTIASSON, B., BJÖRNSSON, L., 2007. Energy Production from Agricultural Residues: High Methane Yields in Pilot-Scale Two-Stage Anaerobic Digestion. *Biomass & Bioenergy*, 1–7.
- PARK, C., LEE, C., KIM, S., CHEN, Y., CHASE, H. A., 2005 . Upgrading of Anaerobic Digestion by Incorporating Two Different Hydrolysis Processes. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 100: 164–167.
- PEREZ-CARRILLO, E., and SERNA- SALDIVAR, S. O., 2007. Effect of Protease Treatment Before Hydrolysis with α -Amylase on the Rate of Starch and Protein Hydrolysis of Maize, Whole Sorghum, and Decorticated Sorghum. *Cereal Chemistry*, 84: 607–613.
- RAO, M.S., SINGH, S.P., SINGH, A.K., SODHA, M.S., 2000. Bioenergy Conversion Studies of The Organic Fraction of MSW: Assessment of Ultimate Bioenergy Production Potential of Municipal Garbage. *Applied Energy*, 66: 75–87.

- SATYANARAYAN, S., MURKUTE, P., RAMAKANT, 2008. Biogas Production Enhancement by Brassica Compestris Amendment in Cattle Dung Digesters. *Biomass and Bioenergy*, 32: 210–215.
- SCHMIDT, J. E., MLADENOVSKA Z., LANGE M. ve AHRING B. K., 2000. Acetate Conversion in Anaerobic Biogas Reactors: Traditional and Molecular Tools for Studying this Important Group of Anaerobic Microorganisms. *Biodegradation*, 11: 359–364.
- SINGH, R., MALİK, R. K., JAIN, M. K., TAURO, P., 1984. Biogas Production at Different Solids Concentrations in Daily Fed Cattle Waste Digesters. *Agricultural Wastes*, 11: 253–257.
- SOLERA, R., ROMERO, L. I., ve SALES, D., 2002. The Evolution of Biomass in a Two-phase Anaerobic Treatment Process During Start-Up. *Chemical Biochemical Engineering*, 16: 25–29.
- SORENSEN, B., 2004. *Renewable Energy*. Elsevier Science, Danimarka, 927s.
- SOSNOWSKI, P., WIECZOREK, A. ve LEDAKOWICZ, S., 2003. Anaerobic Co-digestion of Sewage Sludge and Organic Fraction of Municipal Solid Wastes. *Advances in Environmental Research*, 7: 609–616.
- T. C. Çevre Bakanlığı, 1998, Çevre Notları.
- TEKİNEL, O., ve KORUKÇU, A., 1982. *Biyogaz: Ülkemizde ve Diğer Ülkelerdeki Uygulamalar*. Shell, İstanbul, 10s.
- TORUNOĞLU, E., Panel İçin Notlar. Sürdürülebilir Kalkınma Paradigması Üzerine Ön Notlar. Tübitak Vizyon 2023. TMMOB Çevre Mühendisleri Odası.
- TORRES M. L., LLORÉNS M.d.C. E., 2007. Effect of Alkaline Pretreatment on Anaerobic Digestion of Solid Wastes. *Waste Management*, 1–6.
- TOSUN, İ., GÜNAY, A., GÖNÜLLÜ, M. T., 2003. Gül Posasından Biyogaz Üretimi ve Çevresel Önemi. *Katı Atık ve Çevre*, 52: 11–23.
- VANDEVİVERE, P., DE BAERE, L. ve VERSTRAETE, W., 2002. Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes, (J. MATA-ALVAREZ editör). *Types of Anaerobic Digesters for Solid Wastes*, IWA Publishing, 300s, bölüm 4.

- VAN HAANDEL, A.C. ve LETTINGA, G., 1994. Anaerobic Sewage Treatment. John Wiley & Sons, England, 226.
- VAVILIN, V. A. , ANGELIDAKI, I., 2005. Anaerobic Degradation of Solid Material: Importance of Initiation Centers for Methanogenesis, Mixing Intensity, and 2D Distributed Model. *Biotechnology and Bioengineering*, 89: 113–122.
- VAVILIN, V. A. , LOKSHINA, L. Y. , FLOTATS, X. , ANGELIDAKI, I., 2007. Anaerobic Digestion of Solid Material: Multidimensional Modeling of Continuous-Flow Reactor with Non-Uniform Influent Concentration Distributions. *Biotechnology And Bioengineering*, 97: 354–366.
- VERMA, S., 2002. Anaerobic Digestion of Biodegradable Organics in Municipal Solid Wastes, Department of Earth & Environmental Engineering, 56s.
- WILSON, E. J., 2002. Life Cycle Inventory for Municipal Solid Waste Management. *Waste Management & Research*, Haziran: 15–22.
- YADVIKA, SANTOSH, SREEKRISHNAN, T.R., KOHLI S. ve RANA, V., 2004. Enhancement of Biogas Production from Solid Substrates Using Different Techniques—a review. *Bioresource Technology*, 95: 1–10.
- YALDIZ, O., Türkiye’de Enerji Üretim Durumu ve İleriye Yönelik Tahminler, Akdeniz Üniversitesi Temiz Enerji Araştırma ve Uygulama Merkezi (AKTENAM). 22 Ocak/ 2008.
- YANG, P., 2006. Hydrogen and Methane Production from Food Wastes by Anaerobik Fermentation Using Mixed Microbial Cultures. *Biological and Agricultural Engineering. Dissertation in University in California*, 206s.
- YILMAZ, T., YUCEER, A., BASIBUYUK, M., 2008. A Comparison of the Performance of Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Filters Treating Papermill Wastewater. *Bioresource Technology*, 99: 156–163.
- ZHU, I., O’DWYER, J. P., CHANG V. S., GRANDA C. B. ve HOLTZAPPLE, M. T., 2008. Structural Features Affecting Biomass Enzymatic Digestibility. *Bioresource Technology*, 99: 3817–3828.
- ZITOMER. D. ve ADHIKARIEKTRA P., 2005. Methane Production from Municipal Anaerobic Digesters. *Biocycle Energy*, : 64–66.

ZUPANČIČ, G.D., URANJEK–ŽEVART N. ve ROŠ M., 2007. Full-Scale Anaerobic Co–Digestion of Organic Waste and Municipal Sludge. Biomass and Bioenergy, 1–6.

ÖZGEÇMİŞ

1983 yılında Kahramanmaraş’da doğdum. Orta ve lise öğrenimimi Çukurova Elektrik Anadolu Lisesi’nde 2001 yılında tamamladım. Aynı yıl Çukurova Üniversitesi Çevre Mühendisliği bölümünde lisans öğrenimine başladım, 2005 yılında mezun oldum. Aynı yıl Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimine başladım. 2006–2007 öğretim yılında Erasmus Programı kapsamında İsveç’in Högskolan i Borås Üniversitesi’nde 1 yıl eğitim gördüm. Hala yüksek lisans öğrenimime devam etmekteyim.