T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİYOGAZ TESİSLERİNDE ÇÜRÜTÜCÜ SIVILARININ YÖNETİMİ

Sena GENÇOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Mühendisliği Programı

Danışman

Prof. Dr. Mehmet Sinan BİLGİLİ

Mart, 2022

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİYOGAZ TESİSLERİNDE ÇÜRÜTÜCÜ SIVILARININ YÖNETİMİ

Sena GENÇOĞLU tarafından hazırlanan tez çalışması 02.03.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Çevre Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mehmet Sinan BİLGİLİ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Mehmet Sinan BİLGİLİ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Güleda ENGİN
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Mahir İNCE
Gebze Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Mehmet Sinan BİLGİLİ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Biyogaz Tesislerinde Çürütücü Sıvılarının Yönetimi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Sena GENÇOĞLU

İmza

Aileme

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmamı, lisans eğitimimin başından beri beni en iyi şekilde yetiştirmeye çalışan ve lisansüstü eğitimi için beni yüreklendiren bütün hocalarıma adıyorum.

Başta bana her daim yardımcı olan ve yol gösteren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mehmet Sinan BİLGİLİ olmak üzere bütün hayatım boyunca nerede olursam olayım varlıklarını hep yanı başımda hissettiğim, beni tüm kararlarımda destekleyen ve asla yalnız bırakmayan aileme sonsuz saygı, sevgi ve teşekkürlerimi iletiyorum.

Sena GENÇOĞLU

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ viii
KISALTMA LİSTESİ ix
ŞEKİL LİSTESİ x
TABLO LİSTESİ xii
ÖZET xiii
ABSTRACT xv
1 GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 5
1.3 Hipotez 5
2 KENTSEL KATI ATIKLAR 6
2.1 Katı Atık Miktarları 6
2.2 Katı Atık Özellikleri 10
2.3 Katı Atık Yönetimi 14
3 ORGANİK ATIK YÖNETİMİ 19
3.1 Kompost 19
3.1.1 Kompostlama Sürecini Etkileyen Faktörler 20
3.2 Yakma 22
3.3 Biyokurutma 23
3.4 Anaerobik Çürüme 24
3.4.1 Genel Proses Açıklaması 24
3.4.2 Anaerobik Çürütücü Sistemleri 28
3.4.3 Anaerobik Çürütme Sürecini Etkileyen Parametreler 32
3.4.4 Biyogaz Bileşimi 34
4 ÇÜRÜTÜCÜ SIVILARININ YÖNETİMİ 35
4.1 Anaerobik Çürüme Maddesi Özellikleri 36
4.2 Anaerobik Çürüme Maddesi ile İlgili Standart ve Yönetmelikler 38
4.3 Anaerobik Çürüme Maddesini Değerlendirme Yöntemleri 43
4.3.1 Biyogübre ve Toprak Islahı 44
4.3.2 Biyokömür Üretimi 44
4.3.3 Bahçecilik ve Uygulamaları 45
4.3.4 Yapı Malzemleri 45
4.3.5 Su Ürünleri Yetiştiricliği 45

4.4 Karışık ve Katı Anaerobik Çürüme Maddesi Arıtma Yöntemleri 46
4.4.1 Karışık Anaerobik Çürüme Maddesi İçin Arıtma Yöntemleri.....47
4.4.2 Katı Anaerobik Çürüme Maddesi İçin Arıtma Yöntemleri 48
4.5 Çürütücü Sıvısı İçin Arıtma Yöntemleri.....49
4.5.1 Membran Arıtma.....50
4.5.2 Buharlaşma.....51
4.5.3 Çöktürme.....53
4.5.4 Amonyak Sıyırma.....54
4.5.5 Alg Kültürü 56
4.5.6 Diğer Yöntemler.....56
4.6 Çürütücü Sıvıları İçin Yönetim Stratejileri 57
4.7 Yurtdışı Uygulamaları.....59
4.7.1 Almanya Örneği 59
4.7.2 İsviçre Örneği.....62
4.7.3 Japonya Örneği.....62
4.7.4 İrlanda Örneği.....63
5 TÜRKİYE'NİN DURUMU **65**
5.1 Tesisler.....65
5.1.1 Kompost ve Geri Kazanım Tesisi 65
5.1.2 Kemerburgaz Biyometanizasyon Tesisi.....67
5.1.3 Kömürcüoda Biyometanizasyon Tesisi.....72
5.2 Kemerburgaz Biyometanizasyon Tesisi Verileri.....73
5.3 Kömürcüoda Mekanik Ön İşlem ve Biyometanizasyon Tesisi Verileri.....75
5.3.1 Kömürcüoda Mekanik Ön İşlem Tesisi Verileri.....76
5.3.2 Kömürcüoda Biyometanizasyon Tesisi Verileri 77
5.4 Organik Atık Yönetimi ile İlgili Hedefler.....79
5.4.1 Sıfır Atık Yönetmeliği.....79
5.4.2 Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik.....80
5.4.3 Ulusal Atık Yönetimi ve Eylem Planı (UAYP).....80
5.5 2035 Yılı İçin Projeksiyonlar.....81
5.5.1 Nüfus Projeksiyonu 82
5.5.2 Organik Atık Projeksiyonu.....84
5.5.3 Tesis Projeksiyonları.....87
5.5.4 Çürütücü Sıvısı Projeksiyonu.....95

5.5.5 Arıtma/Değerlendirme Yöntemine Göre Fayda/Maliyet Analizi 96
6 SONUÇ VE ÖNERİLER **99**
KAYNAKÇA **101**
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **109**

SİMGE LİSTESİ

C	Karbon
Ca	Kalsiyum
Cd	Kadmiyum
CH_4	Metan
CO_2	Karbondioksit
Cu	Bakır
Hg	Cıva
H_2O	Su
K	Potasyum
Mg	Magnezyum
MW	Megavat
N	Azot
Ni	Nikel
O_2	Oksijen
P	Fosfor
Pb	Kurşun
S	Kükürt
Zn	Çinko

KISALTMA LİSTESİ

AÇ	Anaerobik Çürütme / Çürütücü
AÇM	Anaerobik Çürütme Maddesi
ADNKS	Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi
ATY	Atıktan Türetilmiş Yakıt
CHP	Birleşik Isı ve Güç
EBA	Avrupa Biyogaz Derneği
EKAOK	Evsel Katı Atığın Organik Kısmı
EWC	Avrupa Atık Kataloğu
İBB	İstanbul Büyükşehir Belediyesi
İSTAÇ A.Ş.	İstanbul Çevre Yönetim San. ve Tic. A.Ş.
KOİ	Kimyasal Oksijen İhtiyacı
KKA	Kentsel Katı Atık
LS	Düşük Katı
MS	Orta Katı
OLR	Organik Yükleme Oranı
TS	Toplam Katı
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
UASB	Yukarı Yatay Akışlı Anaerobik Çamur Yataklı Reaktör
UAYP	Ulusal Atık Yönetimi ve Eylem Planı
US EPA	Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı
VS	Uçucu Katılar
YEKDEM	Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması
WFD	Atık Çerçeve Direktifi

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 2009-2019 yılları arası Avrupa'da bulunan biyogaz tesis sayısı…...3
Şekil 1.2 2011-2019 yılları arası Avrupa'da bulunan biyometan tesis sayısı…3
Şekil 1.3 Odayeri-Çöp Gazı Santrali…….....4
Şekil 1.4 Anaerobik çürüme maddesi formları…….4
Şekil 2.1 Yıllara göre üretilmesi beklenen atık miktarı projeksiyonları (World Bank Group, 2018)……..……...7
Şekil 2.2 Coğrafi bölgelere göre yılda üretilen atık miktarı yüzdeleri (a), yılda üretilen milyon ton cinsinden atık miktarı (b)…….....7
Şekil 2.3 Küresel atık bileşimi……..11
Şekil 2.4 Gelir seviyelerine göre ülkelerin atık bileşim yüzdeleri, yüksek gelir (a), orta-yüksek gelir (b), düşük-orta gelir (c) ve düşük gelir (d)…11
Şekil 2.5 UAYP Türkiye atık kompozisyonu yüzdeleri……...12
Şekil 2.6 2017 yılı İstanbul için atık karakterizasyonu……..13
Şekil 2.7 2019 yılı İstanbul için geri kazanılabilir atıkların (a) ve diğer atıkların (b) bileşim yüzdeleri……..14
Şekil 2.8 Küresel ölçekte atıkların bertaraf yöntemine göre yüzdeleri……...15
Şekil 2.9 Atık bertaraf yöntemlerinin gelir seviyesine göre (a) ve coğrafi bölgelere (b) göre dağılımı……..…….....16
Şekil 2.10 Atık yönetimi hiyerarşisi…….....17
Şekil 2.11 Türkiye'de 2014 yılında toplanan belediye atıklarının yönetimi.....18
Şekil 2.12 2019 yılında İstanbul'daki atıkların yönetimi…….....18
Şekil 3.1 Yakma prosesinin şematik gösterimi…….....23
Şekil 3.2 Örnek anaerobik çürütücü tankları……..……...25
Şekil 3.3 Katı atıkların anaerobik çüümesinde yaygın olarak kullanılan birim proses örnekleri (Vandevivere ve diğ., 2033)……....27
Şekil 3.4 Anaerobik çürüme işleminin adımları (Madsen ve diğ., 2011)…...27
Şekil 3.5 Tek kademeli ıslak sistemlerin tipik tasarımı (Waasa Prosesi)…….29
Şekil 3.6 Tek kademelikuru sistemlerde kullanılan DRANCO (a), KOMPOGAS & BRV (b) ve VALORGA (c) tasarımları…….....30
Şekil 3.7 Tek kademeli (a), ardışık kesikli (b) ve karma kesikli (c) sistemlerde sızıntı suyu geri devir modellerinin konfigürasyonu……....31
Şekil 4.1 AÇM ileri arıtma seçenekleri ve uygulama alanları (Peng ve Pivato, 2019)…….46
Şekil 4.2 Membran arıtma prosesi akım şeması……..……...51
Şekil 4.3 Ters Ozmos (RO) modülleri…….....51
Şekil 4.4 Vakum buharlaştırma prosesi akım şeması……....53
Şekil 4.5 Vakum buharlaştırıcı…….53
Şekil 4.6 Çöktürme prosesi akım şeması…….54
Şekil 4.7 Çöktürme düzeneği……...54
Şekil 4.8 Amonyak sıyırma prosesi akım şeması…….55
Şekil 4.9 Amonyak sıyırıcı…….55
Şekil 4.10 AÇ ve AÇM'yi birbirine entegre ederek döngüsel ekonomi kavramlarıyla AÇM yönetimi (Monlau ve diğ., 2015) (Xia ve Murphy, 2016)……..59

Şekil 4.11 Bersenbrück'teki tesise ait vakum buharlaştırıcı……60
Şekil 4.12 Vakum buharlaştırma prosesinden sonra konsantre ürünün nütrient içeriği……..……...60
Şekil 4.13 Müşteri grupları arasında çürütücü sıvısı ve katı AÇM'nin satışlarının dağılımı……..……61
Şekil 4.14 Inwil'deki çürütücü sıvısı işleme tesisi görüntüsü……..……62
Şekil 4.15 Tesisteki baskılı vida ayırıcının elek kısmından görüntüsü……...63
Şekil 4.16 Tesisten çıkan amonyu sülfatın nütrient içeriği……..……64
Şekil 4.17 Tesiste kullanılan özel nitrojen sıyırıcılar…….....64
Şekil 5.1 Kompost ve Geri Kazanım Tesisi akım şeması……...66
Şekil 5.2 Kompost ve Geri Kazanım Tesisi……66
Şekil 5.3 Kemerburgaz Biyometanizasyon Tesisi'ni ve yakın çevresini gösteren uydu görüntüsü……..67
Şekil 5.4 Kemerburgaz Biyometanizasyon Tesisi……..67
Şekil 5.5 Kemerburgaz Biyometanizasyon Tesisi akım şeması……...68
Şekil 5.6 Kemerburgaz Biyometanizasyon Tesisi atık kabul birimi……69
Şekil 5.7 Kemerburgaz Biyometanizasyon Tesisi hidroliz tankı……..70
Şekil 5.8 Kemerburgaz Biyometanizasyon Tesisi son fermantasyon tankı…71
Şekil 5.9 Kemerburgaz Biyometanizasyon Tesisi gaz depolama balonu……71
Şekil 5.10 Kömürcüoda Biyometanizasyon Teisisi akım şeması……...72
Şekil 5.11 Kömürcüoda Biyometanizasyon Tesisi görüntüleri……..73
Şekil 5.12 Kemerburgaz Biyometanizasyon Tesisi dekantör ünitesi……....74
Şekil 5.13 Şile-Kömürcüoda konumunun genel yerleşim planı……75
Şekil 5.14 Şile-Kömürcüoda konumundaki tesislerin akım şeması……..75
Şekil 5.15 Kömürcüoda Mekanik Ön İşlem Tesisi……..76
Şekil 5.16 Türkiye katı atık karakterizasyonu……81
Şekil 5.17 2007-2020 yılları arası Türkiye nüfusu……..82
Şekil 5.18 Nüfus tahmin yöntemlerinin karşılaştırılması……...84
Şekil 5.19 Tahmini belediye atığı miktarları……85
Şekil 5.20 Tahmini organik atık miktarları……..86
Şekil 5.21 Model bir biyogaz tesisinde çürütücü sıvısı işleme için maliyetlerin karşılaştırılması (KTBL, 2008)……..……..…98
Şekil 5.22 Çürüme ürünü işleme için günlük arıtma maliyetlerinin karşılaştırılması……...98

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Bölgelere göre kg/kişi/gün cinsinden oluşan ortalama atık miktarları……8
Tablo 2.2 2019 ve 2020 yılında İstanbul'da depolanan kentsel katı atık miktarları……9
Tablo 2.3 2019 ve 2020 yılında Asya ve Avrupa yakasında aylara göre depolanan atık miktarları……..10
Tablo 2.4 2019 yılı için İstanbul katı atık verileri……13
Tablo 3.1 Tek kademeli ıslak sistemlerin avantaj ve dezavantajları……29
Tablo 3.2 Tek kademeli kuru sistemlerin avantaj ve dezavantajları……30
Tablo 3.3 Çok kademeli sistemlerin avantaj ve dezavantajları……30
Tablo 3.4 Kesikli sistemlerin avantaj ve dezavantajları……32
Tablo 3.5 Tipik biyogaz özellikleri……34
Tablo 4.1 Evsel katı atığın organik kısmından üretilen anaerobik çürüme maddesinin özellikleri (Logan ve Visvanathan, 2019)……37
Tablo 4.2 AÇM için kalite kriterleri (Aso, 2020)(British Standard Institution, 2010)(Sverige, 2013)(Siebert, 2008)(Saveyn ve Eder, 2014)……39
Tablo 4.3 Sıvı fermente ürün kalite parametreleri (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2018)……41
Tablo 4.4 Organik gübrelerle ilgili sınırlamalar (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2018)……42
Tablo 4.5 Karışık AÇM için arıtma teknolojileri, avantaj ve dezavantajları……47
Tablo 4.6 Katı AÇM için arıtma teknolojileri, avantaj ve dezavantajlar……49
Tablo 4.7 Çürütücü sıvısı için arıtma teknolojileri,avantaj ve dezavantajlar….50
Tablo 5.1 Kemerburgaz Biyometanizasyon Tesisi reaktör hacimleri……..73
Tablo 5.2 Kömürcüoda Mekanik Ayırma Tesisi kütle-denge sistemi……..…77
Tablo 5.3 Kömürcüoda Biyometanizasyon Tesisi kütle-denge sistemi……...78
Tablo 5.4 2007-2020 yılları arası TÜİK'e ait Türkiye nüfus verileri……...82
Tablo 5.5 Hesaplama yöntemlerine göre 2035 nüfus projeksiyonu……..84
Tablo 5.6 2021-2035 yılları arası oluşması beklenen belediye atığı miktarları.85
Tablo5.7 2021-2035 yılları arasında oluşması beklenen organik atık miktarları……86
Tablo 5.8 2035 yılı için hesaplanan biyometanizasyon kapasitesi……..95

ÖZET

Biyogaz Tesislerinde Çürütücü Sıvılarının Yönetimi

Sena GENÇOĞLU

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Sinan BİLGİLİ

Hızlı kentleşme, artan nüfus ve gelişen yaşam şartlarına bağlı olarak tüm dünyada her geçen yıl katı atık miktarı artmaktadır. Dünya genelinde her sene 2 milyar ton kentsel katı atık üretildiği raporlanmıştır. Bu atıkların sadece %16'sı geri dönüştürülebilirken %46'sının geri dönüştürülemeyecek şekilde atıldığı tespit edilmiştir. Oluşan katı atık miktarının sürekli artması entegre bir katı atık yönetimini gerektirmektedir. Bu entegre yönetimin sürdürülebilir olmasının yolu yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanmaktan geçmektedir. Atıktan enerji teknolojisi, özellikle anaerobik çürütme, sürdürülebilir ve çevre dostu enerji üretimi için potansiyel ve gelecek vaat eden bir teknoloji olarak kabul edilmektedir.

Üretilen biyogaz yararlı bir yeşil enerji kaynağını temsil ederken, anaerobik çürütme sürecinden kaynaklanan yan ürün güvenli bir şekilde bertaraf edilmesi gereken bir atıktır. Anaerobik çürütme işleminden kaynaklanan bu yan ürün digestate olarak adlandırılmaktadır. İçinde katı ve sıvı fazı birlikte barındırdığı için yoğun haldedir. Sıvı anaerobik çürüme maddesi olarak nitelendirilen bu çürütücü sıvısı hem toprak düzenleyici hem de serbest azot ve fosfor değeri yüksek, bitkiler

tarafından özümsenmesi daha kolay olan organik gübre olarak kullanılabilir. Bir şartlandırıcı olarak, özellikleri büyük ölçüde biyogazın içeriğine bağlı olarak değişmekle beraber, toprağın yapısını iyileştirme kabiliyeti nedeniyle değerlidir. Bu çalışmanın amacı, biyogaz/biyometan tesislerinde üretilen ve atık olarak nitelendirilen çürütücü sıvılarının yönetimine dair önerilerde bulunarak döngüsel ekonomi kapsamında değerlendirmeye alınmalarını sağlamaktır. Hem anaerobik çürütme maddesi kavramını daha iyi anlamak hem de ülkemizde de yasalar çerçevesinde düzenlemeye alınması konusu amaçlarımız arasındadır.

Anahtar Kelimeler: Anaerobik çürütme, çürütücü sıvısı, yenilenebilir enerji, biyometan, ileri arıtma.

ABSTRACT

Management of Liquid Digestate in Biogas Plants

Sena GENÇOĞLU

Department of Environmental Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet Sinan BİLGİLİ

Due to rapid urbanization, increasing population and developing living conditions, the amount of solid waste is increasing every year all over the world. It has been reported that 2 billion tons of municipal solid waste is produced every year around the world. It has been determined that only 16% of these wastes can be recycled, while 46% are disposed of as non-recyclable. The continuous increase in the amount of solid waste generated requires an integrated solid waste management. The way for this integrated management to be sustainable is to use renewable energy sources. Waste-to-energy technology, especially anaerobic digestion, is recognized as a potential and promising technology for sustainable and environmentally friendly energy production.

The produced biogas represents a useful source of green energy, while the by-product from the anaerobic digestion process is a waste that must be safely disposed of. This by-product from the anaerobic digestion process is called digestate. It is dense because it contains solid and liquid phase together. This digestate, which is described as liquid digestate, can be used both as a soil

conditioner and as an organic fertilizer with high free nitrogen and phosphorus value, which is easier to assimilate by plants. As a conditioner, it is valuable for its ability to improve soil structure, although its properties vary greatly depending on the biogas content. The aim of this study is to make suggestions on the management of the digester liquids produced in biogas/biomethane plants and classified as waste, and to ensure that they are taken into consideration within the scope of circular economy. It is among our aims to better understand the concept of liquid digestate material and to regulate it within the framework of laws in our country.

Keywords: Anaerobic digestion, digestate, renewable energy, biomethane, advanced treatment.

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Hızlı kentleşme, artan nüfus ve gelişen yaşam standartları tüm dünyada büyük miktarlarda katı atık oluşumuna sebep olmaktadır (Özbay, 2015). Verisk Maplecroft tarafından hazırlanan rapora göre dünya genelinde her yıl 2,01 milyar ton kentsel katı atık üretildiği belirtilmiştir. Bu rapora göre atıkların sadece %16'sı geri dönüştürülürken, %46'sının ise geri dönüştürülemeyecek şekilde atıldığı tespit edilmiştir (Verisk Maplecroft, 2019). Türkiye genelindeki durum incelendiğinde, 2018 yılında toplam 32,21 milyon ton kentsel katı atık üretildiği raporlanmıştır. Katı atık üretim oranları ülke için günde kişi başına 1,16 kg olarak hesaplanmıştır (TÜİK, 2018).

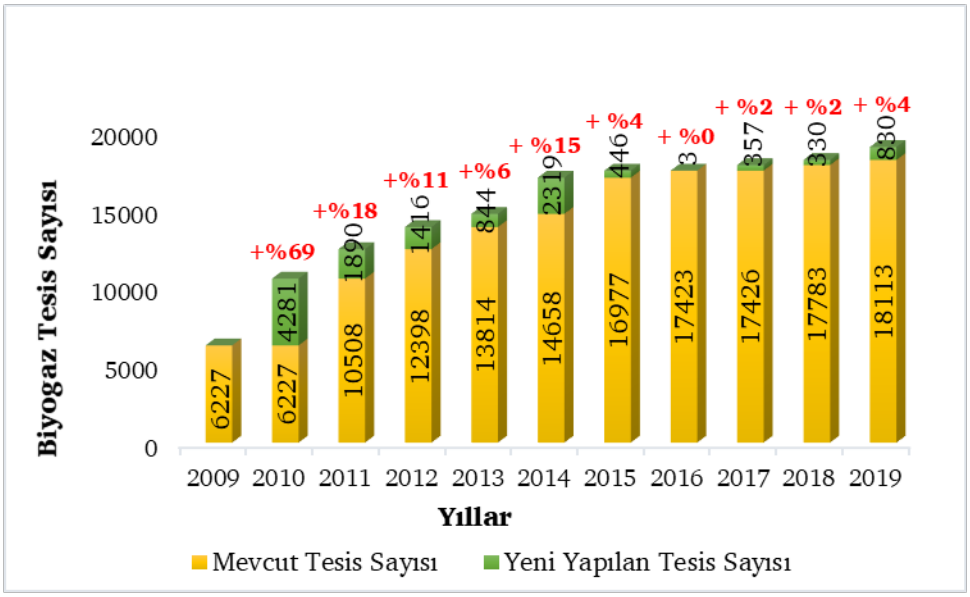
Oluşan katı atık miktarının sürekli artması insan sağlığını ve ekolojik çevreyi tehdit etmektedir (Badgie ve diğ., 2012). Önemli teknolojik ve düzenleyici gelişmeler sağlansa da atıklardan kaynaklanan olumsuz sağlık etkileri düşünüldüğünde, birçok ülkede bertaraf ve arıtma tesisleri hala yetersizdir (Fernández-Nava ve diğ., 2014). Atık üretimi, taşınması, işlenmesi ve bertarafı bir kentsel katı atık yönetim sistemi içindeki ana işlemlerdir (Zhang ve diğ., 2014). İdeal arıtım ve bertaraf işlemleri; kaynak azaltma, malzeme geri kazanımı, atıktan enerji eldesi, depolama ve kompostlama gibi çeşitli yönetim seçeneklerini gerektirir (Turan ve diğ., 2009).

Düzenli depolama, Türkiye'nin atık yönetimi uygulamalarında kullanılan en yaygın yöntemdir. Ülkemizde oluşan atıkların yaklaşık olarak %90'lık kısmı belediyelere ait düzenli depo sahalarında depolanmaktadır. Ancak birçok Avrupa ülkesi için düzenli depolama, alan sıkıntısı ve sera gazı emisyonları ile sızıntı suyu sorunu yüzünden uygun bir atık yönetim metodu olmaktan çıkmıştır (Hartmann ve diğ., 2002).

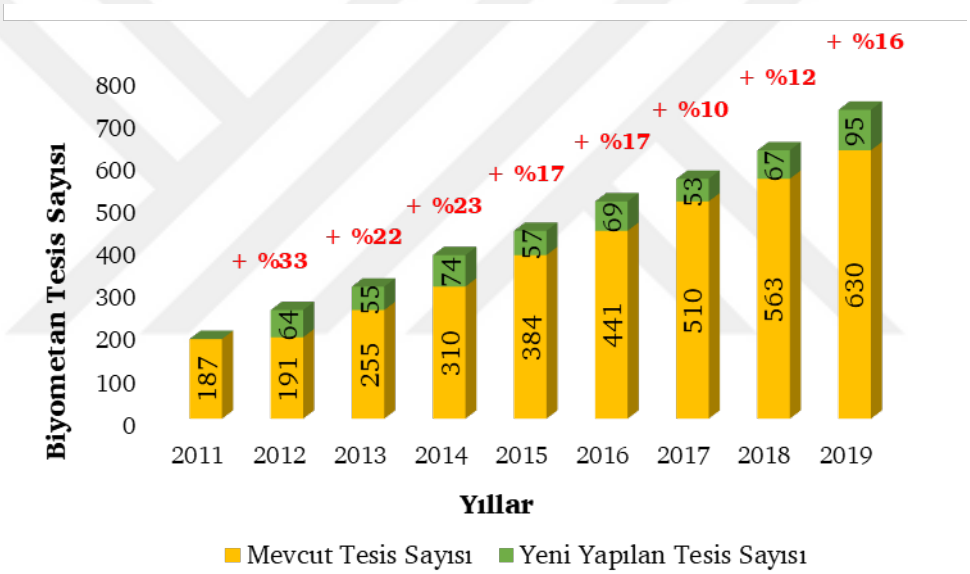
Çevre bilimciler, iklim değişikliğinin etkilerinin azaltılması için fosil yakıtlardan yenilenebilir enerji kaynaklarına geçilmesini savunmaktadır. Bu kaynaklar;

hidroelektrik, jeotermal enerji, güneş, rüzgâr, biyokütle ve dalga enerjisi olarak sıralandırılabilir. Güneş ve rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının çoğu değişken hava koşullarına bağlıyken, biyokütle enerjisinin buna bağlı olmaması biyoenerji üretimi için anaerobik çürütme uygulamasını ön plana çıkarmıştır (Dahlin ve diğ., 2017).

Atıktan enerji teknolojisi, özellikle anaerobik çürütme, sürdürülebilir ve çevre dostu enerji üretimi için potansiyel ve gelecek vaat eden bir teknoloji olarak kabul edilmektedir (Srisowmeya ve diğ., 2020). Diğer organik atık bertaraf yöntemlerine kıyasla anaerobik çürütmenin diğer avantajları arasında daha düşük işletme maliyetleri (havalandırma gerektirmez), daha küçük karbon ayak izi (özellikle geniş alan gerektiren kompostlama ile karşılaştırıldığında), patojen giderme, koku azaltma, daha düşük çamur üretim hızı (aerobik işlemlere kıyasla) ve çeşitli organik atıkları tek bir reaktörde birlikte çürütme potansiyeli gibi özellikleri sayılabilir (Koupaie ve diğ., 2019). Aynı zamanda organik atıkların anaerobik çürütülmesi, sera gazı emisyonlarının azaltılması için düzenli depolama yerine kullanılan ümit verici bir alternatiftir ve Avrupa'daki mevcut düzenleme tarafından da teşvik edilmektedir (Muscolo ve diğ., 2017). Avrupa Biyogaz Derneği' nin (EBA) 2018 yılında yayınlamış olduğu yıllık biyogaz istatistik raporuna göre Avrupa' da 17.783 adet biyogaz tesisi işletilmektedir. Bu tesislerin yaklaşık %60'ı (10.791 adet) Almanya' da bulunmaktadır. Bu tesislerin toplam 4.497 MW'lık kurulu kapasitesi vardır ve bu tesisler sayesinde yaklaşık 19.9 milyon ton CO_2 tasarruf edilmiştir (Ar, 2018). Bunu 1.655 adet tesis ile İtalya ve 742 adet tesis ile Fransa takip etmektedir (European Biogas Association, 2018). 2020 yılında yayınlanan rapora bakıldığında ise Avrupa' da 17.783 adet olan biyogaz tesisi 2018 yılına göre %6,5 artış göstererek 18.943 adede ulaşmıştır. İşletilen biyometan tesislerinin sayısı ise 2018 yılına göre %50 artış göstererek 483'ten 725'e çıkmıştır. Almanya bu tesislerin %32'sine (232 adet) ev sahipliği yapmaktadır. Onu Fransa 131 adet tesis ile ve İngiltere 80 adet tesis ile takip etmektedir. 2009-2019 yılları arasında biyogaz tesislerinin sayısındaki artış Şekil 1.1'de ve 2011-2019 yılları arasında biyometan tesislerinin sayısındaki artış Şekil 1.2'de görülmektedir (European Biogas Association, 2020).



Şekil 1.1 2009-2019 yılları arası Avrupa'da bulunan biyogaz tesis sayısı



Şekil 1.2 2011-2019 yılları arası Avrupa'da bulunan biyometan tesis sayısı

Türkiye'deki tesislerin durumuna bakıldığında ise, 2019 yılında kayıtlı 100 adet biyogaz, biyokütle, atık ısı ve pirolitik yağ enerji santrali olduğu görülmektedir. Bu santrallerin kurulu güçleri 34 MW ile 0,12 MW arası değişmekte olup toplam kurulu güç yaklaşık 530 MW' tır. Bu tesislerden kurulu güç kriterine göre en büyüğü İstanbul – Eyüp' te bulunan Odayeri Çöp Gazı Santrali olup kurulu gücü 34 MW' tır. Bunu 25 MW ile Ankara' da bulunan Mamak Çöplüğü Biyogaz Tesisi, 16 MW ile Adana' da bulunan Sofulu Çöplüğü Biyogaz Tesisi ve 14 MW ile yine İstanbul – Şile' de bulunan Kömürcüoda Çöplüğü Biyogaz Tesisi takip etmektedir (Yılmaz ve diğ., 2017), (https://www.enerjiatlasi.com/biyogaz/, 2021). Çöpten

elektrik üretim tesisine örnek olarak Türkiye'nin en büyüğü olan Odayeri-Çöp Gazı Santrali Şekil 1.3'te gösterilmiştir.



Şekil 1.3 Odayeri-Çöp Gazı Santrali

Biyoenerji üretimindeki bu artışa bağlı olarak, üretilen biyogaz yararlı bir yeşil enerji kaynağını temsil ederken, anaerobik çürütme sürecinden kaynaklanan yan ürün güvenli bir şekilde bertaraf edilmesi gereken bir atıktır (Muscolo ve diğ., 2017).

Tezin bu kısmından sonrasında anaerobik çürütme işleminden kaynaklanan bu yan ürün anaerobik çürüme maddesi (AÇM) olarak adlandırılacaktır. Bu çürütücü sıvının hacmi ve özellikleri aslında çürütülen atığın bileşimine bağlıdır. İçinde katı ve sıvı fazı birlikte barındırdığı için yoğun haldedir. AÇM formları Şekil 1.4'te görülmektedir.



Şekil 1.4 Anaerobik çürüme maddesi formları

Depolanması, bertarafı ve yönetimi, biyogazı sürdürülebilir bir alternatif enerji kaynağı olarak kurmaya çalışan endüstriler için çeşitli zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle, bulamacın katı-sıvı faz ayrımı gerçekleştirilir. Tam ölçekli tesislerde uygulanan en yaygın katı-sıvı ayrımı vidalı pres, eleme tamburu presi (titreşimli elek) ve santrifüjdür. Katı-sıvı ayrımı, esas olarak katı fazda kalan fosfor ile ağırlıklı olarak sıvı fazda bulunan nitrojenin ayrılmasını sağlar. Bantlı ve tamburlu kurutucular, bulamacın katı veya konsantre bir ürüne dönüştürülmesini ve iyileştirilmesini sağlar. Ayrıca, amonyak sıyırma, membran prosesleri ve vakumla buharlaştırma gibi çok gelişmiş teknolojiler de mevcuttur (Dahlin ve diğ., 2017). AÇM olarak nitelendirilen bu çürütücü sıvısı hem toprak düzenleyici hem de serbest azot ve fosfor değeri yüksek, bitkiler tarafından özümsenmesi daha kolay olan organik gübre olarak kullanılabilir (Sayın ve Erdoğan, 2011). Bir şartlandırıcı olarak, özellikleri büyük ölçüde biyogazın içeriğine bağlı olarak değişmekle beraber, toprağın yapısını iyileştirme kabiliyeti nedeniyle değerlidir (Saveyn ve Eder, 2014).

Birçok Avrupa ülkesinde AÇM için kanunlar çerçevesinde düzenlenmiş yönetmelikler ve sınırlar bulunmaktadır. Ancak biyogaz/biyometan tesislerinden kaynaklanan son ürün olarak değerlendirilmesi gereken bu çürütücü sıvılarına yönelik ülkemizde henüz yeteri kadar yatırım yapılmamıştır. Çalışmanın temel kaynağını bu eksiklik oluşturmaktadır.

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının amacı, biyogaz/biyometan tesislerinde üretilen ve atık olarak nitelendirilen çürütücü sıvılarının yönetiminde uygulanan yöntemlerin incelenmesi ve ülkemiz için alternatiflerin değerlendirilerek döngüsel ekonomi kapsamında değerlendirilmesini sağlamaya yönelik önerilerin sunulmasıdır.

1.3 Hipotez

Anaerobik çürütme işleminden kaynaklanan çürütücü sıvısı kavramının ülkemizde hem tam olarak bilinmemesi hem de değerlendirilemeyen bir atık olması sebebiyle, AÇM yönetimi ve değerlendirilmesi ile ilgili olarak uygulanabilecek yöntemler ve yasal düzenlemeler için bir altlık oluşturulacaktır.

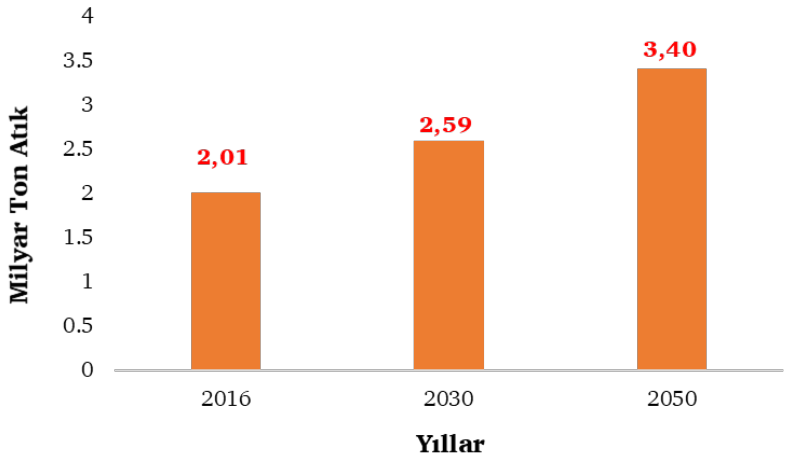
2
KENTSEL KATI ATIKLAR

Belediye atığı ya da kentsel katı atık olarak nitelendirilen atıklar T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından "*Belediye atığı, belediyeler tarafından ya da belediyeler adına toplanan atıkları temsil eder; asıl kısım evsel atıklardan oluşur, fakat ticaretten, ofis binalarından, kurumlardan ve küçük işletmelerden alınan atıklar da dahildir.*" şeklinde tanımlanmaktadır (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2021). Kentsel katı atıkları geri dönüştürülebilir ve geri dönüştürülemez ya da organik ve inorganik gibi muhtelif şekillerde sınıflandırmak mümkündür. Geri kazanılabilir atıklar; cam, metal, kâğıt/karton ve plastik şeklinde sıralanabilir. Organik atıklar bir diğer deyişle biyobozunur atıklar da mutfak, gıda, park/bahçe atıkları vb. şeklinde sıralanabilir. Bu bölümde dünyada ve ülkemizde her gün üretilen ve 'çöp' olarak nitelendirilen kentsel katı atıklar; miktar, özellik ve yönetim açılarından 3 ana başlıkta incelenecektir.

2.1 Katı Atık Miktarları

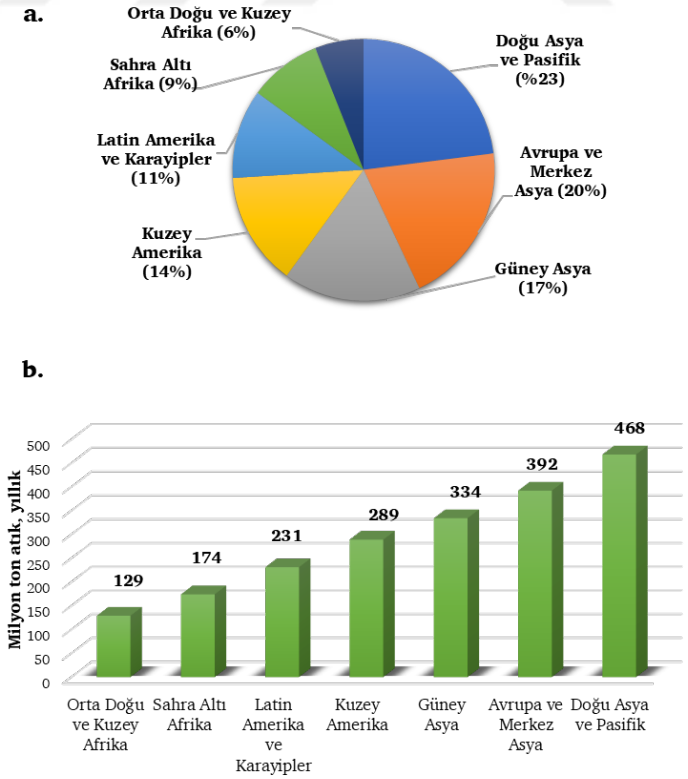
Dünya Bankası'nın 2018 yılında yayınladığı 'What A Waste 2.0' isimli raporuna göre dünyada, kişi başına günde 0,74 kilogram atık üretilmektedir, ancak ulusal bazda atık üretim oranları, kişi başına günde 0,11 ila 4,54 kilogram arasında değişkenlik göstermektedir. Atık üretim hacimleri genellikle gelir seviyeleri ve kentleşme oranları ile doğrudan ilişkilidir.

Dünya genelinde her yıl 2,01 milyar ton kentsel katı atık üretilmektedir ve eğer önlem alınmazsa gelecek projeksiyonlara göre 2050 yılına kadar bu miktarın 3,4 milyar tona çıkması beklenmektedir. Şekil 2.1'de bu gelecek projeksiyonları gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Yıllara göre üretilmesi beklenen atık miktarı projeksiyonları (World Bank Group, 2018)

Dünya nüfusunun yalnızca %16'sını oluştursalar da gelişmiş ülkelerin, katı atıkların %34'üne sebep olduğu, Doğu Asya ve Pasifik bölgesinin tek başına küresel katı atık hacminin %23'ünü oluşturduğu bilgisi raporda belirtilmiştir. Düşük gelirli ülkeler dünya nüfusunun %9'unu oluşturmaktadır ancak küresel atığın yalnızca %5'ini üretmektedir. Şekil 2.2'de coğrafi bölgelere göre yılda oluşan atık miktarları detaylı olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Coğrafi bölgelere göre yılda üretilen atık miktarı yüzdeleri (a), yılda üretilen milyon ton cinsinden atık miktarı (b)

Kuzey Amerika bölgesindeki üç ülke- Bermuda, Kanada ve Amerika Birleşik Devletleri- günde 2,21 kilogram ile kişi başına en yüksek ortalama atık miktarını üreten ülkelerdir. Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (US EPA) 2018 yılında ABD'de toplam kentsel katı atık üretimini 292,4 milyon ton ve kişi başına günde 2,22 kilogram olarak açıklamıştır. Üretilen kentsel katı atığın yaklaşık 69 milyon tonu geri dönüştürülmüş ve 25 milyon tonu kompostlamaya gönderilmiştir. Buna göre, yaklaşık 94 milyon ton kentsel katı atık geri dönüştürülmüş ve kompostlanmıştır, bu da %32,1'lik bir geri dönüşüm ve kompostlama oranına eşdeğerdir (US EPA, 2021). Düşük ve orta gelirli ülkelerin yüksek oranda olduğu üç bölge, kişi başına en düşük atık miktarını üretir: Sahra Altı Afrika günde ortalama 0,46 kilogram, Güney Asya günde 0,52 kilogram ve Doğu Asya ve Pasifik günde 0,56 kilogram. Genel olarak, 2016 yılı için küresel ortalama kişi başına günlük 0,74 kilogramdır. Ülkeler arasında ortalama atık üretimi, kişi başına günlük 0,11 kilogramdan kişi başına günlük 4,54 kilograma kadar önemli ölçüde değişmektedir. Bu değişiklikler Tablo 2.1'de detaylı olarak listelenmiştir (World Bank Group, 2018).

Tablo 2.1 Bölgelere göre kg/kişi/gün cinsinden oluşan ortalama atık miktarları

Bölgeler	**2016 Ortalaması**	**Minimum**	**Maksimum**
Sahra Altı Afrika	0,46	0,11	1,57
Güney Asya	0,52	0,17	1,44
Doğu Asya ve Pasifik	0,56	0,14	3,72
Orta Doğu ve Kuzey Afrika	0,81	0,44	1,83
Latin Amerika ve Karayipler	0,99	0,41	4,46
Avrupa ve Merkez Asya	1,18	0,27	4,45
Kuzey Amerika	2,21	1,94	4,54

Türkiye İstatistik Kurumu'nun (TÜİK) 2018 yılı verilerine göre Türkiye'de yılda toplam 32,21 milyon ton kentsel katı atık üretildiği raporlanmıştır. Bir günde üretilen atık miktarı ise kişi başına 1,16 kg olarak hesaplanmıştır. İlçe belediyelerince toplanan 32,21 milyon ton atığın %67,2'si (21,65 milyon ton) düzenli depolama tesislerine, %20,2'si (6,50 milyon ton) belediye çöplüklerine ve %12,3'ü (3,96 milyon ton) geri kazanım tesislerine gönderilerek bertaraf edilmektedir. İstanbul, 2018 yılı için 7,042.585 ton (%22) atık ile Türkiye'de en çok atık üreten il olmuştur (TÜİK, 2018).

İstanbul Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü'nün Aralık 2020'de hazırlamış olduğu İstanbul İl Sıfır Atık Yönetim Sistemi Planı'na göre İstanbul genelinde düzenli depolama sahasına gönderilen evsel atıkların miktarı 2019 yılında 6,136.665 ton ve 2020 yılının ekim ayı sonu verilerine göre 5,133.536 tondur (İstanbul Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü, 2020). İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB)' nden alınan veriler doğrultusunda hazırlanan 2019 ve 2020 yılı için İstanbul'da düzenli depolama sahalarına getirilen atık miktarı tablolarının özeti Tablo 2.2'de görülmektedir.

Tablo 2.2 2019 ve 2020 yılında İstanbul'da depolanan kentsel katı atık miktarları

Yıllar	**Depolanan Kentsel Katı Atık (milyon ton)**
2019	6,136.665
2020 (Ekim sonu itibariyle)	5,133.536

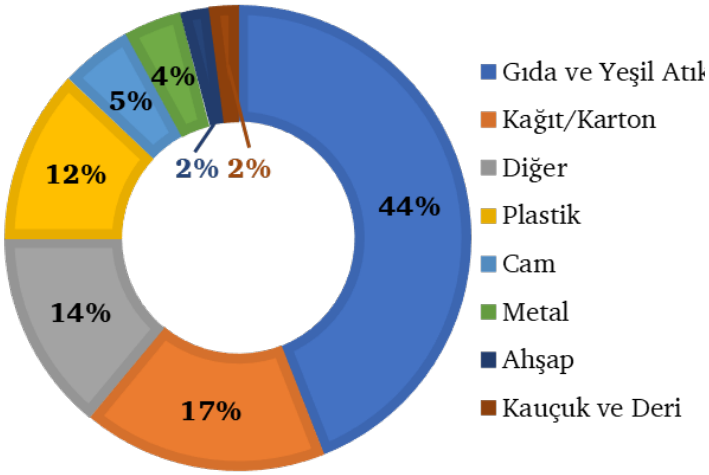
İBB iştiraki olan ve İstanbul'daki düzenli depolama sahalarını, geri kazanım ve kompost tesisini işleten İstanbul Çevre Yönetimi San. ve Tic. A.Ş. (İSTAÇ A.Ş.)'nin 2019 yılında yayınlamış olduğu faaliyet raporuna göre Asya ve Avrupa yakasında aylara göre düzenlenmiş depolanan atık miktarları Tablo 2.3'de gösterilmiştir (İSTAÇ A.Ş., 2019). Tablodaki atık miktarları toplandığında depolanan atığın 6,400.733 ton olduğu görülmektedir. İBB verileri ile aradaki yaklaşık 265.000 tonluk farkın sebebi tıbbi atıkların sterilizasyondan sonra Odayeri Düzenli Depolama Sahası'nda depolanmasıdır. Aynı zamanda komposta giden atıklardan arta kalanlarda depolama sahalarında bertaraf edilmektedir.

Tablo 2.3 2019 yılında Asya ve Avrupa yakasında aylara göre depolanan atık miktarları

Aylar	Asya Yakası (ton)	Avrupa Yakası (ton)	
	Kömürcüoda	Odayeri	Seymen
Ocak	191.561	9.739	307.439
Şubat	172.326	11.584	273.884
Mart	195.165	13.973	308.763
Nisan	186.127	13.178	294.247
Mayıs	209.732	12.401	325.198
Haziran	226.760	9.902	297.519
Temmuz	237.328	17.074	320.258
Ağustos	247.545	15.673	309.506
Eylül	203.786	8.503	330.591
Ekim	196.440	9.838	358.004
Kasım	198.697	13.265	331.326
Aralık	197.058	12.759	333.585
Toplam	**2,462.525**	**147.887**	**3,790.321**

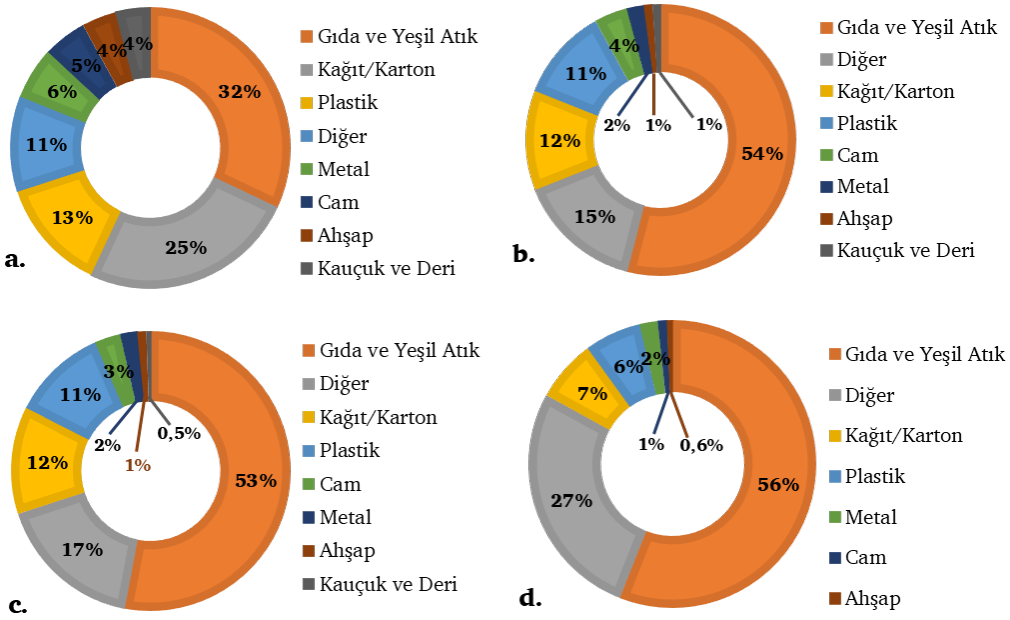
2.2 Katı Atık Özellikleri

Atık bileşimi, evsel katı atıklarda bulunan malzeme türlerinin sınıflandırılmasıdır. Atık bileşimi genellikle nihai bertaraf alanlarından çöp örneklerinin alındığı, önceden tanımlanmış kategorilere ayrıldığı ve tartıldığı standart bir atık denetimi yoluyla belirlenir. Uluslararası düzeyde, en büyük atık kategorisi, küresel atıkların %44'ünü oluşturan gıda ve yeşil atıktır. Kuru geri dönüştürülebilir maddeler (plastik, kâğıt/karton, metal ve cam) atığın %38'ini oluşturur. Uluslararası bazdaki kentsel katı atıkların bileşimi Şekil 2.3'te gösterilmektedir (World Bank Group, 2018).



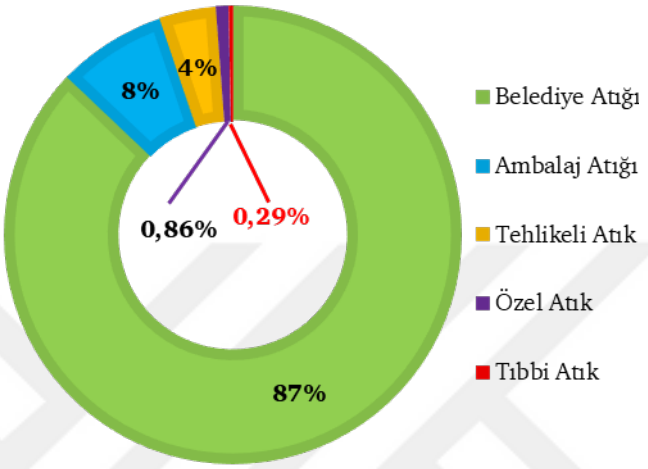
Şekil 2.3 Küresel atık bileşimi

Atık bileşimi, gelir düzeyine göre önemli ölçüde değişmektedir. Gelir seviyeleri yükseldikçe atıktaki organik madde yüzdesi azalır. Yüksek gelirli ülkelerde tüketilen ürünler, düşük gelirli ülkelere göre daha fazla kâğıt ve plastik gibi malzemeleri içerir. Küresel gıda kaybı ve israfı, gıda ve yeşil atığın önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Gıda atığı ve yeşil atık, düşük ve orta gelirli ülkelerde atığın %50'den fazlasını oluşturmaktadır. Yüksek gelirli ülkelerde organik atık miktarı yaklaşık %32'dir. Farklı gelir seviyelerine göre düzenlenmiş olan atık bileşim yüzdeleri Şekil 2.4'te gösterilmiştir (World Bank Group, 2018).



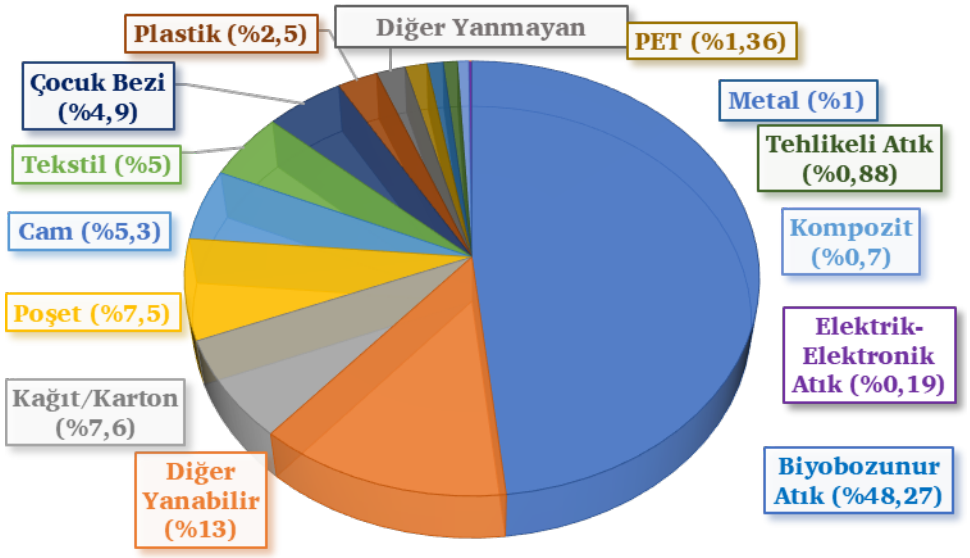
Şekil 2.4 Gelir seviyelerine göre ülkelerin atık bileşim yüzdeleri, yüksek gelir (a), orta-yüksek gelir (b), düşük-orta gelir (c) ve düşük gelir (d)

Ülkemizde çıkan atıkların organik bileşiminin yaklaşık %50 civarında olması nedeniyle Türkiye daha çok orta gelirli ülkelerin grafiğine uygun bir yaklaşım sergilemektedir. 2017 yılında T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından hem atık yönetimindeki güncel durumu hem de 2023 hedeflerini kapsayan Ulusal Atık Yönetimi ve Eylem Planı (UAYP) yayınlanmıştır. Bu plandaki verilere göre atıkların bileşimi Şekil 2.5'te detaylı olarak görülmektedir.



Şekil 2.5 UAYP Türkiye atık kompozisyonu yüzdeleri

Türkiye'de nüfus açısından en kalabalık olan ve en çok atık üreten il konumundaki İstanbul'un katı atık kompozisyonu incelenirse Türkiye genelindeki mevcut durum daha iyi anlaşılacaktır. İstanbul Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü tarafından yayınlanan İstanbul İl Sıfır Atık Yönetim Sistemi Planı'nda 2019 yılında İstanbul'da 6 milyon tondan fazla atık üretildiği raporlanmıştır. Yine aynı Plan'a göre İstanbul'da katı atık karakterizasyonu çalışmaları yaz ve kış sezonu olmak üzere iki kere yapılmaktadır. En son detaylı çalışma İBB ve İSTAÇ A.Ş. tarafından 2017 yılında yapılmıştır ve yaz/kış sezonu için yapılan karakterizasyon çalışmalarının ortalamaları Şekil 2.6'da verilmiştir. 2019 yılı için katı atık verileri ise Tablo 2.4'te listelenmiştir.



Şekil 2.6 2017 yılı İstanbul için atık karakterizasyonu

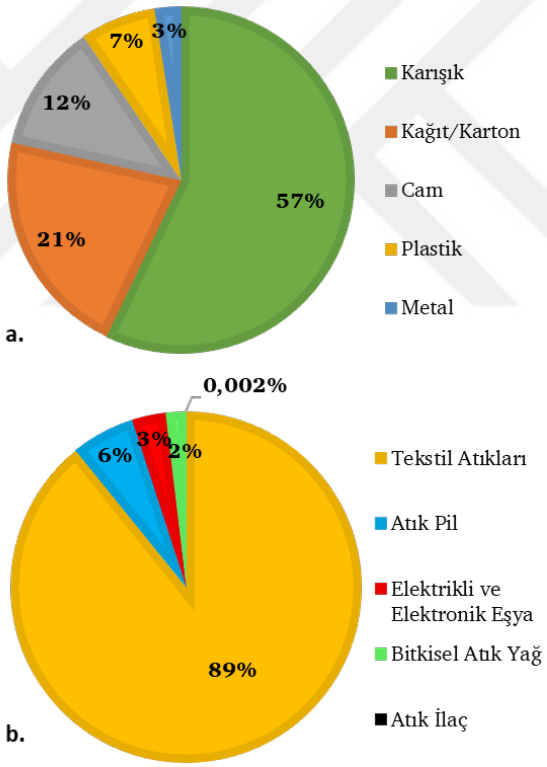
Tablo 2.4 2019 yılı için İstanbul katı atık verileri

Atık Karakterizasyonu (ton/ay)	Atık Türü	Yaz (ton)	Kış (ton)
Geri Kazanılabilir Atıklar	Cam	26,212.24	26,660
	Metal	4,950.96	5,787.7
	Kâğıt/Karton	48,367.65	45,927.306
	Plastik	16,048.5	14,915.42
	Karışık	126,097.39	125,201.025
	Toplam	221,676.75	218,491.44
Diğer Atıklar	Atık İlaç	5,55	4,57
	Bitkisel Atık Yağ	3,398.075	3,337.537
	Atık Pil	10,898.7599	10,929.5377
	Tekstil Atıkları	185,689.531	149,385.159
	Elektrikli ve Elektronik Eşya	5,293.82	6,117.61
	Toplam	205,285.73	169,774.41
Hacimli Atıklar		149,986.31	140,858.49
Biyobozunur Atıklar (Mutfak ve Bahçe Atıkları)		242,426.34	185,065.77
Toplam Evsel Atık		2,652.957.85	2,467.191.35

Hem 2017 hem de 2019 yılının verileri incelendiğinde atık kompozisyonunun ciddi bir kısmını (yaklaşık %50) biyobozunur yani mutfak, bahçe atıkları gibi organik atıkların oluşturduğu görülmektedir. Bu da aslında organik atıkların

çürütüldüğü biyometanizasyon çalışmaları için İstanbul'un yüksek potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. İnşaat süreci devam eden ve sadece organik atıkların işlenmesi açısından bir ilk olan biyometanizasyon tesisleri için hammadde de bu şekilde sağlanmış olacaktır.

Tablo 2.4'teki veriler kullanılarak geri dönüştürülebilir ve diğer atıklar kategorisinde bulunan atıkların kendi içindeki bileşim yüzdeleri hesaplanmış olup Şekil 2.7'de gösterilmiştir. Geri kazanılabilir atıklara bakıldığında karışık olarak gelenlerden sonra en yüksek orana sahip olan grubun kağıt/karton atıkları ve ardından sırasıyla cam ve plastik olduğu görülmektedir. Diğer atık kategorisine bakıldığında ise tekstil atıkları çok ciddi bir oranla (yaklaşık %89) öne çıkmaktadır.

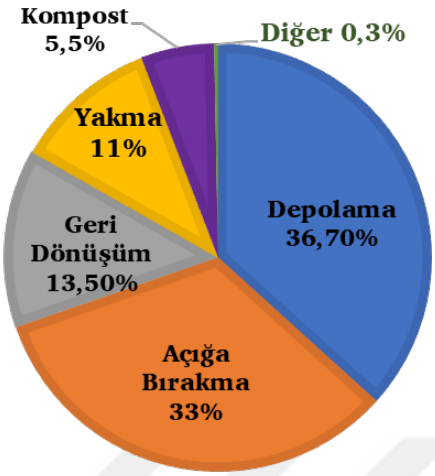


Şekil 2.7 2019 yılı İstanbul için geri kazanılabilir atıkların (a) ve diğer atıkların (b) bileşim yüzdeleri

2.3 Katı Atık Yönetimi

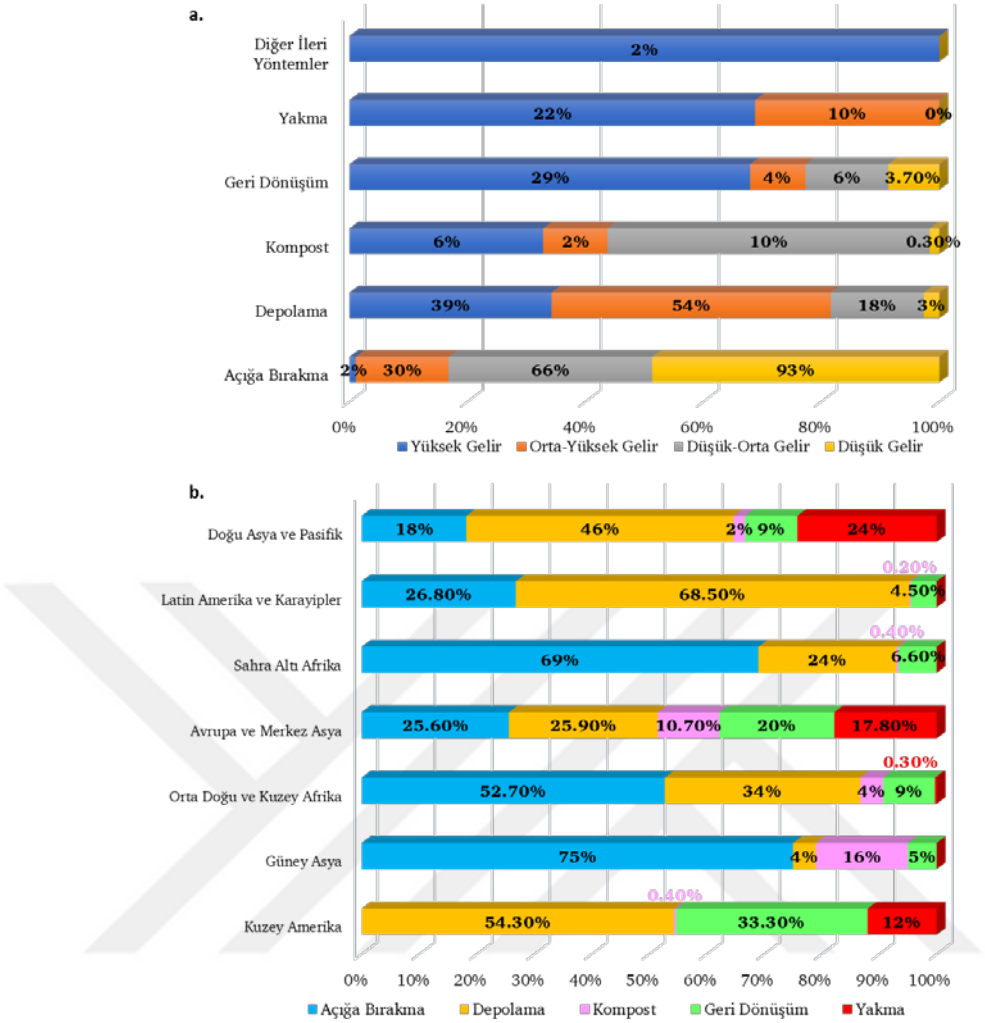
Dünya çapında, atığın neredeyse %40'ı düzenli depolama alanlarına gitmekte, yaklaşık %19'u geri dönüşüm ve kompostlama yoluyla malzeme geri kazanımından geçmekte, %11'i modern yakma yoluyla işlenmektedir. Küresel

olarak atığın %33'ü hala açığa bırakma yoluyla bertaraf edilmektedir. Dünyadaki atıkların bertaraf yöntemlerinin yüzdeleri Şekil 2.8'de gösterilmiştir.



Şekil 2.8 Küresel ölçekte atıkların bertaraf yöntemine göre yüzdeleri

Atık bertaraf uygulamaları, gelir düzeyine ve bölgeye göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Araziye dökme, depolama alanlarının henüz bulunmadığı düşük gelirli ülkelerde yaygındır. Düşük gelirli ülkelerde atıkların yaklaşık %93'ü yakılmakta veya yollara, açık arazilere ve su yollarına atılmaktadır. Yüksek gelirli ülkelerde ise atıkların yalnızca yüzde 2'si açığa bırakılmaktadır. Ülkeler ekonomik olarak zenginleştikçe, atıklar daha sürdürülebilir yöntemler kullanılarak yönetilmektedir. Düzenli depolama alanlarının yapımı ve kullanımı, genellikle sürdürülebilir atık yönetimine geçiş için ilk adımdır. Ekonomik olarak zengin ülkeler geri dönüşüm ve kompostlama yoluyla malzemelerin geri kazanılmasına daha fazla odaklanma eğilimindedir. Yüksek gelirli ülkelerde, atığın %29'u geri dönüşüme gitmektedir ve %6'sı kompostlanmaktadır. Yakma da yaygın bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Ancak 2016 yılında küresel karbon emisyonlarının %5'inin katı atıkların yakılmasından kaynaklandığı bildirilmiştir. Bu yüzden sürdürülebilir katı atık yönetiminin öneminin altı çizilmektedir ve toplanmayan/doğru depolanmayan atıkların çevre ve insan sağlığına ciddi zararları olacağı vurgulanmaktadır (World Bank Group, 2018). Şekil 2.9'da hem coğrafi bölgelere hem de gelir seviyesine göre bertaraf yüzdeleri detaylıca gösterilmektedir.



Şekil 2.9 Atık bertaraf yöntemlerinin gelir seviyesine (a) ve coğrafi bölgelere (b) göre dağılımı

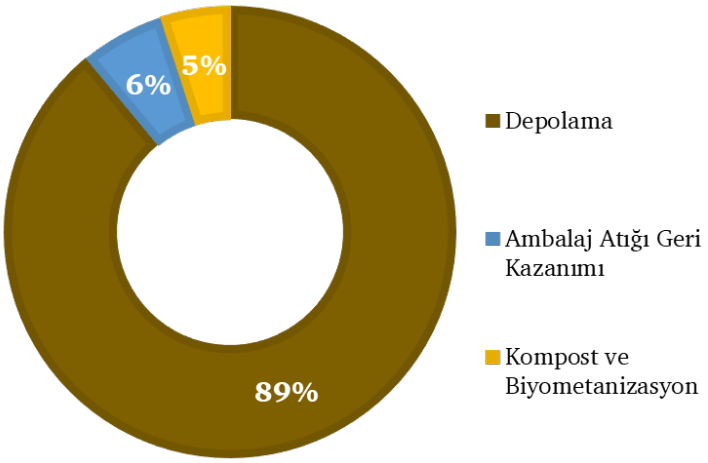
Türkiye'deki mevcut durumda atık yönetimi alanında birçok mevzuat bulunmaktadır. En çok başvurulan yönetmeliklerin başında gelen 'Atık Yönetimi Yönetmeliği' 2015 yılında yayınlanmış olup bu yönetmelik ile atık oluşumunun engellenmesi, azaltılması, atığın yeniden kullanılması, atıkların bertarafı ve denetim faaliyetlerinin yapılması amaçlanmaktadır. En son yayınlanan yönetmeliklerden biri olan 'Sıfır Atık Yönetmeliği' ise 2019 yılında yayınlanmıştır ve bu yönetmelik kapsamında hammadde ile doğal kaynakların etkili bir şekilde yönetilmesi, sıfır atık yönetim sisteminin kurulması ve yaygınlaştırılması amaçlanmaktadır. 2872 sayılı Çevre Kanunu'na göre ise kentsel katı atıklarının toplanması ve yönetimi görevi belediyelere verilmiştir. Türkiye' de toplam 30 Büyükşehir Belediyesi bulunmaktadır. 5393 sayılı Belediye Kanunu'na göre İlçe

Belediyeleri kendi sorumluluk alanındaki sınırlardan kaynağında ayrı topladıkları evsel nitelikli katı atıkları aktarma istasyonu ya da depolama sahalarına taşımakla yükümlüdür. 5216 sayılı Büyükşehir Belediyesi Kanunu'na göre Büyükşehir Belediyeleri'nin sorumluluğu ise aktarma istasyonlarına ya da depolama sahalarına gelen atıkları (hafriyat, sanayi ve tıbbi atıklar) yönetmek, bu amaçla tesisler kurmak/kurdurmak, işletmek/işlettirmek ve bununla ilgili gerekli düzenlemeleri yapmaktır (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2017). Atık yönetimi uygulaması bir prosedür çerçevesinde yapılmakta ve atık yönetimi hiyerarşisi olarak adlandırılmaktadır. Altı maddesi bulunan atık yönetimi hiyerarşisinde, asıl amaç gelecek nesillere yaşanabilir bir dünya bırakmaktır. Atık yönetimi hiyerarşisi öncelik sırasına göre önleme, azaltma, yeniden kullanma, geri dönüşüm, enerji geri kazanımı ve bertaraf başlıklarından oluşmaktadır ve Şekil 2.10'daki gibidir.



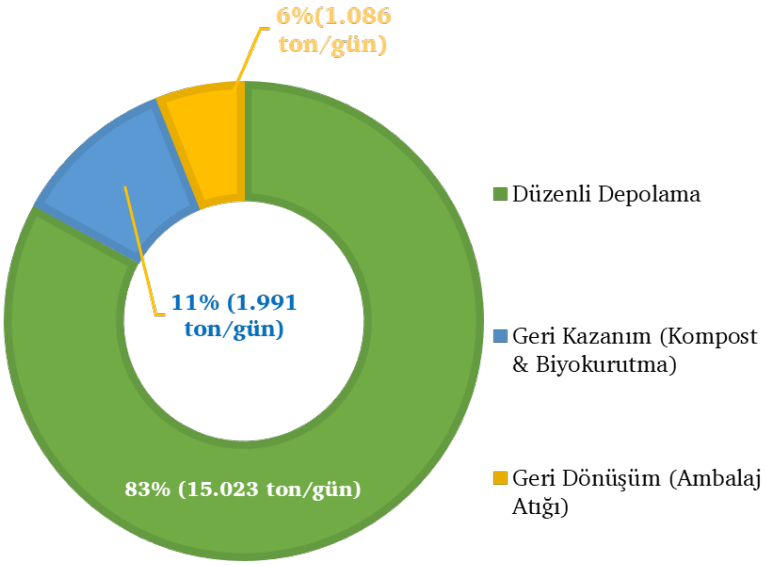
Şekil 2.10 Atık yönetimi hiyerarşisi

UAYP' da gösterilen ve 2014 yılı verilerine göre hazırlanmış Türkiye atık kompozisyonu Şekil 2.5'te gösterilmişti. Burada oluşan atıkların %87'sinin kentsel katı atık olduğu görülmektedir. Bu kentsel katı atıkların %6'sının ambalaj atığı geri kazanımı olarak, %5'inin kompost ve biyometanizasyon yoluyla geri kazanım olarak ve geri kalan %89'unun ise düzenli depolama yoluyla bertaraf edildiği raporlanmıştır (Şekil 2.11) (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2017).



Şekil 2.11 Türkiye'de 2014 yılında toplanan belediye atıklarının yönetimi

İstanbul genelindeki mevcut duruma bakıldığında ise 39 İlçe Belediyesi her gün kendi sorumluluk alanlarında bulunan sınırlardan topladıkları atıkları İBB' ye ait Katı Atık Aktarma İstasyonları' na taşırlar. 2019 yılında İstanbul' da 1 günde oluşan belediye atığı yaklaşık 18.100 tondur. Bu atıkların %6'sı geri dönüşüm yoluyla, %11'i geri kazanım yoluyla ve kalan %83'ü ise düzenli depolanarak bertaraf edilmektedir (Şekil 2.12) (İstanbul Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü, 2020).



Şekil 2.12 2019 yılında İstanbul'daki atıkların yönetimi

3
ORGANİK ATIK YÖNETİMİ

Bu bölümde kompostlaştırma, yakma, biyokurutma ve anaerobik çürütme gibi organik atık değerlendirme yöntemleri ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

3.1 Kompost

Kompostlama, organik maddelerin biyolojik olarak üretilen ısının bir sonucu olarak termofilik sıcaklıkların gelişmesine izin veren koşullar altında, stabil, patojenlerden ve bitki tohumlarından arındırılmış ve yararlı bir şekilde toprağa uygulanabilen bir nihai ürün üretmek için biyolojik olarak ayrıştırılması ve stabilize edilmesidir. Bu nedenle, kompostlaştırma bir atık stabilizasyon şeklidir, ancak termofilik sıcaklıklar üretmek için özel nem ve havalandırma koşulları gerektirir.

Kompostlama, organik substratların aerobik (oksijen (O_2) varlığında) ortamda ayrıştırılmasıdır. Biyolojik metabolizmanın ana ürünleri karbondioksit (CO_2), su (H_2O) ve ısıdır (Haug R. T., 2018).

Taze organik maddenin komposta dönüştürülmesi temel olarak üç nedenden dolayı gerçekleştirilir:

- Taze stabilize edilmemiş organik maddenin fitotoksisitesinin üstesinden gelmek;
- İnsanlara, hayvanlara ve bitkilere patojen olan ajanların (virüsler, bakteriler, mantarlar, parazitler) varlığını, ayrıca bir sağlık riski oluşturmayacak düzeye indirmek ve
- Bir organik gübre veya bir toprak düzenleyici üretmek, organik atıkları ve biyokütleyi geri dönüştürmek (Diaz ve diğ., 2011)

Organik kompost toprağa uygulandığında birçok faydaları mevcuttur. Birincisi, kompost, uygun toprak yapısı ve nem tutma kapasitesi için gerekli olan, toprak humusunun bakımı veya tedariki için bir organik madde kaynağı görevi

görmektedir. İkinci olarak, kompost ticari tarımda ve evle ilgili kullanımlarda mahsullerin büyümesini ve canlılığını arttırmaktadır (Haug R. T., 2018).

3.1.1 Kompostlama Sürecini Etkileyen Faktörler

Kompostlaştırma sürecini etkileyen birçok faktörün varlığı bilinmekle birlikte bunlardan en önemlileri C/N oranı, sıcaklık, pH seviyesi, havalandırma/karıştırma ve nem içeriği olarak sıralanabilir.

3.1.1.1 C/N Oranı

Toplam besin dengesinin en önemli etkilerinden biri, organik karbonun toplam nitrojene (C/N) oranıdır. Mikroorganizmalar, besin maddesi olarak karbon (C), azot (N), kükürt (S), fosfor (P), kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg), potasyum (K) ve diğer eser elementlerden faydalanırlar. Karbon (C), mikroorganizmaların büyümesinde ve enerji ihtiyacını karşılamada etkili olurken azot ise protein sentezinde kullanılır.

Başlangıç C/N oranının 20-35 olması hızlı ayrışmanın olması için önemli bir parametredir. Eğer C/N oranı 30'u geçerse, biyolojik aktivite yavaşlar ve kompostlama işleminin tamamlanabilmesi için daha çok süreye ihtiyaç duyulur. Eğer C/N oranı 25'in altında ise, amonyak açığa çıkar bu da mikroorganizmalara zarar verir ve koku oluşmasına yol açar. Bu nedenlerle, eğer atıkların C/N oranı oldukça yüksekse atığa azotlu maddeler eklenerek bu oran düşürülür, eğer C/N oranı oldukça düşükse karbonlu atıklar ilave edilir (T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, 2021).

3.1.1.2 Sıcaklık

Sıcaklık, kompostlaştırma sürecine etki eden önemli etmenlerdendir. Organik maddelerle beslenen mikroorganizmalar ısı açığa çıkarmaktadırlar. Ortamdaki ısının yükselmesi mikroorganizmaların aktivitesinin yüksek olduğunun bir göstergesidir ve aynı zamanda çıkan ısı patojen mikroorganizmaları öldürmeye yaramaktadır.

Her mikroorganizma kendisine uygun bir sıcaklıkta yaşar. Buna karşın 55°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kompostlaştırma sürecinin verimi önemli oranda düşer. Eğer materyaldeki sıcaklık 75°C veya 85°C'ye yükselirse, yüksek sıcaklık yüzünden

reaksiyon hızı azalacaktır. Sıcaklığı düşürmek için havalandırma oranını artırmak veya karıştırma işlemini daha sık yapmak gerekmektedir. Maksimum ayrışma için optimum sıcaklığın 40°C ila 50°C arasında olduğu bilinmektedir (T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, 2021).

3.1.1.3 pH Seviyesi

Her mikroorganizma grubunun yaşadığı belli bir pH aralığı vardır. Genel olarak bakteriler neredeyse nötr bir pH'ı tercih ederken, mantarlar oldukça asidik ortamlarda daha iyi gelişir. Kompostlaşma süresi sonunda pH 7.8-8.0 arasında dengelenmiş hale gelir. Başlangıçta CO_2 ve organik asitlerin oluşumu nedeniyle pH değeri yaklaşık 5.0-6.0 seviyesine düşerken, süreç ilerledikçe 8.0-8.5 seviyesine kadar ulaşır. Optimum pH aralığı 5,5 ile 8,0 arasındadır.

3.1.1.4 Havalandırma/Karıştırma

Başarılı bir kompostlaştırma işleminin temel etmenlerinden birisi ortamdaki oksijen varlığıdır. Organik atıkların ayrıştırılması sürecinde aerobik mikroorganizmalar için oksijen gerekmektedir. Mikroorganizmalar, büyümeleri için gereksinim duydukları enerjiyi elde etmek için karbonu okside ederler. Bu işlem sonucunda, O_2 tüketip CO_2 üretirler (Haug R. T., 2018).

Kompost yığınlarında, karıştırma işleminden çok kısa bir süre sonra yığının iç kısımlarındaki oksijen tükenmektedir. Bu durumdaki yığınlar çevrildiği zaman kötü kokular açığa çıkar. Aerobik mikroorganizmalar %5 oksijene kadar hayatiyetlerini devam ettirebilirler. Ancak optimum oksijen konsantrasyonunun %10'dan daha büyük olması dikkate alınır. Eğer oksijen veya hava kaynağı sınırlıysa kompostlama işlemi yavaş olarak gerçekleşir. Aerobik koşulları sağlamak için kütle içindeki ortalama CO_2 ve O_2 içeriği yaklaşık %20'dir. O_2 konsantrasyonu %15 ila %20 ve CO_2 %0,5 ila %5 arasında değişmektedir. Bu konsantrasyon değeri, mikroorganizmanın yaşamını riske etmeden devam ettirebileceği sınır değerdir (T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, 2021).

3.1.1.5 Nem İçeriği

Mikroorganizmaların metabolik işlemlerini devam ettirebilmeleri için neme ihtiyaçları vardır. Nem muhtevası genelde kompostlama ilerledikçe düştüğünden,

başlangıçtaki nem muhtevası %40'dan büyük olmalıdır. Normal olarak evsel katı atıkların kompostlaştırılmasında başlangıç malzemesindeki %60 nem içeriği olmalıdır (Diaz ve diğ., 2011)

3.1.1.6 Mikroorganizmalar

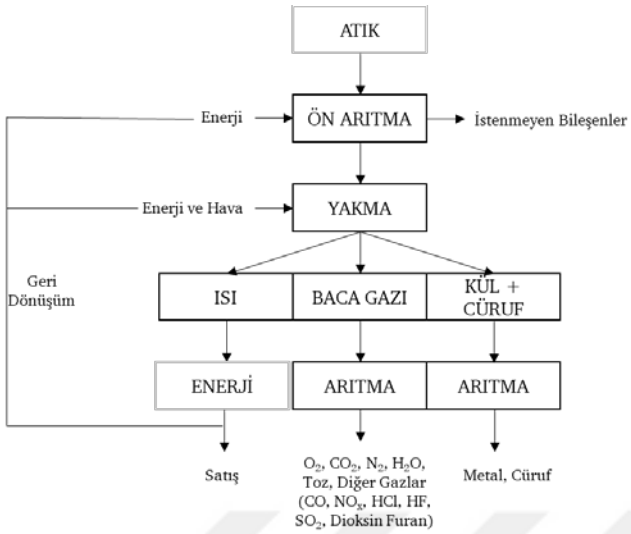
Kompostlaştırma işlemi, karışık organik atıklarda doğal olarak bulunan mikroorganizmalar tarafından gerçekleştirilir. Başlangıçta çoğunluğunu bakterilerin oluşturduğu mikroorganizmaların çoğalması sırasında ısı, CO_2 ve su buharı açığa çıkar. İlk aşamada mezofilik bakteriler yağları, proteinleri ve karbonhidratları ayrıştırırlar. Sıcaklık 40-50 °C'ye ulaştığında kompostlaştırmayı başlatan organizmaların hemen hemen hepsi ölür ve bunların yerini 70°C sıcaklığa kadar dayanabilen ve ısı üretebilen termofilik bakteriler alır. Kompostun 60-70°C sıcaklığa ulaşan kısmında, bir kaç sporun dışında temel olarak bütün patojenik organizmalar bir kaç saat içinde ölür. Termofilik bakteriler kendileri için mevcut besini tükettiklerinde ısı üretmeyi durdururlar ve kompost soğumaya başlar.

3.2 Yakma

Atıklara uygulanan termal bertaraf yöntemleri atıkların yüksek sıcaklıkta enerji ve diğer yan ürünlere dönüştürülmesidir. Burada temel amaç, atığın hacminin ve miktarının azaltılmasıdır. Termal işlemler sayesinde, katı atıkların depolanması için ihtiyaç duyulan alan azaltılırken, atık içerisinde bulunan ve işlem sonucu ortaya çıkan ısı kullanılarak enerji geri kazanımı sağlanır. Termal bertaraf yöntemlerinden olan doğrudan yakma yöntemi atıktan enerjiye dönüşümde en çok kullanılan teknolojidir.

Yakma sistemlerinde atıkların tamamen yanabilmesi için fazla miktarda oksijen sisteme verilmeli ve tam yanma sağlanmalıdır. Bu reaktörlerde yanma 900-1200°C sıcaklıklarda gerçekleşir ve atığın hacmi yaklaşık %80-90 oranında azaltılmış olur. Atıkların yakılması ile oluşan termal enerji buhar türbininden geçirilerek elektrik enerjisine dönüştürülür. Atıkların kabulünden yakma fırınlarına beslenmesi, yanmanın gerçekleşmesi, yanma sonucu çıkan gazın temizlenmesi ve filtrelenmesi ayrıca çıkan kül ve cürufun kontrolü ciddi bir teknik işletmeyi gerektirmektedir.

Yakma prosesinin şematik bir gösterimi Şekil 3.1'de verilmiştir (Öztürk ve diğ., 2015).



Şekil 3.1 Yakma prosesinin şematik gösterimi

Yakma teknolojisi seçiminde atığın fiziksel ve kimyasal özellikleri dikkate alınmaktadır. Enerji geri kazanımlı kütlesel yakma için kentsel atığın ortalama ısıl değeri 1.600 kcal/kg civarında olmalıdır. Ekonomik olarak zengin ülkelerde evsel atığın ısıl değeri 2.400 kcal/kg düzeyindedir.

Atığın organik madde içeriği ne kadar fazla ise yanmaya o derece elverişlidir. Bu şartı sağlayan başlıca atıklar evsel katı atık, ticari atık (alışveriş merkezleri, ofisler), endüstriyel atık, atıksu arıtma tesisi çamurları, tehlikeli atıklar ve organik atıklarla kirlenmiş toprak olarak sıralanabilir. Yakma; katı atıkları, arıtma çamurlarını, sıvı atıkları ve gazları ısıl proseslerle zararsız hale getirmek ve enerji geri kazanmak üzere kullanılabilmektedir (Öztürk ve diğ., 2015).

3.3 Biyokurutma

Biyolojik kurutma yönteminin amacı, atığın enerji içeriğinin mümkün olduğunca kullanılması suretiyle atıktan türetilmiş yakıt (ATY) üretmektir. Bu prosesin biyolojik bileşeninin temel amacı, atığın daha kolay ve verimli bir şekilde mekanik olarak ayrılmasını sağlamak için ısı ile nem giderimidir. Bu sistemde mekanik ayırma, biyolojik arıtmadan sonra gerçekleştirilir. Biyokurutma prosesinde önce atık parçalanarak, biyokurutma tankına alınır. Mikrobiyolojik faaliyet ile ısı üretimi için uygun şartları sağlamak amacıyla havanın atık içine iyice nüfuz etmesi amaçlanır. Söz konusu ısı, atık bünyesindeki suyun buharlaştırılması ve dolasıyla

atığın kurutulması için kullanılır. Ancak mikrobiyolojik faaliyet için de suya ihtiyaç duyulduğundan, atığın su muhtevası yaklaşık olarak %15-20 mertebesinde tutulmalıdır. Burada ilave kurutma, ısı değiştiriciden geçirilerek ön ısıtma uygulanmış hava beslemesi ile sağlanır. Hava akımının proseste geri devir yoluyla kirli hava miktarının azaltılması da sağlanır ve atıkların kurutulması ile karışımın kalorifik değeri arttırılmış olur. Son zamanlarda geliştirilen etkin otomatik ayırma teknolojileri sayesinde, geri dönüştürülebilir atık bileşeni daha kolay ayrıştırılabilmektedir. Yaygın olmasa da sadece fiziksel kurutmanın kullanıldığı tesis örnekleri de mevcuttur. Her iki proseste de arıtma amacı aynı olmakla birlikte, biyolojik kurutma prosesi için dışarıdan yakıt (petrol veya gaz) ilavesi gerekmektedir. Bu yüzden işletme maliyeti daha yüksek olmakta ve toplam prosesin enerji verimliliği düşmektedir. Söz konusu sistemin üstün yönü ise, kompakt olması sebebiyle alan ihtiyacının sınırlı oluşudur (Öztürk ve diğ., 2015).

3.4 Anaerobik Çürüme

3.4.1 Genel Proses Açıklaması

Organik maddenin anaerobik biyodegradasyonu, oksijen yokluğunda ve anaerobik mikroorganizmaların varlığında ilerler. Anaerobik çürütme (AÇ), çeşitli mikroorganizma grupları arasındaki bir dizi metabolik etkileşimin sonucudur. Hidroliz, asit üretimi ve metan oluşumu olamk üzere üç temel aşamada meydana gelir. İlk mikroorganizma grubu polimerik malzemeleri glikoz ve aminoasitler gibi monomerlere hidrolize eden enzimleri salgılar. Bunlar daha sonra ikinci grup, yani asit üreten bakteriler tarafından H_2 ve asetik aside dönüştürülür. Son olarak, üçüncü bakteri grubu, metan üreten bakteriler, H_2, CO_2 ve asetatları CH_4'a dönüştürür. Bu aşamalar aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. AÇ, 30 °C-65 °C arasındaki sıcaklıklarda tutulan büyük çürütücülerde (Şekil 3.2) gerçekleştirilmektedir (Verme, 2002).



Şekil 3.2 Örnek anaerobik çürütücü tankları

3.4.1.1 Hidroliz Aşaması

Kompleks organik maddelerin, fermantatif ve hidrolitik bakteri grupları tarafından daha basit yapıda çözünebilir uçucu organik maddelere parçalanmasına 'hidroliz' denmektedir. Hidroliz hızını etkileyen en önemli faktörler pH, sıcaklık ve çamur yaşıdır (Yıldız ve diğ., 2009).

Hidrolitik aktivite organik atıklarda önemlidir ve hız sınırlayıcı hale gelebilir. Bazı endüstriyel işlemler, hidrolizi arttırmak için kimyasal reaktifler kullanarak bu sınırlamanın üstesinden gelir. İlk adımı arttırmak için kimyasalların uygulanmasının daha kısa bir çürüme süresi ile sonuçlandığı ve daha yüksek metan verimi sağladığı bulunmuştur (Verma, 2002).

3.4.1.2 Asit Üretimi Aşaması

İkinci kısımda, asit oluşturucular olarak da bilinen asidojenik bakteriler, birinci aşama olan hidrolizin ürünlerini basit organik asitlere, karbon dioksite ve hidrojene dönüştürür. Üretilen ana asitler asetik asit (CH_3COOH), propiyonik asit (CH_3CH_2COOH), bütirik asit ($CH_3CH_2CH_2COOH$) ve etanoldür (C_2H_5OH). Bir asidojenez reaksiyonu Denklem 3.1'de gösterilmiştir (Verma, 2002):

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_2H_5OH + 2CO_2 \qquad (3.1)$$

3.4.1.3 Metan Oluşumu Aşaması

Anaerobik arıtmanın son aşamasında ise, diğer iki kademede oluşan ürünler metan oluşturan bakteriler tarafından metan gazına dönüştürülmektedir. Bu dönüşüm iki şekilde olmaktadır:

- Karbondioksit (CO_2) ve metan (CH_4) üretmek için asetik asit moleküllerinin bölünmesi,

- karbondioksitin (CO_2) hidrojenle indirgenmesi yoluyla.

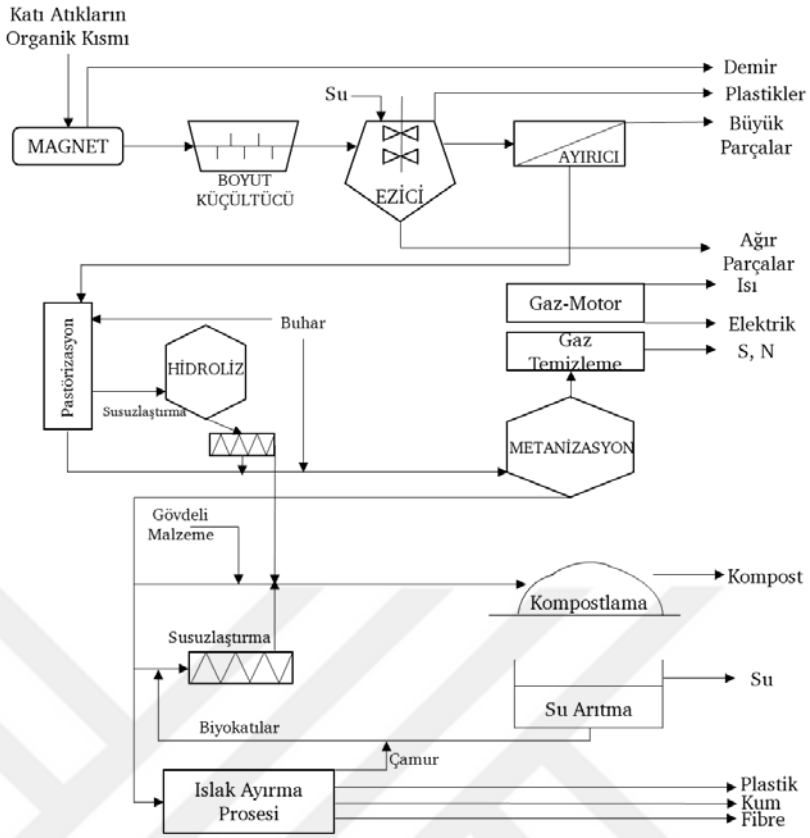
Metanojenik bakteriler arasında *methanobacterium*, *methanobacillus*, *methanococcus* ve *methanosarcina* bulunur. Metanojenler ayrıca asetat ve H_2 / CO_2 tüketicileri olarak iki gruba ayrılmaktadır. *Methanosarcina spp*. ve *methanothrix spp.* AÇ'de hem asetat hem de H_2 / CO_2 tüketicileri olan önemli bakteriler olarak kabul edilir. Metanojenez reaksiyonları Denklem 3.2, 3.3 ve 3.4' teki gibi ifade edilebilir:

$$CH_3COOH \rightarrow CH_4 + CO_2 \quad (3.2)$$

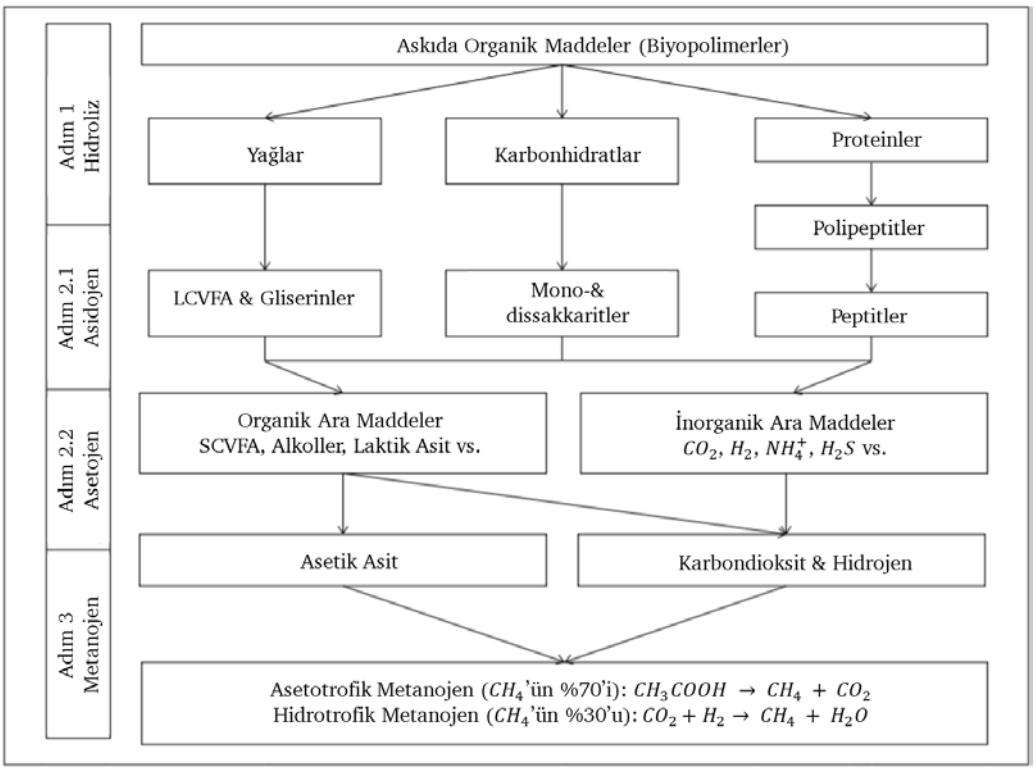
$$2C_2H_5OH + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2CH_3COOH \quad (3.3)$$

$$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O \quad (3.4)$$

Metan gazının standart sıcaklık ve basınç altında net ısıl değeri 35.800 kJ/m^3'tür. Anaerobik çürütücü gazı ortalama olarak yaklaşık %65 oranında metan içerdiğinden, çürütücü gazın ısıl değeri bu değerden daha düşüktür (yaklaşık olarak 22,400 kJ/m^3). Metan, propan ve bütandan oluşan doğalgaz ile karşılaştırıldığında ısıl değeri düşüktür. Biyogaz, kazanlar ve içten yanmalı motorlar için yakıt olarak kullanılabilir (Yıldız ve diğ., 2009). Hidroliz, asit üretimi ve metan üretimi aşamalarının gösterimi Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'teki gibidir.



Şekil 3.3 Katı atıkların anaerobik çürümesinde yaygın olarak kullanılan birim proses örnekleri (Vandevivere ve diğ., 2003)



Şekil 3.4 Anaerobik çürüme işleminin adımları (Madsen ve diğ., 2011)

3.4.2 Anaerobik Çürütücü Sistemleri

AÇ prosesleri, çürütücü reaktördeki bulamacın toplam katı (TS) içeriğine göre sınıflandırılabilir. Düşük katı sistemlerde (LS) %10'dan az toplam katı (TS), orta katılarda (MS) yaklaşık %15-20 arasında ve yüksek katı (HS) süreçlerinde %22 ile %40 arasında değişmektedir (Tchobanoglous ve diğ., 1993). AÇ prosesleri, kullanılan reaktör sayısı bazında, tek aşamalı ve çok aşamalı sistemler olarak kategorize edilebilir. Tek kademeli sistemlerde, anaerobik işlemin üç aşaması bir reaktörde meydana gelir ve zamanla ayrılır (yani, birbiri ardına bir aşama), çok kademeli sistemlerde ise asetojen ve metanojen aşamalarını ayıran iki veya daha fazla reaktör kullanır (Vandevivere ve diğ., 2003).

3.4.2.1 Tek Kademeli Sistemler

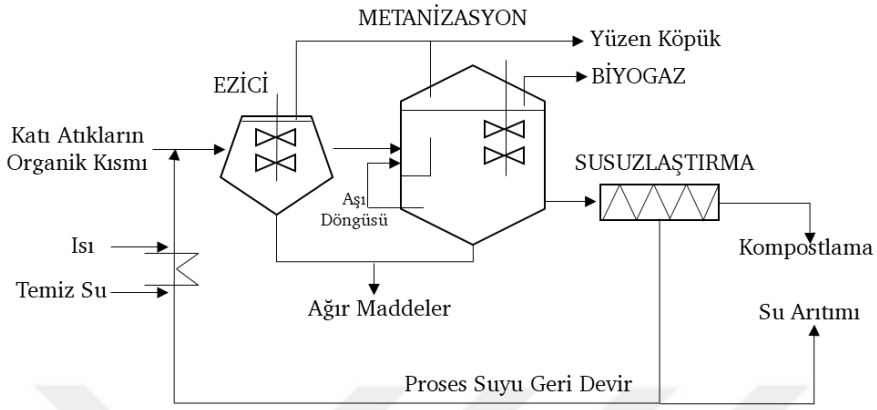
Organik katı atıkların oksijensiz ortamda çürütülmesi prosesi birçok biyokimyasal reaksiyondan oluşmaktadır. Bu reaksiyonların ilk aşamasında hidroliz ve asidifikasyon olayları gerçekleşirken, ikinci aşamasındaysa üretilen asetat, hidrojen ve karbondioksit metana dönüştürülmektedir. Tek kademeli sistemlerde bütün biyokimyasal reaksiyonlar tek bir reaktörün içerisinde gerçekleştirilirken, iki kademeli sistemlerde reaksiyonlar iki ayrı reaktörde gerçekleşmektedir (Dereli, 2006).

Kentsel katı atıkların organik kısmı ve biyo-atıkların anaerobik çürütülmesi için halihazırda Avrupa'da kullanılmakta olan tam ölçekli tesislerin yaklaşık %90'ı tek aşamalı sistemlerden oluşmaktadır ve bunlar 'ıslak' ve 'kuru' çalışma koşulları olarak iki alt gruba ayrılmıştır. Sanayiler, tek aşamalı sistemleri tercih etmektedirler çünkü daha basit tasarımlar daha az teknik başarısızlığa ve daha düşük yatırım maliyetlerine sahiptir. Tek kademeli sistemlerin biyolojik performansı, çoğu organik atık için, reaktörün iyi tasarlanmış ve çalışma koşullarının dikkatle seçilmiş olması koşuluyla, iki aşamalı sistemlerinki kadar yüksektir (Vandevivere ve diğ., 2003).

- **Tek Kademeli Islak Sistemler**

Atıkları sıralı gruplar halinde parçalamak, homojenleştirmek ve seyreltmek için pulper kullanılır. Bu amaçla, %10-15 toplam katı içeriğine ulaşmak için hem temiz hem de geri dönüştürülmüş proses suyu eklenir. Elde edilen bulamaç daha sonra

katıların dikey pervanelerle süspansiyon halinde tutulduğu büyük tam karışım reaktörlerinde çürütülür (Vandevivere ve diğ., 2003). Tek kademeli ıslak bir anaerobik çürütücü sistemine ait tipik bir tasarım Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Bu sistemin avantaj ve dezavantajları ise Tablo 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.5 Tek kademeli ıslak sistemlerin tipik tasarımı (Waasa Prosesi)

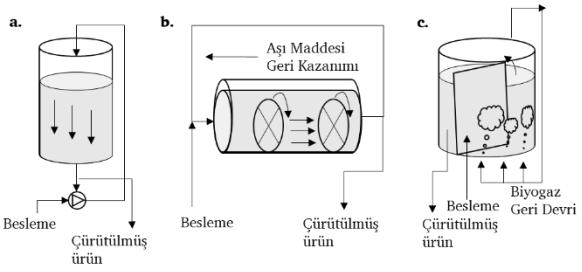
Tablo 3.1 Tek kademeli ıslak sistemlerin avantaj ve dezavantajları

Kriter	Avantajlar	Dezavantajlar
Teknik	Bilinen bir proses	Kısa devre, kumla aşınma, karmaşık ön arıtma
Biyolojik	İnhibitörlerin temiz su ile seyreltilmesi	İnhibitörler şok yüklerine karşı hassastır
Ekonomik& Çevresel	Çamurları işlemek için kullanılan ekipmanlar daha ucuzdur	Çok su kullanımı ve çok fazla enerji kullanımı

- **Tek Kademeli Kuru Sistemler**

Kuru sistemlerde, reaktör içindeki fermantasyon kütlesi, %20-40 toplam katı aralığında bir içerikte tutulur, böylece sadece çok kuru substratların (> %50 toplam katı) proses suyu ile seyreltilmesi gerekir (Oleszkiewicz ve Poggi-Varaldo, 1997). Atıkları reaktöre beslemeden önce gerekli olan tek ön işlem 40 mm'den büyük kaba safsızlıkların giderilmesidir. Parçalayıcıdan geçen taş ve cam gibi ağır malzemelerin, ıslak sistemlerde olduğu gibi atık akımından çıkarılması gerekmez. Bu, kuru sistemlerin ön işlemlerini ıslak muadillerine göre biraz daha basit hale getirir ve tipik olarak ağırlıkça %25 ağır madde içeren kentsel katı atıkların organik kısmının biyometanizasyonu için çok caziptir (Vandevivere ve diğ., 2003). Bu sistemin avantaj ve dezavantajları Tablo 3.2'de listelenmiştir. Tek kademeli

kuru sistemlerin endüstriyel ölçekteki katı atıkların yeterli şekilde karıştırılması için etkili olan üç tasarım ise Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Tek kademeli kuru sistemlerde kullanılan DRANCO (a), KOMPOGAS & BRV (b) ve VALORGA (c) tasarımları

Tablo 3.2 Tek kademeli kruu sistemlerin avantaj ve dezavantajları

Kriter	Avantajlar	Dezavantajlar
Teknik	Reaktörde hareketli parça yok, sağlam, kısa devre yok	Islak atıklar (<%20 toplam katı) tek başına arıtılamaz
Biyolojik	Yüksek biyokütle, ön arıtımda az uçucu katı kaybı	İnhibitörleri temiz suyla seyreltme olasılığı az
Ekonomik& Çevresel	Daha küçük reaktörler, Tam hijyen, Çok az su kullanımı, daha az ısı gereksinimi	Daha pahalı atık işleme ekipmanı

3.4.2.2 Çok Kademeli Sistemler

Çok kademeli sistemler, AÇ'nin farklı aşamaları için ayrı reaktörlere sahip olarak çürümeyi iyileştirmek ve böylece bu reaksiyonların her birini optimize etmek için esneklik sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Tipik olarak, birincisi hidroliz-asetojen ve ikincisi metanojen için iki reaktör kullanılır. İlk reaktörde, reaksiyon oranı selülozun hidroliz hızı ile sınırlıdır; ikincisinde ise mikrobiyal büyüme oranı ile sınırlıdır (Tablo 3.3) (Vandevivere ve diğ., 2003).

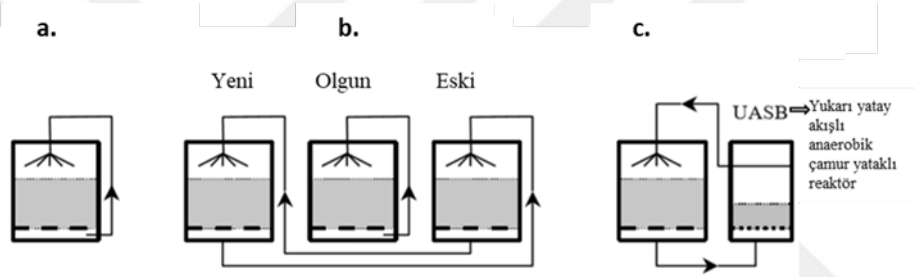
Tablo 3.3 Çok kademekli sistemlerin avantaj ve dezavantajları

Kriter	Avantajlar	Dezavantajlar
Teknik	Tasarım esnekliği	Karmaşık proses
Biyolojik	Mutfak atıkları ve C/N oranı <20 için güvenilir tasarım	Daha az biyogaz verimi (katılar metanojenize olmadığında)
Ekonomik & Çevresel	Kompostta daha az ağır metal	Yatırım maliyeti fazla

3.4.2.3 Kesikli Sistemler

Kesikli reaktörlerde hammadde sisteme yüklenir, reaksiyona tabi tutulur ve daha sonra boşaltılır ve yeni grup yüklenir. Yığın sistemleri kap içi depolama alanları olarak görünebilir, ancak aslında iki nedenden dolayı depolama alanlarına göre çok daha yüksek reaksiyon oranları ve %50 ila %100 daha yüksek biyogaz verimi sağlar. Birincisi, sızıntı sularının sürekli yeniden sirkülasyonu ve ikincisi, depolama alanlarından daha yüksek sıcaklıklarda işletilmesidir. Üç tip kesikli reaktör sistemi vardır (Şekil 3.7);

- tek kademeli sistem,
- ardışık kesikli sistem ve
- yukarı yatay akışlı anaerobik çamur yataklı (UASB) sistem.



Şekil 3.7 Tek kademeli (a), ardışık kesikli (b) ve karma kesikli (c) sistemlerde sızıntı suyu geri devir modellerinin konfigürasyonu

Tek kademeli sistem, sızıntı suyunun aynı reaktörün üst kısmına geri devrettirilmesi ile işletilir. Ardışık kesikli sistemler iki veya daha fazla reaktör içerir. Yüksek düzeyde organik asitler içeren birinci reaktörden gelen sızıntı suyu, metanojenik faaliyetin meydana geldiği ikinci reaktöre yeniden geri devrettirilir. Çok az veya hiç asit içermeyen metanojenik reaktörün sızıntısı ilk reaktöre yeniden geri devrettirilir. Üçüncü tip kesikli reaktör sistemi, iki reaktörlü çok aşamalı prosese çok benzeyen karma seri-UASB prosesidir. İlk reaktör basit kesikli reaktördür, ancak ikinci metanojenik reaktör bir yukarı yatay akışlı anaerobik çamur yataklı reaktördür (Verma, 2002). Bu kesikli sistemlerin avantaj ve dezavantajları Tablo 3.4'te özetlenmiştir.

Tablo 3.4 Kesikli sistemlerin avantaj ve dezavantajları

Kriter	Avantajlar	Dezavantajlar
Teknik	Basit, sağlam, low-tech	Tıkanma, patlama riski
Biyolojik	Güvenilir proses	Düşük biyogaz verimi
Ekonomik& Çevresel	Ucuz, az su kullanımı	Çok büyük arazi alanı

3.4.3 Anaerobik Çürütme Sürecini Etkileyen Parametreler

Evsel organik atığın anaerobik olarak çürütülmesi, bir dizi farklı bozunma adımını içeren karmaşık bir süreçtir. Bu sürece katılan mikroorganizmalar, her bir bozunma aşamasına özeldir ve bu nedenle farklı çevresel gereksinimlere sahiptir. Bu kısımda anaerobik çürüme sürecini etkileyen parametreler açıklanacaktır.

3.4.3.1 Atık Bileşimi ve Ön İşlem Süreci

Atık bileşimi, anaerobik çürütmenin biyo-kinetik optimizasyonu için temel bir faktördür. Biyolojik olarak bozunabilir organik atıklar; mutfak artıkları, yiyecek artıkları ve çim ve ağaç atıklarından oluşmaktadır. Yanıcı kısım odun, kâğıt ve karton içeren yavaş yavaş bozulan lignoselülozik organik maddeyi içermektedir. Biyobozunur organik atıklar çürüme aktivitesini arttırmak ve optimize etmek için ön işleme tabi tutulur. Genellikle, ön arıtma yönteminin etkinliği, evsel katı atığın organik kısmının (EKAOK) biyolojik olarak parçalanabilirlik özelliklerine bağlıdır. Bununla birlikte, öngörülen ön arıtma yaklaşımının seçilmesinde, süreç etkinliği, ekonomikliğin uygulanabilirliği ve çevreye yönelik etkiler temelinde performansın dikkate alınması gerekmektedir (Jain ve diğ., 2015).

3.4.3.2 pH Seviyesi

pH değeri, organik maddenin alkalinitesini veya asitliğini kategorize eden temel bir faktördür. Asidojenik ve metanojenik bakterilerin aktivitesinin stabilitesi, pH'daki değişikliklerden doğrudan etkilenir. Anaerobik bakteriler, özellikle metanojenler, çürütücü içindeki asit konsantrasyonuna duyarlıdır ve büyümeleri asidik koşullar tarafından engellenebilir. Asidojenez ve metanojenik aşamalar için optimum pH, sırasıyla 5,5 ila 6,5 ve 6,5 ila 8,2 arasındadır. Genel olarak, AÇ için optimum pH değerinin 5,5 ila 8,5 arasında olduğu belirlenmiştir (RISE-AT, 1998).

3.4.3.3 Sıcaklık

Etkin bir AÇ süreci sıcaklığın optimum seviyede olmasına önemli ölçüde bağlıdır. sıcaklığın mikrobiyal topluluk, proses kinetiği ve stabilite ve metan verimi üzerinde önemli etkileri olduğu bildirilmiştir Anaerobik mikroorganizmaların çürütme işlemi için sıcaklıkları, psikrofilik (10–30 ◦C), mezofilik (30–40 ◦C) veya termofilik (50–60 ◦C) koşullarda olabilmektedir. Mezofilik sıcaklık, çürüme sürecindeki mikrobiyal aktivitenin stabilitesi ve çeşitliliği nedeniyle AÇ için yaygın olarak uygulanan sıcaklık koşuludur. Genellikle, evsel katı atığın organik kısmının anaerobik çürütülmesi termofilik ve mezofilik koşullarda uygulanır (Jain ve diğ., 2015). İşlem sırasında daha düşük sıcaklıkların mikrobiyal büyümeyi, substrat kullanım oranlarını ve biyogaz üretimini azalttığı bilinmektedir. Cristancho ve Arellano (2006), 18 günlük çürütme periyodunda en iyi işletme sıcaklığının 35 °C olduğunu, 35–37 °C arasındaki bir sıcaklık aralığının metan üretimi için uygun bir sıcaklık aralığı olduğunu belirtmişlerdir (Cristancho ve Arellano, 2006). Briski ve diğerleri (2007), biyodegradasyon için sıcaklığın 65 °C'nin altında olması gerektiğini çünkü 65 °C'nin üzerinde enzimlerin denatürasyonunun meydana geldiğini bildirmiştir (Briski ve diğ., 2007).

3.4.3.4 Karbon/Azot Oranı (C/N)

Organik materyallerde bulunan karbon ve azot miktarı arasındaki ilişki C/N oranı ile temsil edilir. Karbonun nitrojene oranı, organik materyallerde bulunan karbon ve nitrojen miktarı arasındaki ilişkiyi belirtir ve etkili bir AÇ prosesi için optimum bir C/N oranı gereklidir. Karbon ve azot, enerji ve yeni hücre yapısının gelişimi için temel kaynaklardır. Beslenme ve C/N oranlarının iyileştirilmesi için organik karışımların birlikte çürütülmesi iyi bir seçenektir (Cuetos ve diğ., 2008). Genel olarak, anaerobik çürüme süreci için optimum C/N oranı 20–35 aralığındadır (Jain ve diğ., 2015). Yüksek C/N oranı, metanojenler tarafından hızlı nitrojen tüketiminin bir göstergesidir ve daha düşük gaz üretimi ile sonuçlanır.

3.4.3.5 Organik Yükleme Oranı (OLR)

Organik yükleme oranı (OLR), anaerobik çürüme sisteminin biyolojik dönüşüm kapasitesinin bir ölçüsüdür. OLR, sürekli sistemlerde özellikle önemli bir kontrol parametresidir (Verma, 2002). Organiklerin çürütülmesinde, OLR 1,2 ila 12 kg VS/m^3/gün veya 2,2–33,7 kg KOİ/m^3/gün arasında değişir. Bununla birlikte,

organik yükleme oranı, anaerobik çürüme işleminde substratların özelliklerine, sıcaklık durumuna ve kalma süresine bağlı olarak değişmektedir. Çok düşük OLR, mikroorganizmaların yetersiz beslenmesine neden olabilir ve anaerobik çürümeyi olumsuz etkiler (Jain ve diğ., 2015). Anaerobik çürüme sistemleri düşük katı madde (%10), orta katı madde (~ %15-20) ve yüksek katı madde (%22-40) içeriklerinde işletilebilmektedir (Westergard ve Teir, 1999).

3.4.3.6 Tutulma (veya Kalma) Süresi (HRT)

Tutulma Süresi (HRT), biyogaz üretimi için substratların çürütücü içinde tutulma süresi olarak tanımlanmaktadır. Süre, hammadde türlerine ve çürütücü sıcaklığına bağlıdır. Genel olarak yüksek oranda karbonhidrat, selüloz, protein, lipid ve yağ bileşikleri karışımı içeren EKAOK, yüksek tutulma süresi gerektirir. Bir çürütücüde, EKAOK çürütülmesi için optimum HRT, sıcaklığa ve çürütücü durumuna (tek veya çok kademeli reaktör) bağlı olarak 15-20 gün aralığındadır (Jain ve diğ., 2015). Mezofilik çürütücüde arıtılan atıkların bekletme süresi 10 ila 40 gün arasındadır. Termofilik aralıkta çalışan çürütücülerde daha düşük bekletme süreleri gereklidir. Termofilik aralıkta çalışan yüksek katı madde reaktöründe bekletme süresi 14 gündür.

3.4.4 Biyogaz Bileşimi

Anaerobik çürüme sırasında elde edilen gaz, metan, karbondioksit, bazı inert gazlar ve kükürt bileşiklerinden oluşur (Tablo 3.5) (RISE-AT, 1998).

Tablo 3.5 Tipik biyogaz özellikleri

İçerik	Miktarı
CH_4	Hacimce %55-70
CO_2	Hacimce %30-45
H_2S	Hacimce 200-4000 ppm
Enerji içeriği	20-25 MJ/standart m^3
Ton KKA başına CH_4 enerjisi	167-373 MJ/ton KKA

4
ÇÜRÜTÜCÜ SIVILARININ YÖNETİMİ

Anaerobik çürüme, mikroorganizmalar topluluğu tarafından gerçekleştirilen ve hidroliz, asidojenez, asetojenez ve metanojenez aşamalarından meydana gelen organik maddenin işlenmesini ve stabilize edilmesini içeren biyolojik bir süreçtir. Süreçteki O_2 eksikliği, mikroorganizmaların organik maddeyi parçalayarak çamur (anaerobik çürütücü çıkış atıksuyu, anaerobik çürütme maddesi) ve biyogaz üretilmesini sağlar.

Anaerobik çürümede evsel katı atığın organik kısmının ayrışması aynı zamanda hem katı hem de sıvı formda büyük miktarlarda anaerobik çürüme maddesi üretimine sebep olmaktadır. Üretilen çürütücü sıvısı, yüksek besin konsantrasyonu ve arazi/sucul yaşam kirliliği sorunu nedeniyle sınırlı bir uygulamaya sahiptir. Bu bağlamda, anaerobik çürütme ürününün geri kazanımı ve arıtma sonrası sisteme entegresi önem arz etmektedir. Susuzlaştırma işlemi sonrası ayrılan sıvı çürütme ürünü, yüksek konsantrasyonlu nitrojen ve potasyum bileşikleri içermesi sebebiyle potansiyel olarak toprak düzenleyici veya yeşil gübre olarak kullanılabilmektedir.

Membran filtrasyon yöntemi, basit ve düşük maliyetli işlem nedeniyle sıvı çürüme ürünü için besin geri kazanımında kullanılan birincil yaklaşımdır. Bununla birlikte, membran geri kazanım verimliliği, membran arıtma seçiciliğinin (örn. mikrofiltrasyon, ultrafiltrasyon, nanofiltrasyon, vb.) geçirgenliğine bağlıdır. Amonyak sıyırma yöntemi, basit işlem ve az çamur birikimi nedeniyle çürütücü sıvılarında amonyak giderimi için en uygun yöntemdir. Prosesten üretilen amonyum sülfat, gübre olarak kullanılabilir. Öte yandan, çürütücü sıvısından fosfat geri kazanımı, kimyasal çökeltme ve geliştirilmiş biyolojik fosfat giderme (EBPR) işlemi yoluyla etkin bir şekilde yapılır (Jain ve diğ., 2015). Bu bölümde çürütücü sıvılarının özellikleri, çürütücü sıvılarıyla ilgili standart ve yönetmelikler, çürütücü sıvılarının değerlendirme ve arıtma yöntemleri incelenecektir.

4.1 Anaerobik Çürüme Maddesi Özellikleri

Anaerobik çürütme maddesi (AÇM), organik madde ve mineraller açısından zengin, yarı stabilize edilmiş bir materyaldir. Çürütme yönetimi sırasında, bu atık akışı genellikle sahada bir katı-sıvı ayırma ünitesi kullanılarak katı ve sıvı fraksiyonlara ayrılır.

Avrupa Atık Kataloğu' nda (EWC), çürütme ile ilgili iki kod bulunmaktadır:

- "19 06 03 Belediye atıklarının anaerobik arıtımından kaynaklanan çürütücü sıvıları" ve
- "19 06 04 Belediye atıklarının anaerobik arıtımından kaynaklanan posalar (katı AÇM)" (European Waste Catalogue, 2021).

Evsel katı atığın organik kısmının (EKAOK) çürütülmesi sonucu açığa çıkan sıvının, Atık Çerçeve Direktifi (WFD) Madde 6'ya göre atık olarak daha fazla işlenmesi gerekmektedir (European Union, 2018).

Bu maddeye göre, belirli atıkların bir tür geri kazanım sürecinden geçtiklerinde atık olmaktan çıkacağını belirtir. Son zamanlarda, atık sonu kriteri, AÇM' nin belirli gereksinimler altında bir ürün olarak kullanılmasına izin vermektedir. Bu gereklilikler arasında ürün kalitesi, arıtma süreçleri ve teknikleri, kalite güvence prosedürleri vb. bulunur (Peng ve Pivato, 2019).

Evsel katı atığın organik kısmının anaerobik çürütülmesi, hammadde veya substratın özelliklerine, mikrobiyal topluluğa, işletme koşullarına, anaerobik çürütme sisteminin konfigürasyonuna bağlıdır. Anaerobik çürüme maddesinin nem içeriği, ıslak veya kuru anaerobik çürütme süreci arasındaki seçimden etkilenir. Örneğin, evsel katı atığın organik kısmı kuru bir anaerobik çürütme sürecinden geçtiğinde, %30 ila %40 katı içerikli bir AÇM üretilir (Kim ve Oh, 2011). Bu nedenle, kuru bir anaerobik çürütme işleminden elde edilen AÇM genellikle katı-sıvı ayırma işlemi gerektirmez. Uygulanan anaerobik çürütme süreci verimli olmadığında ve hammaddeden yüksek miktarlarda organik madde çürütülmeden kaldığında bile, anaerobik çürüme maddesi yine de toprağın fiziksel özelliklerini geliştirmeye yardımcı olabilir. Evsel katı atığın organik kısmının

anerobik çürütülmesinden üretilen anaerobik çürüme maddesinin özellikleri Tablo 4.1'de sunulmuştur.

Tablo 4.1 Evsel katı atığın organik kısmından üretilen anaerobik çürüme maddesinin özellikleri (Logan ve Visvanathan, 2019)

AÇM Türü	pH	Toplam Katı (%)	Uçucu Katı (%)	Toplam Kjeldahl Azotu (%)	N-NH_3 (g/L)	Karbon/Azot (C/N)	Kimyasal Oksijen İhtiyacı (g/gVS)
Karışık	8,30	0,72-51,2	62,1	2,79-14,0	1,7-7,5	1,3-29,8	1,62
Katı	8,80	7,23-94,78	68,0-71,0	-	-	12,1-20,9	-
Sıvı	8,34-8,80	2,0-19,20	66,4	-	3,84	2,7	-

Genel olarak AÇM; nitrojen, fosfor ve potasyum açısından zengindir. Katı-sıvı ayrımından sonra, sıvı kısım yüksek nitrojen içerirken katı kısım yüksek fosfor içerir.

AÇM' nin pH değeri,

- Amonyum karbonat [$(NH_4)_2CO_3$] oluşumu ve karbondioksitin (CO_2) dönüşümü,
- İşlem sırasında uçucu yağ asidinin azalması,
- Ca^{2+}, K^+ gibi bazik katyonların konsantrasyonu veya hammaddedeki sülfat (SO_4^{2-}) gibi çok değerlikli iyonların azaltılması şekliyle arttırılabilir.

Azot, çürütücüye amonyum (NH_4^+) veya organik nitrojen (N_{org}) olmak üzere iki biçimde girer. Amonyum çürüme işlemi sırasında yok edilmediğinden, bunun yerine protein bozunması sırasında organik nitrojen amonyuma dönüştürüldüğünden, çürütme atığındaki amonyum seviyesi beslenen substrattan daha yüksektir. Anaerobik çürüme dışındaki arıtma yöntemlerinde buharlaşma yoluyla azot kaybedilebilir. Çürütücü atıkları gübre olarak sahada uygulandığında, mikroorganizmalar amonyağı (NH_3) nitrite (NO_2^-) dönüştürebilir ve bu daha sonra bitkiler tarafından en kolay şekilde alınan nitrojen formu olan nitrata (NO_3^-) dönüştürülür. Anaerobik çürümeden sonra, çözünür amonyak konsantrasyonu, besleme stoğunda bulunan proteinin bozulmasıyla artma eğilimindedir. AÇM' nin amonyak içeriği, toplam nitrojen içeriğinin yaklaşık %60 ila %80'ini oluşturur (Makádi ve diğ., 2012). Fosfor ve potasyum çürütücüdeki

mikroorganizmalar tarafından tüketilmez. Bununla birlikte, bazı fosforlar, çürütücüde ortofosfata [PO_4^{3-}] (çözünür bir form) dönüştürülebilir (Topper ve diğ., 2017). AÇM' nin katı-sıvı ayrımından sonra, besinler katı ve sıvı fraksiyonlar arasında dağıtılır. Sıvı AÇM' nin toplam amonyum azotunun (NH_4^+-N) %70 ila %80' ini içerdiği ve kalan %20 ila %30 amonyum azotunun katı fraksiyonda dağıldığı tahmin edilmektedir. Bununla birlikte, toplam fosforun %55 ila %65' i ayrıldıktan sonra katı fraksiyonda kalırken, kalan toplam fosfor (%35 ila %45) sıvı fraksiyonda kalır (Peng ve Pivato, 2019). AÇM' deki karbon (C) içeriği miktarı düşük organik içerikli topraklarda önemli bir katkı maddesi ve mikroorganizmalar için bir enerji kaynağıdır. Ayrıca karbonun bozunmayan kısmı topraktaki organik maddeyi stabilize edecektir.

4.2 Anaerobik Çürüme Maddesi ile İlgili Standart ve Yönetmelikler

Tüm AÇM formları (karışık, sıvı ve katı), ilgili düzenleyici standartlardaki şartları karşıladığında ve bir ürün olarak nitelendirilebildiğinde nihai bertaraf hedefi olarak arazide uygulanabilir. Bazı ülkelerin kendi AÇM kalite standartları vardır. Örneğin;

- Almanya' da RAL GZ245 ve RAL GZ246 (Siebert, 2008)
- Avusturya' da Gübre Yönetmeliği-2004 (Stürmer ve diğ., 2020),
- Birleşik Krallık' ta PAS 110: 2010 (British Standard Institution, 2010),
- Fransa' da organik değişiklikler için NFU 44-051 standartları (Afnor, 2006),
- İsveç' te SPCR 120 (Sverige, 2013),
- İtalya' da Yasama Kararı 217/06 (Dlgs217/06, G. U., 2006),
- Slovenya' da Biyolojik Olarak Parçalanabilen Atıkların Geri Kazanılması ve Kompost / AÇM Kullanımına İlişkin Kararname (Official Gazette of the Republic of Slovenia, 2013)
- Yunanistan' da Atık Yönetmeliği (Gazette of the Hellenic Republic, 2014) ve
- Türkiye'de Mekanik Ayırma, Biyokurutma ve Biyometanizasyon Tesisleri ile Fermente Ürün Yönetimi Tebliği (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2015) ile

- Tarımda Kullanılan Organik, Mineral ve Mikrobiyal Kaynaklı Gübrelere Dair Yönetmelik (T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, 2018)

Çürütücüden çıkan ürünün kalitesini etkileyen belki de en önemli değişken hammaddedir. Yüksek kaliteli bir hammadde ile başlamak kaliteli bir çürüme ürünü elde edilmesini sağlar. Anaerobik çürüme maddesi için temel kalite parametreleri hijyen, patojenler, ağır metaller, organik kirleticiler, inorganik kirleticiler, stabilite, katkı maddeleri ve kimyasallar ile hammadde kaynakları olarak gruplandırılmaktadır. Hijyen kriteri pastörizasyon, sterilizasyon ve koku giderme işlemlerini içerirken organik kirleticilere örnek olarak PAH (polisiklik aromatik hidrokarbon) giderme, dioksin ve furan giderme, organik halojen giderimi işlemleri verilebilir. Temel kalite parametreleri; besin içeriği, kuru madde ve organik kuru madde içeriği, homojenlik, pH, saflık (cam, metal, plastik ve taş gibi inorganik safsızlıklardan arındırılmış), sterilize edilmiş ve toprak organizmaları ile çevre açısından güvenlilik, biyolojik durum (patojenik organizmalar) ve kimyasal durum (organik ve inorganik kirleticiler) olarak da sıralanabilir. Tablo 4.2'de kaliteli AÇM' lerin üretimi ve kullanımı için belirlenmiş kriterleri ve özellikleri sunulmuştur. AB'de, AÇM' nin Avrupa "Atık Sonu" kriterlerine uymasını sağlamak için bu özelliklere uygunluk yeterlidir ve daha fazla atık yönetimi kontrolü olmadan kullanılabilir (Aso, 2020).

Tablo 4.2 AÇM için kalite kriterleri (Aso, 2020) (British Standard Institution, 2010) (Sverige, 2013) (Siebert, 2008) (Saveyn ve Eder, 2014)

Kriter	Süreç/Parametre	Gerekenler
Hijyen	70 ◦C'de pastörizasyon	1 saat
	133 ◦C'de sterilizasyon	20 dakika
	Ot tohumları ve filizlenen bitki parçaları	≤ 2 L
	Koku	Rahatsız edici kokular içermez
Patojenler	*E. coli*	≤1000 CFU/g taze madde
	Salmonella spp.	25 g taze maddede bulunmaz
Ağır Metaller	Kadmiyum (Cd)	0,8 – 20 mg/kg DM
	Krom (Cr)	75-1000 mg/kg DM
	Bakır (Cu)	75-1000 mg/kg DM
	Kurşun (Pb)	80-900 mg/kg DM

Tablo 4.2 AÇM için kalite kriterleri (Aso, 2020) (British Standard Institution, 2010) (Sverige, 2013) (Siebert, 2008) (Saveyn ve Eder, 2014) devamı

Kriter	Süreç/Parametre	Gerekenler
Organik Kirleticiler	Polisiklik Aromatik Hidrokarbonlar (PAH)	3-6 mg/kg DM
	Dioksin ve Furanlar	20 ng TE/kg
	Klorlu pestisitler	0,5 mg/kg ürün
	Poliklorlu bifeniller	0,2 mg/kg DM
	Emilebilir organik halojenler	500 mg/kg DM
	Lineer alkilbenzen sülfonatlar	1300 mg/kg DM
	Nanilfenol ve nonilfenoletoksilatlar	10 mg/kg DM
	DEPH: Di (2-etilheksil) ftalat	50 mg/kg DM
İnorganik Kirleticiler	2 mm' den büyük ve taş olmayan safsızlıklar (cam, metal, plastik vb.)	0,5 % m/m DM
	5 mm' den büyük taşlar	8 % m/m DM
Stabilite	Uçucu yağ asitleri (UYA)	0,43 g COD/g VS
	Kalan biyogaz potansiyeli	0,25 l/g VS
	Solunum hızı	16 mg CO_2 g VS^{-1} day^{-1}
Katkı Maddeleri ve Kimyasallar	Kireç, Demir Klorür, Demir Oksit, Bentonit [(Na,Ca)(Al,Mg)6(Si_4O_{10})3(OH)6.n H_2O], Diatomlu Toprak	
Hammadde kaynakları	Tarım, hayvansal yan ürünler, gıda endüstrisi, orman, parklar, bahçeler, seralar, haneler, mutfaklar, restoranlar vb.	

Türkiye'de fermente ürünlerin kullanımı hakkında bir adet yönetmelik ve bir adet tebliğ bulunmaktadır. Bunlardan ilki 2015 yılında T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yayınlanmış olan Mekanik Ayırma, Biyokurutma ve Biyometanizasyon Tesisleri ile Fermente Ürün Yönetimi Tebliği'dir. Diğeri ise bu ürünlerin tarımda kullanımına yönelik olarak 2018 yılında T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı tarafından yayınlanmış olan Tarımda Kullanılan Organik,

Mineral ve Mikrobiyal Kaynaklı Gübrelere Dair Yönetmeliğidir. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın yayınlamış olduğu Tebliğ'e ait çürütücü sıvılarının kalite parametreleri Tablo 4.3'de gösterilmektedir.

Tablo 4.3 Sıvı fermente ürün kalite parametreleri (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2018)

Parametre	**Sınır Düzeyi**	
Organik Madde İçeriği	Kuru madde kütle bazında > %30	
Kararlılık	Aşağıdaki üç kararlılık kriterindne en az birini karşılar:	
	< 50 mmol O2/kg organik madde/saat respirometrik indeksi	
	<1500 mg/l toplam asetik asit eşdeğeri organik asit	
	<1500 mg/l toplam asetik asit eşdeğeri organik asit	
Patojenler	25 g numunede Salmonella spp. Bulunmaması	
	E.coli 1000 CFU/g taze fermente ürün	
Ot Tohumları & Bitkilerin Üremesini Sağlayan Yapı	2 Canlı ot tohumu/1 Lt fermente ürün	
Yabancı Maddeler	Yabancı Madde (Cam, metal, plastik ve benzeri biyobozunur olmayan) <% 0.5 kuru madde bazında	
Ağıt Metaller ve Kalıcı Organik Bileşikler (kuru ağırlık bazında mg/kg)	Cd 1.5 Cr 100 Cu 200 Hg 1 Ni 50 Pb 120 Zn 600	
Hijyen Değeri	Kesintisiz olarak 55 C'de 2 hafta veya, 60 C'de 1 hafta veya, 65 C'de 5 gün veya, 70 C'de 1 saat, işlem görmüş olacaktır.	
	Patojenler	**Sınır Düzeyi**
	Toplam Bakteri	$1x10^3$ kob/g veya kob/ml
	Enterobactericca grubu bakteriler	< 3 CFU/ml
	Mycobacterium spp.	Yok (25 g veya ml)
	Toplam maya ve küf	$1<10^4$ kob/gr-ml
	Salmonella spp.	Yok (25 g veya ml)
	Staphylococcus aureus	Yok (25 g veya ml)
	Bacillus cereus	Yok (25 g veya ml)
	Bacillus anthracis	Yok (25 g veya ml)
	Clostridium spp.	< 2 kob/g veya kob/ml
	Clostridium perfiringens	Yok
	Listeria spp	Yok
	Staphylococcal Enterotoksin	Yok
	E.coli	Yok
İz Elementler	Parametre	ppm (mg/kg kuru madde)
	Arsenik (As)	20

Tablo 4.3 Sıvı fermente ürün kalite parametreleri (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2018) devamı

Nem İçeriği	< %30
Karbon/Azot Oranı (C/N)	11232
Organik Madde (kuru madde içerisinde)	> %35
Mineral İyonlar Halindeki Tuzlar	< 10 dS/cm
Biyobozunur Olmayan Yabancı Madde İçeriği (kuru ağırlık olarak)	< %2
Yabani Ot Değeri	< 5 adet/lt
10 mm'lik elekten ürünün %90'ı geçecektir.	
Plastik madde ya da diğer mevcut muhtmelen geri dönüşümü olmayan madde parçacıklarının büyüklüğü 10 mm'yi geçmeyecektir.	

Yukarıdaki tablodaki değerler göz önüne alınarak eğer çürütücü sıvısının gübre olarak kullanılması isteniyorsa o halde Tarım ve Orman Bakanlığı'nın yayınladığı Yönetmelik'teki sınır değerler göz önüne alınmalıdır. Çürütücüden çıkacak olan ürünün sıvı kısmının organik gübre olarak tarımda kullanılabilmesi açısından bu yönetmelik önem arz etmektedir. Bu yönetmelikteki sınır değerleri karşılayan sıvı gübreler tarımda kullanılabilir. Organik gübrelerle ilgili yönetmelikte bulunan sınırlamalar Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4 Organik gübrelerle ilgili sınırlamalar (T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, 2018)

No	**Ürünün İsmi**	**Organik Ürünün Elde Ediliş Şekli**	**Ürünün Hammadde Muhtevası, Miktarı ile Bünyesinde Bulunması Gereken Bitki Besin Maddesi İçeriği ve Diğer Kriterler**
1	**Sıvı Organik Gübre**	Bitkisel ve/veya hayvansal kaynaklı materyallerin veya gübrelerin fiziksel ve/veya kimyasal ve/veya biyolojik işleme sonucu elde edilen çözelti ya da süspansiyon haldeki ürün	– Organik madde en az : %15 – Toplam azot – Toplam fosfor pentaoksit (P_2O_5) – Suda çözünür potasyum oksit (K_2O) – Üründe kullanılan hammaddeler proses de belirtilecektir.

Tablo 4.4 Organik gübrelerle ilgili sınırlamalar (T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, 2018) devamı

2	**Aminoasit İçeren Sıvı Organik Gübre**	Bitkisel ve/veya hayvansal kaynaklı materyallerin veya gübrelerin fiziksel ve/veya kimyasal ve/veya biyolojik işleme sonucu elde edilen çözelti ya da süspansiyon haldeki ürün (Hayvansal atık kullanılmayacaktır.)	- Organik madde en az : %15 - Serbest aminoasit en az %2 - Organik azot
3	**Kompost**	Evsel kaynaklı organik atıkların aerobik veya anaerobik parçalanması sonucu elde edilen ürün. İçinde cam, cüruf, metal, plastik, lastik deri gibi seçilebilir maddelerin toplamı, ağırlığın %2'sini geçemez.	- Organik madde en az: %35 - Maksimum nem: %30 - 10 mm'lik elekten ürünün %90'ı geçecektir. - C/N: 8-22 - Plastik madde ya da diğer mevcut muhtemelen geri dönüşümü olmayan madde parçacıklarının büyüklüğü 10 mm'yi geçmeyecektir. - Kuru maddedeki arsenik miktarı 20 mg/kg'ı geçemez.
4	**Sıvı Karışım Toprak Düzenleyici Gübreler**	Organik toprak düzenleyici ürün/ürünlerle karışımı sonucuelde edilen çözelti ve/veya süspanse haldeki ürün.	- Organik madde en az: %5 - Üründe kullanılan hammadde kaynağı belirtilecektir.

4.3 Anaerobik Çürüme Maddesini Değerlendirme Yöntemleri

Döngüsel ekonomi kapsamında, AÇM için birçok uygulama yönetimi seçeneği vardır. Bunlar, alg yetiştirme, enerji üretimi, biyo-adsorban üretimi, yapı malzemeleri üretimi, besin geri kazanımı/üretimi, toprak iyileştirme ve diğer katma değerli ürünlerin üretimidir. AÇM' nin en yaygın olarak bilinen iki faydası, toprak ıslahı için arazi uygulaması ve biyo-gübredir. AÇM işleme, anaerobik çürütücülerden çıkan atık maddelere farklı teknolojilerin uygulanmasını içerir. AÇM işlemeye iki şekilde yaklaşılabilir. Birincisi, çürüme ürününün kalitesinin ve pazarlanabilirliğinin iyileştirildiği standartlaştırılmış biyogübreler (katı veya sıvı) üretmeyi amaçlayan çürütme ürünü şartlandırmadır. İkincisi, çürütme ürünü arıtımı olarak tanımlanabilir; atıksu arıtımına benzer şekilde, atıksudan besinleri ve organik maddeleri uzaklaştırmak ve kanalizasyon sistemine, yerinde atıksu arıtma tesisine veya alıcı bir akışa deşarjı sağlamak için uygulanır. Çoğu durumda,

geçerli bir çürütme ürünü işleme konsepti oluşturmak için hem şartlandırma hem de arıtmanın gerçekleştirilmesi gerekli olacaktır (Wellinger ve diğ., 2013). Sıvı arıtmanın amacı, suyu ayırarak önemli bir hacim azalması (%50'ye kadar) elde etmektir (German Biogas Association, 2018).

4.3.1 Biyogübre ve Toprak Islahı

Modern tarımda kullanılan inorganik gübreler toprağın, suyun ve havanın kalitesini olumsuz etkilemektedir ve bu nedenle insanlar ile ekosistem için sağlık riskleri oluşturmaktadır. Örneğin inorganik gübreler, çevre ve toprak kalitesinin bozulmasına, ötrofikasyona ve ağır metal kirliliğine neden olmaktadır. Biyogübre ve toprak ıslahı amacıyla AÇM' nin uygulamaları bu olumsuz etkilerin bazılarını iyileştirebilir.

Araştırmacılar, AÇM' nin toprak biyolojik stabilitesini, mikrobiyal biyokütleyi ve enzimatik aktiviteleri arttırdığını göstermiştir (Alburquerque ve diğ., 2012). Örneğin AÇM ile gübrelenen yonca bitkisinin yaprakları, mineral gübrelerle gübrelenen yoncaya kıyasla daha yüksek N, P ve K içerdiği (Koszel ve Lorencowicz, 2015) ve AÇM ile gübrelenen patateslerin kompost ile gübrelenen patateslere göre daha yüksek verimde üretildiği (Garfi ve diğ., 2012) belirlenmiştir.

Öte yandan AÇM' nin bileşimi, gübre veya toprak ıslahı olarak kullanılmadan önce tanımlanmalı ve beyan edilmelidir. Bazı Avrupa ülkelerinde pH, besinler, kuru madde içeriği ve organik madde içeriği belirlendikten sonra AÇM'nin kullanımına izin verilmektedir (Al Seadi ve Lukehurst, 2012).

4.3.2 Biyokömür Üretimi

Biyokömür, karbonlu biyokütlenin termal pirolizinin yan ürünüdür ve karbon tutucu özelliğe sahiptir. Örneğin; süt endüstrisi atıkları ve bütün şeker pancarı AÇM' sinden elde edilen biyokömürün, ağır metallerin (Pb^{2+}, Cu^{2+}, Ni^{2+} ve Cd^{2+}) sulu çözeltilerden ayrılmasında etkili olduğu gözlemlenmiştir (Inyang ve diğ., 2012).

4.3.3 Bahçecilik ve Uygulamaları

Organik kökeni ve fizikokimyasal özellikleri nedeniyle çürütme ürünü bahçecilik ve uygulamalarında faydalıdır. Toprak iyileştirmede kullanılabilir ve seralar, fidanlıklar ile ev bahçeciliğinde uygulandığı bilinmektedir (Dahlin ve diğ., 2015).

4.3.4 Yapı Malzemeleri

Örneğin sunta paneller üretmek için kullanılan ahşabın %50'sinin sığır gübresi çürütme ürününden üretilmesi, ANSI (American National Standards Institute) performans gereksinimlerini karşılayan standartlarda sunta üretilmesini sağlamaktadır (Spelter ve diğ., 2008). USDA (Unites States Department of Agriculture), mekanik veya estetik değerlerden ödün vermeden AÇM kullanılarak orta yoğunluklu sunta ve ahşap/plastik kompozit mühendislik malzemelerinin oluşturulabileceğini bildirmiştir (Kirk ve Gould, 2019).

4.3.5 Su Ürünleri Yetiştiriciliği

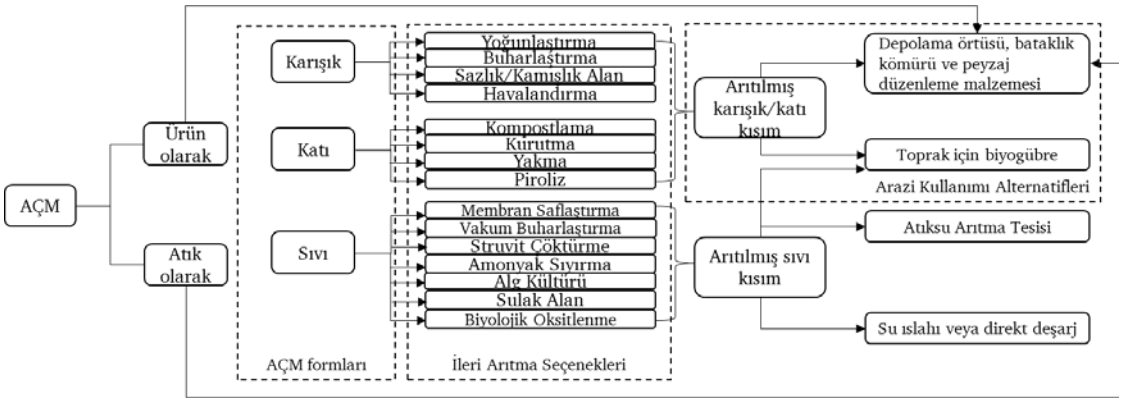
Balık havuzlarının gübrelenmesinde AÇM' nin çiğ gübreden daha iyi olduğu bulunmuştur. Çürütme ürünü hijyeniktir çünkü AÇ sürecinde bakterilerin ve parazitlerin çoğu yok edilir. Böylece havuz temizliği garanti edilir ve balık hastalıkları ile veterinerlik hizmetlerinin maliyetleri en aza indirilir. AÇM ile gübrelenen havuzda yetiştirilen Tilapia, Silver sazan, Bighead sazan, Silver barb ve Mrigal balık türleri, kimyasal gübre veya ham gübre ile gübrelenmiş havuzda yetiştirilen muadillerine göre daha hızlı olgunlaştığı ve daha yüksek net ağırlık artışı sağladığı gözlemlenmiştir. Karşılaştırıldığında, kimyasal gübre ham gübreye göre net verimi %27 artırırken, çürütme ürünü net verimi %55 artırmıştır (Sophin ve Preston, 2001).

Yukarıda bahsedilen uygulamaların dışında anaerobik çürüme maddesinin başka kulanım alanları ve yönetim seçenekleri de mevcuttur. Diğer arazi uygulamaları arasında ise kullanılmayan taş ocaklarının ve madenlerin peyzaj restorasyonu, gürültü önleyici bariyerlerin yapımı, yol yapımı, golf sahalarının yapımı, kayak pistlerinin ve futbol sahalarının yapımı bulunmaktadır (European Comission-General Environment Directorate, 2001).

4.4 Karışık ve Katı Anaerobik Çürüme Maddesi Arıtma Yöntemleri

İlk olarak, AÇM ileri arıtmadan önce bir "ürün" veya "atık" olarak sınıflandırılmalıdır. Hem ürün olarak hem de atık olarak karışık AÇM, arazide kullanımı mümkün olmadığında katı atık sahalarında depolanabilir. AÇM' nin üç formu vardır; karışık, katı ve sıvı. Tarımsal kullanım için biyo-gübre kriterini karşılıyorsa, arıtılmış karışık ve katı AÇM tarım arazisine uygulanabilir. Arıtılmış AÇM için bir başka seçenek, nihai depolama alanı örtüsü veya peyzaj restorasyon malzemesi olarak araziye uygulanmasıdır. Malzemenin katı atık depolama alanlarına yönelik standartları karşıladığından emin olmak için, kullanılmadan önce AÇM' nin susuzlaştırılması ve stabilize edilmesi gerekmektedir. Her iki seçenek de döngüsel ekonomi konseptini yerine getirmektedir.

AÇM bir "atık" olarak sınıflandırıldığında, genellikle ileri arıtma gerekir. Örneğin piroliz, AÇM yönetimi için yeni ortaya çıkan bir seçenektir (Fabbri ve Torri, 2016) ve organik maddeyi oksijensiz bir atmosferde kömür, biyo-yağ ve sentez gazına dönüştürdüğü bilinmektedir (Neumann ve diğ., 2015). Kömür, toprak iyileştirici veya bir enerji kaynağı olarak kullanılabilirken, sentez gazı ve biyo-yağ, yüksek kalorifik değerlere sahip yakıtlardır ve bir yenilenebilir enerji formu olarak kullanılabilir (Monlau ve diğ., 2015). Şekil 4.1'de anaerobik çürütücüden çıkan AÇM'nin ileri arıtma seçenekleri, uygulama alanları ve genel anaerobik çürüme maddesi yönetim süreci özetlenmiştir.



Şekil 4.1 AÇM ileri arıtma seçenekleri ve uygulama alanları (Peng ve diğ., 2019)

4.4.1 Karışık Anaerobik Çürüme Maddesi İçin Arıtma Yöntemleri

Hacim ve taşıma maliyetlerini düşürmek amacıyla daha yüksek bir kuru madde içeriği elde etmek için genellikle yoğunlaştırma ve susuzlaştırma gibi fiziksel ön işlemler uygulanmaktadır (Lü ve diğ., 2015). Buharlaşma sayesinde besin açısından zengin AÇM yoğunlaştırılır ve oldukça saflaştırılmış bir ürün elde edilir. Yüksek oranda hacmi azalmış olan yoğunlaşmış AÇM, organik gübre olarak diğer tarım alanlarına taşınabilirken, damıtık madde nihai bertaraf edilmeden önce deşarj standartlarını karşılamalıdır. Buharlaşma, enerji tüketen bir süreç olmasına rağmen biyogaz tesisinden üretilen ısı bu süreci desteklemek için ucuz bir enerji kaynağı olabilir (Guercini ve diğ., 2014).

Atık çamurun kurutulması için bazı çalışmalarda sazlıklar ve sulak alanlar incelenmiştir (Copper, 1999); (Nielsen ve Willoughby, 2005); (Uggetti ve diğ., 2010). Bu teknolojiler ile %30-40 kuru madde içeren çamur elde edilebilir ve nihai malzeme tarım arazisine yayılabilir veya depolama alanı örtüsü olarak kullanılabilir. Tablo 4.5'te karışık anaerobik çürüme maddesi için arıtma teknolojileri ve bu teknolojilerin avantaj ve dezavantajları verilmiştir.

Tablo 4.5 Karışık AÇM için arıtma teknolojileri, avantaj ve dezavantajları

AÇM Türü	Teknoloji	Avantaj	Dezavantaj
Karışık	Yoğunlaştırma	• %5-10 DM'lik bir AÇM elde edilir. • AÇM hacmi azaltılır.	• Polielektrolit eklemesi gerekir.
	Susuzlaştırma	• ≥%18 DM içeren bir AÇM elde edilir. • Nakliye maliyetleri azaltılır.	• Flokülant eklemesi gerekir. • Enerji tüketir.
	Buharlaştırma	• Besinler ve nemin bir kısmı korunur.	• Asit dozajı gerekir.
	Sazlık/Kamışlık Alan	• AÇM %30-40 DM olacak şekilde susuzlaştırılır.	• Verimini görmek için uzun bir süre gerekir.
	Havalandırma	• BOİ ve amonyak azaltılır. • Biyolojik çamur, çürütücü için hammadde olarak geri döner.	• Yüksek işletme maliyeti gerekir.

4.4.2 Katı Anaerobik Çürüme Maddesi İçin Arıtma Yöntemleri

Karışık çürüme maddesi ile karşılaştırıldığında, çürüme maddesinin katı fraksiyonu hem lojistik hem de teknik nedenlerle tarımsal kullanım için daha uygundur. Katı çürüme ürünü, yüksek kaliteli kompost üretmek için kompostlama yoluyla işlenebilir (Torres-Climent ve diğ., 2015). Tablo 4.6'da gösterildiği gibi, katı AÇM' yi değerlendirmenin alternatif yollarından biri termal dönüşüm tekniği olabilir (Monlau ve diğ., 2015). Çürütme ürününün termal olarak kurutulması, hacim azalması nedeniyle nakliye maliyetlerini azaltır ve aşırı besin yüküne karşı hassas alanlarda besin fazlalığını kaldırabilir. Birleşik Isı ve Güç (CHP) ve güneş enerjisi gibi ucuz enerji kaynakları, katı çürütme ürününün termal olarak kurutulmasını sağlamanın yollarından bazılarıdır (Fuchs ve Drosg, 2013), (Maurer ve Müller, 2012). Kurutma işlemi sırasında, buharlaşma yoluyla amonyak kaybını önlemek için pH' ın sabit tutulması gerekir (Pantelopoulos ve diğ., 2016).

Katı AÇM' nin yakılması ile oluşan dip külünde bulunan fosfor, potasyum ve kalsiyum gibi gübre elementleri geri dönüştürülebilir. Kurutulmuş katı çürüme ürünü, yanma için katı yakıt olarak da kullanılabilir. OFMSW ve gıda atığının çürütülmesinden oluşan AÇM' nin yanma kalitesi ve teknolojileri daha fazla araştırma gerektirmektedir (Kratzeisen ve diğ., 2010). Katı AÇM' nin pirolizi ile biyo-kömür, biyo-yağ ve sentez gazı (syngas) üretilebilir (Vickers, 2017), (Neumann ve diğ., 2015), (Pisello ve diğ.,, 2016), (Opatokun ve diğ., 2015). Pirolizden elde edilen biyo-yağ, motor yakıtı olarak kullanılabilirken (Vickers, 2017), biyo-kömür ve sentez gazı ise yakıt olarak kullanılabilir (Fabbri ve Torri, 2016), (Monlau ve diğ., 2015). Ancak daha da önemlisi, bu ürünler genel performansı iyileştirmek için anaerobik çürütmeye uygulanabilir.

Tablo 4.6 Katı AÇM için arıtma teknolojileri, avantaj ve dezavantajları

AÇM Türü	Teknoloji	Avantaj	Dezavantaj
Katı	Kompostlama	• Organik madde parçalanır. • Amonyak nitrata çevrilir.	• Oldukça uzun zaman gerekir.
	Termal Kurutma	• %57,5-92,5 DM üretilir. • Organik gübre veya enerji geri kazanımı olarak kullanılır.	• Amonyak kaybı gerçekleşir. • İleri arıtma gerekir.
	Yakma	• Beton üretimi ve fosfor geri kazanımı için kül olarak kullanılabilir.	• ≥40% DM'lik yüksek kalorifik değer gerekir.
	Piroliz	• Sentez gazı kurtarılır. • Kütlenin %70'i azaltılır. • Biyo-kömür üretilir.	• Kuru ve peletlenmiş bir form gerekir.

4.5 Çürütücü Sıvısı İçin Arıtma Yöntemleri

Çürüme maddesinin sıvı fraksiyonunun daha ileri arıtılması için en önemli teknolojiler, membran arıtma, vakum buharlaştırma, struvit çöktürme, amonyak sıyırma ve alg kültürü yetiştirmedir. Çürütücü sıvısını yerinde işlemek veya kullanmak için Tablo 4.7'de verilen birçok atıksu arıtma ve besin geri kazanım teknikleri geliştirilmiştir.

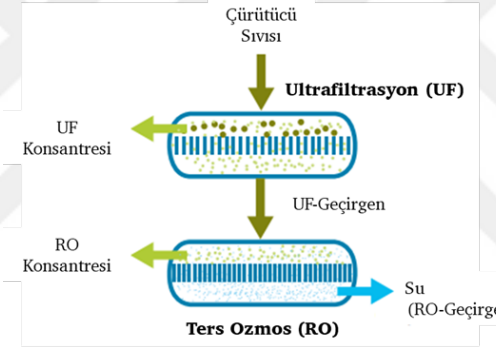
Tablo 4.7 Çürütücü sıvısı için arıtma teknolojileri, avantaj ve dezavantajları

AÇM Türü	Teknoloji	Avantaj	Dezavantaj
Sıvı	Membran Arıtma	• Direkt deşarj edilebilir. • Yoğun sıvılar için besin geri kazanımı sağlanır.	• Konsantre bertarafı. • Kirlenme. • Yüksek enerji gereksinimi.
	Vakum Buharlaştırma	• Hacim azalır. • Yoğunlaştırılmış besin açısından zengin ürün.	• Katılarla kirlenir.
	Struvit Çöktürme	• Bu yöntemle struvit, kolay işlenen topaklar halinde geri kazanılır. • Boru işlerinin kirlenmesini önler.	• Katı ile kirlenme meydana gelir. • Pazar güvenliği sorun yaratabilir.
	Amonyak Sıyırma	• Amonyak arazi uygulaması üzerindeki kısıtlamaları kaldırır. • Gübre olarak konsantre amonyum sülfat.	• Yüksek sıcaklık ve pH.
	Alg Kültürü	• Satılabilen veya biyo-dizele dönüştürülebilen algler üretir. • CO2'yi biyogazdan uzaklaştırır.	• Geniş yüzey alanı. • Karmaşık biyoreaktör kontrolü.

4.5.1 Membran Arıtma

Çürüme maddesinin sıvı kısmına membran teknolojisi uygulanırken, öncelikle katıların uzaklaştırılması yapılmalıdır. Bu, membran kirlenmesini önlemek adına arıtma işlemlerinde çok önemli bir noktadır. Membranlar katılara karşı çok hassas olduklarından, ayırma ve/veya yüzdürmede topaklaştırıcıların kullanılması, genellikle mümkün olduğunca partikül içermeyen bir sıvı fraksiyon üretmek için gereklidir. Artan tıkanma ile, sık temizleme aralıkları nedeniyle enerji gereksinimi keskin bir şekilde artar ve verim düşer (German Biogas Association, 2018). Membran filtrasyonda, genellikle küçülen gözenek boyutlarına sahip farklı membranlar kullanılır. Mikrofiltrasyon, ultrafiltrasyon, nanofiltrasyon ve son

olarak ters ozmos. KOİ'nin (kimyasal oksijen ihtiyacı) giderilmesi için 0,0005 – 0,005 μm gözenek boyutuna sahip ters ozmos (RO) genellikle sıvı çürütücü maddenin işlenmesi için kullanılır. Normalde, amonyak deşarj seviyelerine ulaşmak için üç aşamalı ters ozmos gerekir. Bu tür membran arıtma işlemlerinin bir dezavantajı, çürüme maddesinin yalnızca sınırlı bir miktarının saf su olacak olmasıdır; çürütücü sıvısının yaklaşık %50'si yan ürünler olarak birikir. Alternatif olarak, son ters ozmos aşaması, katı fraksiyonun, ultrafiltrasyon filtre edilmeyen maddenin ve ters ozmos konsantresinin biriktirildiği iyon değişimi ile değiştirilebilir. Miktarları azaltmak için, ultrafiltrasyon filtre edilmeyen kısım genellikle biyogaz tesisine ve/veya katı-sıvı ayırma aşamasına geri devrettirilir. Membran arıtma oldukça pahalıdır ve önemli miktarda enerji gerektirir (Wellinger ve diğ., 2013). Şekil 4.2'de prosesin akım şeması ve Şekilş 4.3'de membran arıtma prosesinde kullanılan ters ozmos modüllerinin görüntüsü verilmektedir.



Şekil 4.2 Membran arıtma prosesi akım şeması



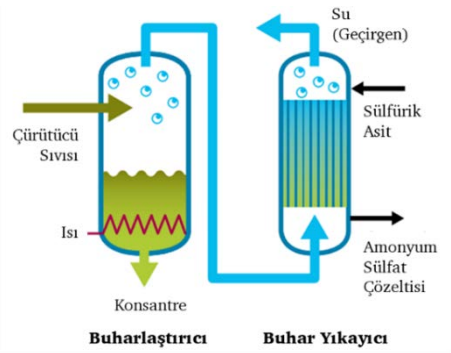
Şekil 4.3 Ters Ozmos (RO) modülleri

4.5.2 Buharlaşma

Biyogaz tesisinde yeterli atık ısı mevcutsa çürütücü maddenin buharlaştırılması ilginç bir çözüm olabilir. Bu proses uygulanmadan önce önemli miktarda katı madde önceden uzaklaştırılmalıdır. Teknik ölçekli uygulamalarda (örneğin enerji

mahsulü çürütme gibi), bu genellikle lifleri çıkarmak ve böylece ısı eşanjörlerinin tıkanmasını azaltmak için vidalı pres ayırıcılar ve titreşimli eleklerin birleştirilmesiyle yapılır. Buharlaştırma ile besin açısından zengin bir konsantre üretilir ve bir kondensat geri kazanılır. Konsantre ürün, normal basınç altında yoğuşturma (atmosferik buharlaşma), kapalı bir sistemde negatif basınç (vakum buharlaştırma) veya bir membran prosesinde filtrasyon ile elde edilebilir. Atmosferik buharlaşma için önceden ayırma zorunlu değildir. Ancak, vakumlu buharlaştırma ve membran filtrasyonu için gerekli bir aşamadır. Hedef, kondensatta düşük nitrojen konsantrasyonlarına ve konsantrede yüksek nitrojen konsantrasyonlarına sahip olmaktır. Amonyağın buharlaşmasını azaltmak için önemli miktarda sülfürik asit eklenir, bu da yüksek maliyet anlamına gelir. Bunun dışında üretilen kondens doğrudan deşarj seviyelerini karşılaması için bir ters ozmos adımıyla saflaştırılabilir. Sonuç olarak, çürütme ürününün buharlaşması önemli kimyasalların kullanımını ve atık ısının mevcudiyetini gerektirir, kondensatın doğrudan deşarj seviyeleri normal olarak elde edilemez (Wellinger ve diğ., 2013). Atmosferik buharlaşmada amaç, çürütücü sıvısını lamellere, filtre kayışlarına, disklere ve tamburlara dağıtarak buharlaşma için mümkün olan en geniş yüzeyi oluşturmaktır.

Vakumlu buharlaşma kapalı bir sistemde meydana gelir, bu da kirli havanın üretilmediği anlamına gelir. Çürütücü sıvısı, buharlaştırıcının iç yüzeyinde, dahili ısı plakalarında veya ısı eşanjörlerinde buharlaştırılır. Düşük basınç, kaynama sıcaklığını 40-75 °C' ye düşürür, bu da H_2O, CO_2, NH_3'ün (pH değeri düşmeden) çürütücü sıvısından ayrıldığı anlamına gelir. Bu buhar karışımı bir buhar yıkayıcıda asitlerden ve NH_3'ten temizlenir ve gerekirse yoğuşturulur. Bir sonraki aşama için buhar karışımından gelen ısıyı kullanmak için birkaç ünite genellikle bir seri halinde (çok aşamalı süreç) bağlanır (German Biogas Association, 2018). Şekil 4.4'te prosesin akım şeması ve Şekil 4.5'te prosese ait vakum buharlaştırıcı görüntüsü verilmektedir.



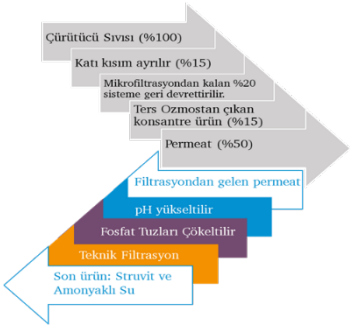
Şekil 4.4 Vakum buharlaştırma prosesi akım şeması



Şekil 4.5 Vakum buharlaştırıcı

4.5.3 Çöktürme

Çöktürmede, doğrudan mineral gübre olarak kullanılan magnezyum amonyum fosfat veya kalsiyum fosfat tuzu elde edilir. Fosfatın çökelmesi, tüm katıların ayrılması gereken sıvı fraksiyonda meydana gelir. Bu, $< 0.1\ \mu$m gözenek boyutuna sahip mikrofiltrasyona kadar çeşitli filtreleme aşamalarından geçmesi demektir. pH değerinin arttırılması, fosfatların çözünürlük dengesini değiştirir. Fosfat tuzları katı halde çöker. Fosfat tuzlarının bileşimi, kostik çözelti ve katkı maddelerinin seçiminden etkilenebilir. Örneğin, magnezyum struvit eklenmesi çökelme oluşmasına neden olur. Çöken tuz filtrelenir ve gübre üretiminde veya kimya endüstrisinde kullanılabilir (German Biogas Association, 2018). Şekil 4.6'da prosese ait akım şeması ve Şekil 4.7'de çöktürme düzeneği gösterilmektedir.



Şekil 4.6 Çöktürme prosesi akım şeması



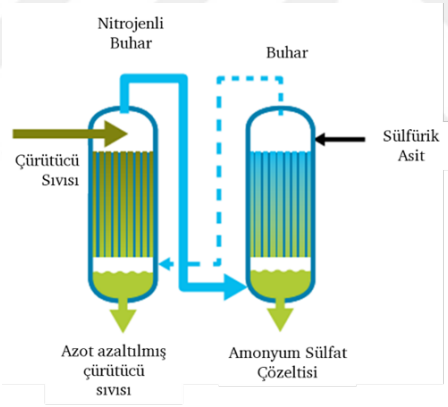
Şekil 4.7 Çöktürme düzeneği

4.5.4 Amonyak Sıyırma

Amonyak sıyırma, çürüme sıvısının amonyum-nitrojen içeriğini azaltmak için kullanılır. Bunu yapmak için NH_4^+/NH_3 dengesi amonyak tarafına kaydırılmalıdır. Bu, pH değerini ve sıcaklığı artırarak elde edilir. Giriş malzemesi bir kolona serpilir ve karşı akımda gaz uygulanır. Prosese bağlı olarak, gaz ya hava ya da buhardır. Havayla sıyırma, buharla sıyırma işleminden daha az enerji harcar ancak daha fazla kostik gerektirir. Gaz, amonyak ile yüklenir ve amonyum sülfat çözeltisinin üretildiği sülfürik asit ilavesiyle bir gaz yıkayıcıda rejenere edilir. Alternatif olarak, baca gazı kükürt giderme işleminden elde edilen alçıtaşı da rejenerasyon için kullanılabilir, bu da ek olarak azotlu kireç gübresi üretir. AÇM önceden ayrılmadan işlenirse, NH_3'ten arındırılmış lignoselüloz lifleri de üretilebilir ve ahşap veya lif ikameleri olarak kullanılabilir. Ayrıca, besleme stoğunun 70°C'nin üzerine geçici sıcaklık artışı, organik maddenin daha fazla ayrışmasına yol açar, bu da artan bir biyogaz verimine yol açar. Amonyum, çökeltiden fosfat içermeyen permeatın sıyrılmasıyla tamamen uzaklaştırılabilir. Permeat katı içermediği için, sıyırma sisteminin dolgu maddelerinin tıkanması ve aşırı büyümesi gibi olağan problemler meydana gelmez. Ortaya çıkan artıksu, doğrudan suya deşarj

edilemeyecek kadar yüksek bir kimyasal oksijen ihtiyacına (KOİ) sahiptir ve buna göre daha fazla arıtılmalıdır (German Biogas Association, 2018).

Çürütücü sıvısındaki nitrojen konsantrasyonunu azaltmak için kullanılan teknolojilerden biri olan amonyak sıyırma yöntemiyle pH 9,5 ve amonyum: magnezyum:fosfat 1:1,25:1 molar oranında maksimum %88 amonyak giderme olduğu kayıtlara geçmiştir (Miles ve Ellis, 2001). Amonyak sıyırma, pahalı kimyasallar gerektirmemesi açısından avantaja sahiptir. Son teknoloji dolgulu sıyırma kolonlarındaki tıkanma sorunları nedeniyle, eğilim daha basitleştirilmiş sıyırma kaplarına doğru yönelmektedir. Amonyak sıyırmanın en büyük avantajı, standartlaştırılmış bir azotlu gübre ürününün geri kazanılabilmesidir. Ek olarak, bu tür bir sıvı gübre, çürütme ürünü işlemedeki diğer fraksiyonların, pazarlanabilirliklerini arttırabilen nitrojen konsantrasyonunu zenginleştirmek için kullanılabilir (Wellinger ve diğ., 2013). Şekil 4.8'de prosese ait akım şeması ve Şekil 4.9'da amonyak sıyırıcı görseli görülmektedir.



Şekil 4.8 Amonyak sıyırma prosesi akım şeması



Şekil 4.9 Amonyak sıyırıcı

4.5.5 Alg Kültürü

Biyoyakıt veya biyoürün üretmek için mikroalg kültür yetiştiriciliğinde çürütücü sıvısını kullanmak gündemde olan bir konudur. Çünkü, mikroalg yetiştirmek için çürütücü sıvısı kullanmak besin maliyetini düşürmektedir. Miksotrofik mikroalgler, biyokütle üretkenliğini arttırmakta ve nitrojen, fosfor ve organik maddenin uzaklaştırılmasını sağlamaktadır (Xia ve Murphy, 2016). Çürütücü sıvısının yüksek bulanıklığı, mikroalg büyümesini engelleyen fotosentetik olarak aktif radyasyonun daha düşük seviyelerde seyretmesine yol açabilir (Monlau ve diğ., 2015) (Xia ve Murphy, 2016) (Wang ve diğ., 2010). Amonyak inhibisyonu, mikroalg yetiştiriciliği için başka bir sınırlama olabilir. Amonyak inhibisyonunu önlemek için, çürütücü sıvısının 20–200 mg NH_4^+/L'ye seyreltilmesi gerekir. Ayrıca, çürütücü sıvısının suyu yosun yetiştiriciliği için bir besin ortamı olarak kullanıldığında, çürütücü sıvısından elde edilen mikroorganizmalar besinler için rekabet edebilir (Monlau, ve diğ., 2015) (Croft ve diğ., 2005).

4.5.6 Diğer Yöntemler

4.5.6.1 Anammox süreci

Amonyağın giderilmesi için Anammox (anaerobik amonyum oksidasyonu) işlemi uygulanabilir. Bu, birçok doğal ortamda gerçekleşen mikrobiyal bir işlemdir ve daha sonra geliştirilen amonyum giderme teknolojisinin ticari markasıdır. Anammox işlemi bakteriler tarafından gerçekleştirilir, *Planctomyces* ve *Pirellula* en iyi bilinen cinslerdir ve aynı reaktörde gerçekleşen iki adımdan oluşur:

(I) amonyak oksitleyici bakteriler tarafından gerçekleştirilen kısmi nitrifikasyon; (II) Anammox bakterileri tarafından aşağıdakilere göre gerçekleştirilen, elde edilen amonyum ve nitritin dinitrojen gazına ve yaklaşık %15 nitrata dönüştürülmesi:

$$4NH_4^+ + 3O_2 \rightarrow 2NH_4^+ + 2NO_2^- + 4H^+ + 2H_2O \quad (4.1)$$

$$4NH_4^+ + NO_2^- \rightarrow N_2 + 2H_2O \quad (4.2)$$

4.5.6.2 Çürütücü Sıvısının Reaktöre Geri Devrettirilmesi

Katı-sıvı ayrımından elde edilen AÇM fraksiyonları sıklıkla anaerobik çürütücü reaktörüne yeniden beslenir. Bu, sıvı fraksiyonun yeniden sirküle edildiği sürekli

veya kesikli kuru çürütme prosesleri için yaygın bir uygulamadır. Sürekli kuru çürütme proseslerinde, ham madde (örneğin silaj) sıvı çürütme ürünü fraksiyonu ile karıştırılır ve çürütülür. Bu genellikle bir piston akışlı reaktörde yapılır. Kesikli kuru çürüme süreçlerinde, perkolat olarak da adlandırılan çürütücü sıvısı, süreçteki mikroorganizmaları ve besinleri yeniden sirküle etmek için kullanılır. Reaktöre geri devrettirilen çürütücü sıvısı, biyogaz üretimini maksimuma çıkarırken, aynı zamanda AÇM' nin depolanması, taşınması ve kullanımı sırasında meydana gelen metan emisyonlarını da minimuma indirir (Wellinger ve diğ., 2013).

4.6 Çürütücü Sıvıları için Yönetim Stratejileri

Ülkemizde biyogaz/biyometan endüstrisinin hızla gelişmesi çürütücü sıvılarının yönetimi sorununu ortaya çıkarmaktadır. Evsel katı atığın organik kısmının anaerobik çürütülmesi sonucu üretilen çürütücü sıvısının yönetilmesi, biyogaz/biyometan endüstrisinin sürdürülebilir gelişimini etkileyen en önemli unsurdur. Bu sıvı anaerobik çürüme maddesi sorununa önemli bir çözüm olarak Bölüm 4.5'te belirtilen arıtma yöntemleri ve biyogaz/biyometana bağlı tarımsal ekosistem dengesini en üst düzeye çıkarmak için araştırmalar yapılmaktadır (Wang ve diğ., 2021).

Çürütücü sıvısı, membran arıtma, buharlaştırma, çöktürme, amonyak sıyırma, gibi besin geri kazanımı işlemlerinden geçirilerek içerisinde yüksek miktarda bulunan nitrojen ve fosfor geri kazanılarak doğrudan sıvı gübre olarak kullanılabilmekte geriye kalan su ise ya geri kazanılmış su olarak kullanılmakta ya da deşarj edilmektedir.

Bu ileri arıtma teknolojileri işletme şartlarının zor ve maliyetli olması gibi bazı dezavantajlara sahip olduğundan çürütücü sıvısı ileri arıtma olmadan da anaerobik çürütücüye geri devrettirilerek içindeki yüksek azot ve fosfor içeriği sayesinde üretilecek biyogaz/biyometan verimini arttırabilir. Aynı çürütücü sıvısı yasal standartları karşıladığı sürece içindeki yüksek besin muhtevası sebebiyle doğrudan tarım arazilerine organik sıvı gübre olarak uygulanabilir.

Bu yöntemlerin yanı sıra biyoyakıt veya biyoürün üretmek için çürütücü sıvısının mikroalg kültür yetiştiriciliğinde de kullanılması gündemde olan bir yöntemdir.

Çünkü, mikroalg yetiştirmek için çürütücü sıvısı kullanmak besin maliyetini düşürmektedir. Mikro alg yetiştiriciliği hakkında yapılan bazı çalışmalar çürütücü sıvısını arıtmanın sürdürülebilir mikroalg biyokütle üretimi üzerine büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir (Kisielewska ve diğ., 2021), (Ermiş, 2020), (Ülgüdür, 2019).

Kisielewska ve diğ. (2021), tarafından yapılan bir çalışmada, çürütücü sıvısı üzerinde mikroalg biyokütle üretiminin yanı sıra arıtma için büyük bir mikroalg yetiştirme potansiyeli olduğunu doğrulamıştır. Çalışma, kültür ortamındaki azot fosfor oranı (N/P) 42.4 olmasına rağmen kullanılan iki mikroalg türü (C. vulgaris ve A. Platensis) tarafından verimli besin giderimi (azot ve fosfor) olduğu bulunmuştur.

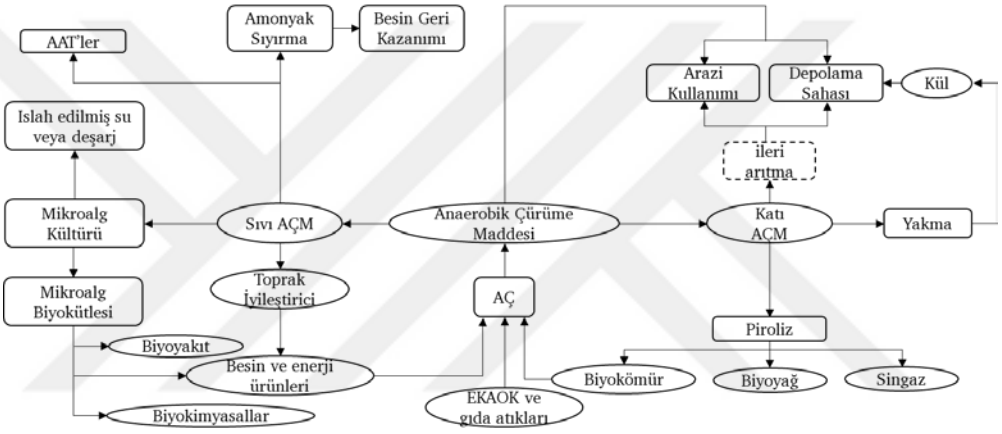
Ermiş (2020), tarafından yapılan çalışmada ise evsel katı atığın organik kısmının karışımı kullanılan gerçek ölçekli bir anaerobik çürütücüden elde edilen çürütücü çıkış suyundaki makrobesinler kullanılarak mikroalg biyokütlesi üretimi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu çalışma ile, çürüme ürünü yetiştirilen alglerin, biyoyakıt, biyopolimer, biyogübre üretmek için kullanılabilecek birincil (karbonhidratlar, proteinler, lipidler) ve ikincil (pigmentler) metabolitler açısından zengin kaynaklar olduğu kanıtlanmıştır.

Ülgüdür (2019), tarafından yapılan çalışmada ise yüksek verimli anaerobik arıtmanın ve mikroalgal besin maddelerinin çürüme ürünlerinden arıtılmasının potansiyel uygulanabilirliğini kanıtlamıştır. Çürütücü sıvısının yönetimine yeni bir yaklaşım getirmek amacı ile numunelere kalan biyogaz potansiyeli testi uygulayan Ülgüdür, çürütücü çıkış sularından 70 gün içinde önemli miktarlarda biyogaz verimlerinin (0,111-0,326 Lbiyogaz/g VS) ve toplam kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİt) gideriminin (%21-84) elde edilebileceğini göstermiştir. Daha sonra Ülgüdür, kalan organik maddelerin çürütülmesi için gereken süreyi azaltmak üzere kalan biyogaz potansiyeli en fazla olan çürütücü çıkış suyu için yüksek hızlı anaerobik arıtım uygulanmıştır. 1,3-1,4 günlük hidrolik tutma süresinde oranında %56-63 KOİt giderilmiştir. Takibindeki süreçte uygulanan mikroalg işlemi ile %92,7-93,7 amonyum azotu ve %95,6-97,8 çözünmüş fosfor giderimi sağlanmıştır. Sonuçlar ümit verici olup çürütücü çıkış suyunun yüksek hızlı

anaerobik ve mikroalgal besiyer madde giderme işlemlerinin uygulanabilirliğini ortaya koymuştur.

Sonuç olarak bu yönetim stratejileri değerlendirildiğinde çürütücü sıvısının içindeki yüksek nütrient değerlerinin geri kazanılarak katma değeri yüksek ürünlerin geliştirilmesi ve pazara sunulması gelecek için nihai çözümdür.

Şekil 4.10'da Bölüm 4 boyunca anlatılan evsel katı atığın organik kısmının ve gıda atıklarının anaerobik çürütülmesinden kaynaklanan anaerobik çürüme maddesinin üç formunun döngüsel ekonomi kavramı kapsamında arıtılması özet olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.10 AÇ ve AÇM'yi birbirine entegre ederek döngüsel ekonomi kavramlarıyla AÇM yönetimi (Monlau ve diğ.,) (Xia ve Murphy, 2016)

4.7 Yurtdışı Uygulamaları

Bu bölümde yukarıda detaylıca anlatılan çürütücü sıvılarının ileri arıtma yöntemlerinin yurtdışı uygulamaları incelenecektir. Almanya, İsviçre, Japonya ve İrlanda'daki tesisler ve hangi ileri arıtma yöntemini kullanarak çürütücü sıvılarını işledikleri ve sonrasında nasıl değerlendirdikleri gösterilecektir.

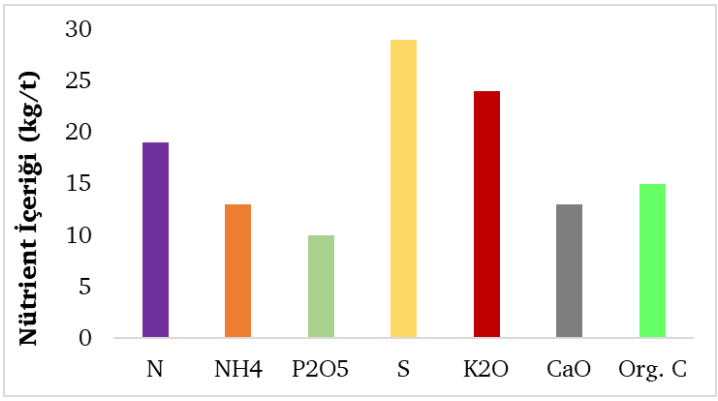
4.7.1 Almanya Örneği

Bersenbrück'teki biyogaz tesisi 2011 yılında faaliyete başlamış olup 1.300 kWel kurulu güce sahiptir. Tesiste yıllık 30.000 ton anaerobik çürüme maddesi üretilmektedir. Katı ve sıvı olarak üretilen çürüme maddesi arıtıldıktan sonra gübre ve toprak iyileştirmede kültivatör olarak kullanılmaktadır. Tesiste ilk olarak çürütme ürünü mekanik oplarak depodan ayrılır ve katı/sıvı faz ayrımı

gerçekleştirilir. Ayrılan çürütücü sıvısı ürünü, ısı eşanjörlerinde CHP ünitesinden gelen atık ısı ile Arnold Buharlaştırıcısında ısıtılır ve ardından vakum buharlaştırma yönteminde ile buharlaştırılır. Bersenbrück'te kurulan sistem, 1 litre su buharlaşması için sadece 0,28 kWtherm ısı gerektirir. Amonyağın buharlaşmasını önlemek için buharlaşmadan önce çürütücünün pH değeri sülfürik asit vasıtasıyla düşürülür. Başlangıç ürününde bulunan tüm besinler, yoğunlaştırılmış konsantrede bulunabilir. Böylece, istenmeyen yan ürünler olmadan maksimum sıvı ve besin ayrımı elde edilir. Kondensat alıcı suya deşarj edilir. Sıvı çürütücünün hacmi yaklaşık %70 oranında azaltılarak nakliye ve bertaraf maliyetleri büyük ölçüde düşürülmüş olur (German Biogas Association, 2018). Şekil 4.11'de tesise ait vakum buharlaştırıcı ve Şekil 4.12'de prosesten çıkan konsantre ürünün besin içeriği gösterilmektedir.



Şekil 4.11 Bersenbrück'teki tesise ait vakum buharlaştırıcı

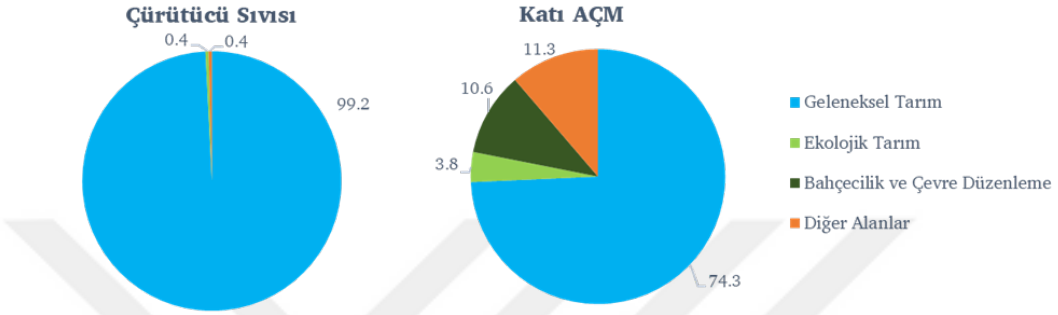


Şekil 4.12 Vakum buharlaştırma prosesinden sonra konsantre ürünün nütrient içeriği

4.7.1.1 Almanya'da Pazarlama Stratejileri

Biyogaz tesislerinin işletmecileri, çürütücü maddenin ekonomik olarak optimum kullanımı için birçok pazarlama kararı vermektedirler. Önemli faktör, çürüme ürününün hangi hedef müşteri gruplarına pazarlanacağını bilmektir. Ürünün

tasarımı, satış kanalı, iletişim ve fiyat hepsi bu faktöre bağlıdır. Almanya'da şu ana kadar çoğu biyogaz tesisi çürütücü maddelerini arıtmadan çiftliklere, tercihen tesise çok yakın bölgelere teslim etmektedirler. Tesis operatörleri, çürütmeyi pazarlanabilir gübrelere yükselterek yeni müşteri gruplarından faydalanabilir. Digestate pazarlaması, diğer ülkelerde de bir biyogaz tesisini ekonomik olarak mümkün kılmaya çalışırken ilgili ve önemli bir faktördür (German Biogas Association, 2018).



Şekil 4.13 Müşteri grupları arasında çürütücü sıvısı ve katı AÇM'nin satışlarının dağılımı

Bu müşteri gruplarının her birinin, ürünler hakkında farklı talepleri olabilmektedir. Örneğin, çiftçiler, sadece %7'lik bir kuru madde içeriğine sahip işlenmemiş çürüme ürünü kullanabilirken özel bahçıvanlar pelet veya konsantre sıvı ürünler gibi ürünleri tercih etmektedir.

Müşteri grubuna bağlı olarak dağıtım yolları da farklıdır. Çiftçilere doğrudan tesis operatörleri tarafından hizmet verilmesi daha olası iken özel bahçıvanlar gübre ürünlerini genellikle bahçe merkezlerinden veya hırdavatçılardan satın almaktadırlar. Ayrıca, bir çevrimiçi mağaza veya çiftlik mağazası aracılığıyla özel hanelere doğrudan teslimat da mümkündür.

Son olarak, fiyatlandırma müşteri grupları arasında büyük farklılıklar gösterir. Tarım işletmeleri, çürüme ürününün gübre değerine göre ürünü almaya isteklidir. Bununla birlikte, özellikle besin açısından zengin bölgelerde, çürütücü maddenin tesis operatörleri tarafından ücretsiz olarak veya çiftçilere ek bir ödeme ile tedarik edilmesi oldukça yaygındır. Buna karşılık, özel bahçıvanların ödediği fiyat tarım sektöründen birkaç kat daha yüksektir. Ancak, bu fiyatlar aynı zamanda işleme, pazarlama ve satış maliyetlerini de kapsamalıdır.

4.7.2 İsviçre Örneği

İsviçre'nin Inwil şehrindeki biyogaz tesisi 2007 yılında faaliyete başlamıştır. 2008 yılında ise bütünleşik çürüme maddesi arıtma (MultiPhase-Seperation) tesisi kurulmuştur. Tesisin kurulu kapasitesi 1.350 Nm3/h'dir ve yıllık 45.500 ton AÇM arıtabilmektedir. Arıtma sonrası üretilen çürütücü sıvısı, katı AÇM ve konsantre nütrient çözeltisi gübre olarak kullanılmasının yanında bahçecilik ve çevre düzenleme alanlarında kullanılmaktadır. Aynı zamanda tesisten çıkan atıksu deşarj standartlarını sağladığından doğrudan kanala deşarj edilebilmektedir.

Katı-sıvı ayrımından sonra, sıvı faz ultrafiltrasyon ve çok aşamalı ters ozmos ile işlenir. Tahliye edilebilir suya ek olarak, nihai ürün konsantre azot, fosfor ve potasyumdan oluşur. Arıtma işleminin farklı aşamaları, azot ve fosforu ayrı ayrı fraksiyonlara ayırır (German Biogas Association, 2018). Şekil 4.14'te bu tesisin görüntüsü verilmektedir.



Şekil 4.14 Inwil'deki çürütücü sıvısı işleme tesisi

4.7.3 Japonya Örneği

Japonya'nın Hashimoto şehrindeki biyogaz tesisi 2017 yılında faaliyete alınmış olup kurulu gücü 370 kW'tır. Yıllık yaklaşık olarak 12.500 ton anaerobik çürüme maddesi işleme kapasitesine sahiptir. Biyogaz tesisinden çıkan çürütücü katısı ve sıvısı bu tesis için özel yapılmış olan arıtma tesisinde arıtılmaktadır.

Almanya ve diğer Avrupa ülkelerden farklı olarak, Japonya'da biyogazın tarihi kısadır ve pazar hala büyüme potansiyeline sahiptir. Biyogaz, diğer yenilenebilir enerji türlerinden daha pahalı olmasına rağmen, çiftçiler bu yöntemi seçmektedir çünkü onlara 7/24 çalışma sırasında güç üretirken atıkları bertaraf etme imkanı sunmaktadır.

Örnekteki biyogaz tesisi, gıda fabrikalarından ve restorantlardan gelen gıda atıklarını ve at gübresi gibi hayvan atıklarını kullanır. Bu biyogaz tesisi için özel olarak inşa edilen atıksu arıtma tesisinin ön aşamasında çürüme ürünü ayrıştırma işlemine tabi tutulur. Kuru maddenin azaltılması, sıvı fazın verimli bir şekilde arıtılmasını sağlar. Daha sonra arıtılan su, atıksu kanalına deşarj edilir. Ayırıcı, biyogaz tesisinin çürütücüsü ile beslenir. Girişte, çürütücünün kuru maddesi %7'dir. Ayırma işlemi sırasında, pres vidası, bir elek aracılığıyla çürüme ürününü presler. Böylece katı malzeme çıkışa iletilir. Sıvı faz sadece %3.5 kuru madde içerir ve özel atıksu arıtma tesisine gönderilir. Sıvı fazın bir kısmı, çürütücü tankındaki viskoziteyi iyileştirmek için de kullanılabilir (German Biogas Association, 2018).



Şekil 4.15 Tesisteki baskılı vida ayırıcının elek kısmından görüntüsü

4.7.4 İrlanda Örneği

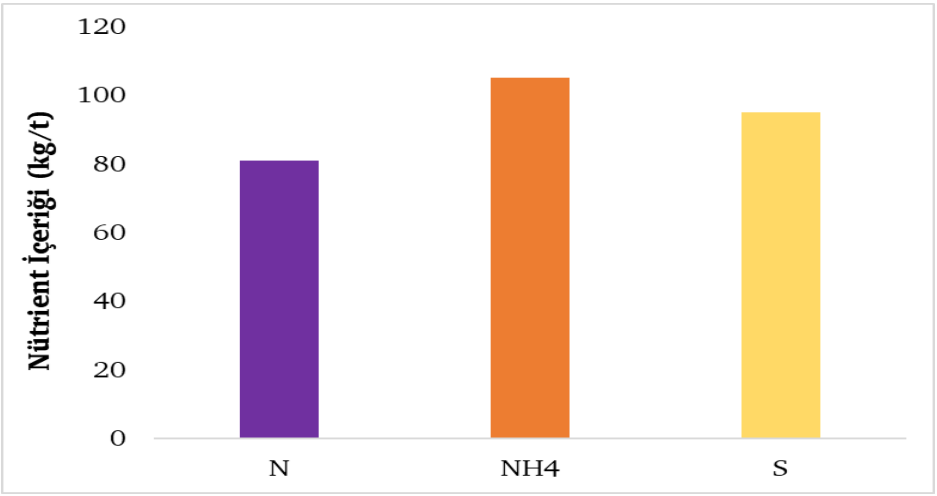
İrlanda'nın kuzeyinde bulunan Tully Anaerobik Çürütücü Tesisi 2017 yılında işletmeye alınmıştır. Tesisin 3.000 kW kurulu gücü bulunmaktadır ve yıllık olarak 40.000 ton anaerobik çürüme maddesi üretmektedir. Tesiste çürütücü sıvısını arıtmak için özel olarak geliştirilmiş nitrojen sıyırma teknolojisi kullanılmaktadır. Tesiste arıtma sonrası çıkan amonyum sülfat çözeltisi ve çürütücü sıvısı gübre olarak kullanılmakta olup aynı zamanda bahçecilik alanında da kullanılmaktadır.

Tully AÇ tesisi, anaerobik çürütme teknolojisini nitrojen sıyırma teknolojisiyle birleştirerek, yılda 40.000 ton yerel kaynaklı kümes hayvanı gübresinden 3 MW yenilenebilir elektrik üretmektedir. Tesis, Kuzey İrlanda'nın yakıt karışımını çeşitlendirerek ve ülkenin fosil yakıtlara olan bağımlılığını ve ayrıca atmosfere sera gazı emisyonunu azaltarak 4.000 haneye eşdeğer enerji sağlamak için yeterli sürdürülebilir enerji üretmektedir. Anaerobik çürütücülerdeki bakterilerin inhibisyonunu önlemek için nitrojenin önemli bir kısmı sürekli olarak

uzaklaştırılır. Sistem 20 m^3/saat çürütme ürünü işleyebilmektedir. Çıkarılan nitrojen, %40 kuru madde içeriğine sahip nitrojen açısından zengin bir gübre olan amonyum sülfata dönüştürülür (German Biogas Association, 2018). Şekil 4.16'da tesiste kullanılan özel nitrojen sıyırıcıların görüntüsü ve Şekil 4.17'de tesisten çıkan amonyum sülfatın nütrient içeriği verilmiştir.



Şekil 4.16 Tesiste kullanılan özel nitrojen sıyırıcılar



Şekil 4.17 Tesisten çıkan amonyum sülfatın nütrient içeriği

5
TÜRKİYE'NİN DURUMU

5.1 Tesisler

Bölüm 1'de bahsedildiği üzere Türkiye'de 2019 yılında kayıtlı 100 adet biyogaz, biyokütle, atık ısı ve pirolitik yağ enerji santrali olduğu bilinmektedir. Bu bölümde organik atıkları işleyen tesisler açıklanacaktır.

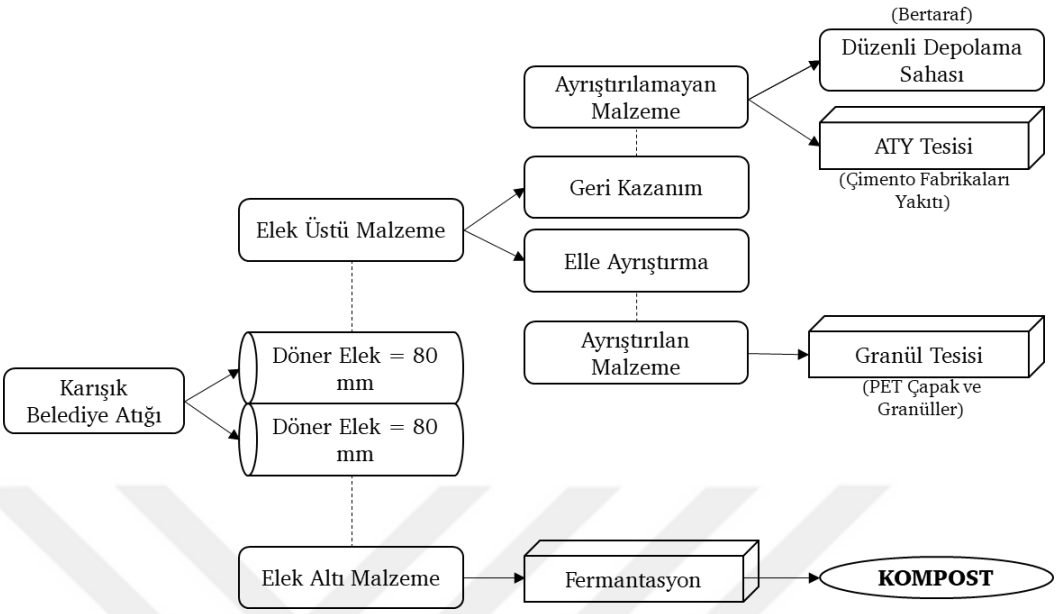
5.1.1 Kompost ve Geri Kazanım Tesisi

İstanbul-Kemerburgaz'da bulunan ve günlük 1.000 ton evsel katı atık işleme kapasitesine sahip olan Kompost ve Geri Kazanım Tesisi'nde yıllık ortalama 20.000 ton kompost-gübre üretilmektedir. Kompostlaştırma işlemi, katı atıkların içindeki organik kısımların (sebze/meyve atıkları, park/bahçe atıkları, yemek atıkları vb.) biyokimyasal süreçlerden geçirilmesi sonucu sterilize edilmiş maddeye dönüştürülmesi işlemidir. Bu maddeye ise kompost adı verilmektedir.

Bu tesise gelen karışık belediye atıkları, içindeki geri dönüştürülebilir atıklar (alüminyum, plastik, metal, demir, cam, kağıt, karton vb.) ayrıştırıldıktan sonra geriye kalan organik içerik fermentasyon işlemine tabi tutularak kompost üretilmektedir. Bu tesisten çıkan kompost İstanbul'daki park, bahçe ve yeşil alanlarda toprak iyileştirici olarak kullanılmaktadır.

Tesis 7 ana bölümden oluşmaktadır. Bunlar sırasıyla atık kabul bölümü, ön şartlandırma, ayırma, geri kazanılabilir malzemelerin geri kazanımı, ana çürüme fermantasyon, son şartlandırma kompost deposu ve atıksu drenajı/tasfiye bölümleridir. Kompostlaştırma işleminin temeli dekompozisyon işlemine dayanmaktadır. Yani ana çürüme fermantasyon kısmı asıl işlemin gerçekleştiği kısımdır. Organik atığı etkili bir biçimde dekompoze edebilmek için oksijen (aerobik ortam) ve suya ihtiyaç duyan mikroorganizma ve bakteriler kompost oluşumunda en önemli halkayı oluştururlar. Fermantasyon işleminin başarısı kompostlamayı gerçekleştiren organizmaların türüne bağlıdır. Bu olgunlaştırma işlemi yaklaşık 6-8 hafta sürmektedir.

Şekil 5.1'de Kompost ve Geri Kazanım Tesisi'ne ait akım şeması ve Şekil 5.2'de Kompost ve Geri Kazanım Tesisi'ne ait görüntüler verilmiştir.



Şekil 5.1 Kompost ve Geri Kazanım Tesisi akım şeması



Şekil 5.2 Kompost ve Geri Kazanım Tesisi

5.1.2 Kemerburgaz Biyometanizasyon Tesisi

İstanbul Avrupa Yakasında (Kısırmandıra) organik içerikli katı atıklardan (yemek atıkları, sebze-meyve atıkları, son kullanma tarihi geçmiş ambalajlı gıda atıkları gibi) oksijensiz (anaerobik) ortamda fermantasyon yöntemi ile biyogazdan elektrik enerjisi elde etmek amacıyla biyometanizasyon tesisi kurulmuştur. Tesis ilk aşamada, biyolojik prosese ön işlemden geçirilmiş 130 ton/gün organik atık beslenerek işletilmektedir. Daha sonra ilave bir hat vasıtası ile tehlikesiz atık geri kazanım kapasitesinin 350 ton/gün'e çıkarılması planlanmıştır. Tesis Kasım 2021 itibariyle işletmeye alınmıştır. Şekil 5.3'de tesisi ve yakın çevresini gösterir uydu görüntüsü ve Şekil 5.4'de tesisin son hali verilmiştir.

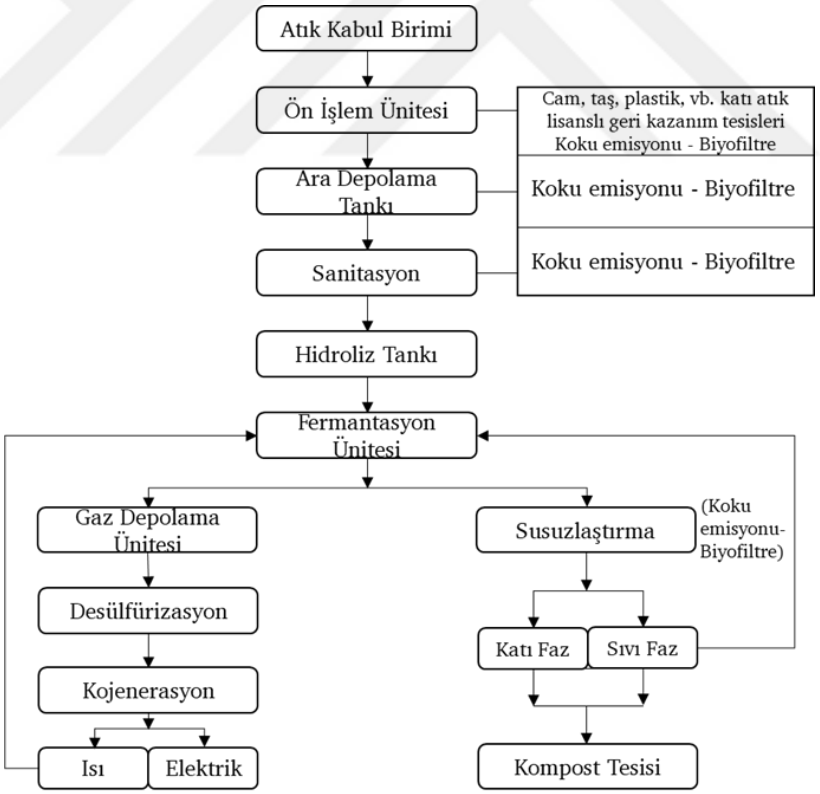


Şekil 5.3 Kemerburgaz Biyometanizasyon Tesisi'ni ve yakın çevresini gösteren uydu görüntüsü



Şekil 5.4 Kemerburgaz Biyometanizasyon Tesisi

Biyometanizasyon Tesisinde sadece kaynağında ayrılmış biyobozunur atıklar işlenmektedir. Tesis kapsamında kamyon vasıtası ile tesise getirilen atıklar, mekanik ayırma, eleme ve kum tutma gibi işlemlerin gerçekleştirileceği ön işleme ünitesinden geçirilerek biyogaz üretiminin sağlanacağı fermantasyon ünitesine alınmaya hazır hale getirilmektedir. Fermantasyon ünitesinde anaerobik şartlarda üretilecek biyogaz ise çift katlı bir membran balon içinde depolanarak ısı ve elektrik üretiminin gerçekleştirileceği kojenerasyon ünitelerine iletilmektedir. Fermantasyon ünitelerinden alınan fermente olmuş atık ise susuzlaştırma ünitesinden geçirilerek katı ve sıvı fazın ayrı şekilde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Oluşan sıvı fazın bir kısmı fermantasyon ünitesine tekrar beslenmekte olup, kalan sıvı faz ile katı faz proje sahasının güneyinde bulunan kompost tesisine gönderilmektedir. Oluşan katı ve sıvı faz içerik olarak oldukça zengin olup gübre veya toprak iyileştirici olarak kullanıma elverişlidir. Şekil 5.5'te tesisin akım şeması gösterilmektedir.



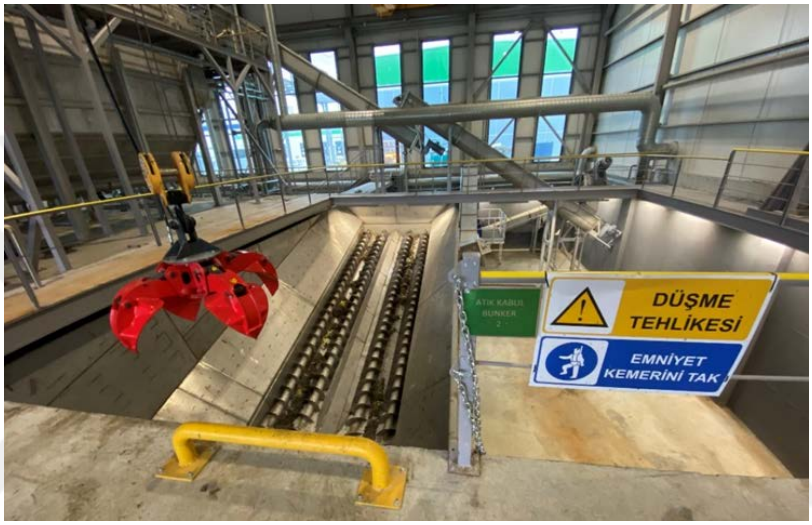
Şekil 5.5 Kemerburgaz Biyometanizasyon Tesisi akım şeması

Bu kısımda tesisin ana bölümlerinden atık kabul birimi, atık ön işleme ünitesi, hidroliz tankı, ana ve son çürütücü tankları ve gaz depolama ünitelerinin işlevlerinden bahsedilecektir.

5.1.2.1 Atık Kabul Birimi

Atık Kabul Birimi; kaynağında mümkün olduğunca ayrı toplanmış organik atıkların prosese girmeden önce bekletildiği ve tesise besleme yapıldığı yerdir.

Atık kabul birimi, tesise gelen organik atıkların en çok 1 gün süre ile biriktirilebileceği büyüklükte bir alandır. Tabanda atığın yeraltı suyu, kanalizasyon veya yer üstü suyuyla temas etmesini veya sızmasını engelleyecek şekilde zemin geçirimsizliği sağlanmıştır. Şekil 5.6'da atık kabul birimi gösterilmektedir.



Şekil 5.6 Kemerburgaz Biyometanizasyon Tesisi atık kabul birimi

5.1.2.2 Atık Ön İşleme Ünitesi

Ön işlemde atıklar, etkili bir anaerobik çürütme işlemi için homojen ve pompalanabilir bir bulamaç haline getirilmektedir. Bunun için tesise gelen organik atık, ön işleme ünitesinde ezme ve sıvılaştırma (karıştırma), ıslak eleme ve kum tutma gibi aşamalardan geçirilmektir. Ön işleme ünitesinin ana fonksiyonları şunlardır:

- Sisteme, biyolojik olarak parçalanabilir organik madde içeren temiz ve pompalanabilir organik bir bulamaç vermek için kirliliklerin (plastik, cam, taşlar, metaller vb.) atıktan ayırma işleminin gerçekleştirilmesi,
- Biyometanizasyon tesisini aşırı yıpranmalara karşı korumak için kum ve cam gibi safsızlıkların organik atıktan ayrılması ve
- Mevcut anaerobik çürütücülerdeki biyogaz debisini artırmak için atıkların etkin çözünmesini sağlamaya yönelik işlemden geçirilmesidir.

5.1.2.3 Hidroliz Tankı

Hidroliz aşamasında fermantatif ve hidrolitik bakteriler olarak isimlendirilen bakteri grupları organik maddenin üç temel öğesi olan karbon hidratları $(C_6H_{10}O_5)_n$, proteinleri ($6C_2NH_33H_2O$) ve yağları ($C_{50}H_{90}O_6$) parçalayarak CO_2, asetik asit ve büyük bir kısmını da çözülebilir uçucu organik maddelere dönüştürürler. Uçucu organik maddelerin büyük bir bölümünün uçucu yağ asitleri olması nedeniyle, bu aşamaya uçucu yağ asitlerinin [$CH_3(CH_2)_n$ COOH] oluşum aşaması adı da verilir. Şekil 5.7'de hidroliz tankı gösterilmiştir.



Şekil 5.7 Kemerburgaz Biyometanizasyon Tesisi hidroliz tankı

5.1.2.4 Ana Fermantasyon ve Son Fermantasyon Tankları

Biyometan üretimi fermantasyon (çürütücü) tanklarında gerçekleşir. Hidroliz tankında başlayan ve fermantasyon ünitesinde son bulan anaerobik fermantasyonun bu son aşamasında metanojenik (metan oluşturan) bakteri grupları devreye girmekte ve bir kısım metanojenik bakteriler CO_2 ve H_2'yi kullanarak metan (CH_4) ve su (H_2O) açığa çıkarırken diğer metanojenik bakteri grubu ise çıkan asetik asidi kullanarak CH_4 ve CO_2 oluşturmaktadırlar. Ancak bu aşamada birinci tepkime ile oluşan metan miktarı, ikinci tepkime ile elde edilen metan miktarından daha azdır. Üretilen tüm metanın %30'u birinci; %70'i ikinci tepkime yoluyla elde edilmektedir. Anaerobik fermantasyonun son aşamasında devreye giren ve metan oluşumunu sağlayan metan bakterileri, fermantasyon

ortamının sıcaklığına göre üç gruba ayrılır. Bunlar sakrofilik bakteriler (optimum faaliyet sıcaklığı 25 °C), mezofilik bakteriler (optimum faaliyet sıcaklığı 36 °C) ve termofilik bakterilerdir (optimum faaliyet sıcaklığı 55 °C). Sistemde bulunan her bir ana çürütücü, mezofilik koşullar (37 ila 42°C) altında çalışmaktadır. Ana çürütücülerde bekleme süresini dolduran malzeme pompa vasıtasıyla 3.500 m^3 hacmindeki son çürütücü tankına taşınmakta ve ortalama 5 gün boyunca son çürütücülerde bekletilmektedir. Ana çürütücü ve son çürütücü tanklardan boru hatlarıyla biyogaz toplanarak gaz depolama balonuna iletilmektedir. Şekil 5.8'de tesise ait son fermantasyon tankı gösterilmiştir.



Şekil 5.8 Kemerburgaz Biyometanizasyon Tesisi son fermantaayon tankı

5.1.2.5 Gaz Depolama Ünitesi

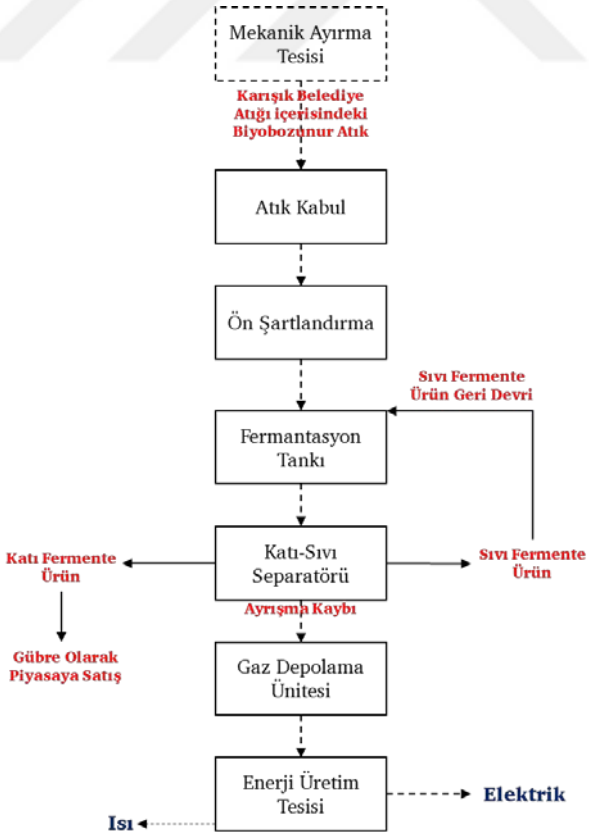
Üretilen biyogazın depolandığı, membran yüzeyle kaplı 2 adet balondan oluşan ünitedir. Çift membranlı olarak yapılan gaz balonları 1040 m^3 ve 3000 m^3 olmak üzere toplam 4040 m^3 hacme sahip olup 25 mbar basınç ile çalışmaktadır. Şekil 5.9'da gaz depolama ünitesi gösterilmiştir.



Şekil 5.9 Kemerburgaz Biyometanizasyon Tesisi gaz depolama ünitesi

5.1.3 Kömürcüoda Biyometanizasyon Tesisi

İstanbul Asya Yakası'nda bulunan Şile-Kömürcüoda mevkiinde bir adet Biyometanizasyon Tesisi kurulmuştur. Tesise gelen karışık belediye atıkları ön işlemden geçerek organik/biyobozunur (sebze, meyve atıkları, Pazar yeri atıkları, mutfak ve bahçe atıkları vb.) atıklar ayrıştırılarak biyometanizasyon tesisine gönderilmektedir. Tesise gelen ayrışmış atıklar anaerobik çürütücü tanklarında işlem görmekte ve işlem sonucunda biyometan elde edilmektedir. Hali hazırda tesiste 4 adet motor ünitesi çalışmaktadır ve toplam 12 adet motorun çalışması hedeflenmektedir. Tesisin kapasitesi 2.000 ton/gün'dür. Bu tesis ile Şile-Kömürcüoda Düzenli Depolama Sahası'na gönderilen belediye atığı önemli ölçüde azaltılmakta ve T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın depolama sahaları için istediği ön işlem şartı yerine getirilmektedir. Ayrıca tesiste kullanılacak enerji kaynağı biyokütle kapsamında olduğundan enerji üretimi Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması (YEKDEM) teşviklerinden faydalanmaktadır. Tesise ait akım şeması Şekil 5.10'da ve tesise ait fotoğraflar Şekil 5.11'de görülmektedir.



Şekil 5.10 Kömürcüoda Biyometanizasyon Tesisi akım şeması



Şekil 5.11 Kömürcüoda Biyometanizasyon Tesisi görüntüleri

5.2 Kemerburgaz Biyometanizasyon Tesisi Verileri

Bölüm 5.1.2'de bahsedilen Kemerburgaz Biyometanizasyon Tesisi, Kasım 2021'de faaliyete alınmıştır. Tesisin organik atık besleme için hesaplanan kapasitesi 175 ton/gündür fakat gelecek olan organik atığın ön işlemden geçmesi sonucunda organik atık besleme kapasitesi net 130 ton/gün olarak hesaplanmıştır. Tesiste hidroliz tankı, 1. ana çürütücü tankı, 2. ana çürütücü tankı ve son çürütücü tankı olmak üzere 4 adet anaerobik çürütücü tankı bulunmaktadır. Toplam 12.000 m3 anaerobik çamur hacmi mevcuttur. Tanklar 25 mbar ve 38-40 °C arasında işletilmektedir. Hidrolik bekleme süresi (HRT) toplam 30 gündür. Tablo 5.1'de tesise ait veriler verilmiştir.

Tablo 5.1 Kemerburgaz Biyometanizasyon Tesisi reaktör hacimleri

Reaktör	**Hacim (m^3)**
Hidroliz Tankı	1.500
Ana Çürütücü Tankı 1	3.500
Ana Çürütücü Tankı 2	3.500
Son Çürütücü Tankı	3.500
Toplam Hacim	**12.000**

Son çürütücüden çıkan çamur dekantörlerden geçerek katı ve sıvı faz olarak ayrılmaktadır. Şekil 5.12'de dekantörlerin görüntüsü verilmektedir.



Şekil 5.12 Kemerburgaz Biyometanizasyon Tesisi dekantör ünitesi

Tesiste santrifüj dekantör kullanılmakta olup kapasitesi 35 m^3/saat'tir. Susuzlaştırma ünitesinin yılda toplam 260 gün çalışması planlanmıştır. Fermente çamurun susuzlaştırma işlemine tabi tutulması ile yılda yaklaşık 229.000 ton sıvı faz oluşacağı ÇED dosyasında raporlanmıştır.

229.000 (ton /yıl) / 260 (gün/yıl) ≈ 881 ton/gün sıvı çamurun arıtılması beklenmektedir.

Dekantörün günde 8 saat çalışması öngörülerek;

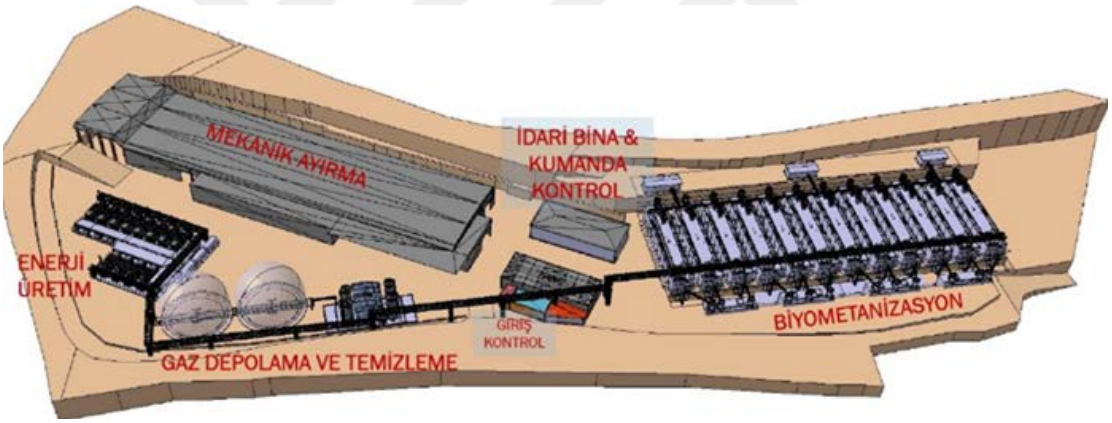
881 (ton/gün) / 8 (saat/gün) ≈ 110,1 ton/saat sıvı çamurun arıtılması gerekmektedir.

Oluşan sıvı fazın yıllık 200.000 tonluk kısmı geri devir ile tekrar fermantasyon ünitesine alınacak; 29.000 ton/yıllık kısmı ise proses suyu çıkış tankında biriktirilerek kompost tesisine gönderilecektir.

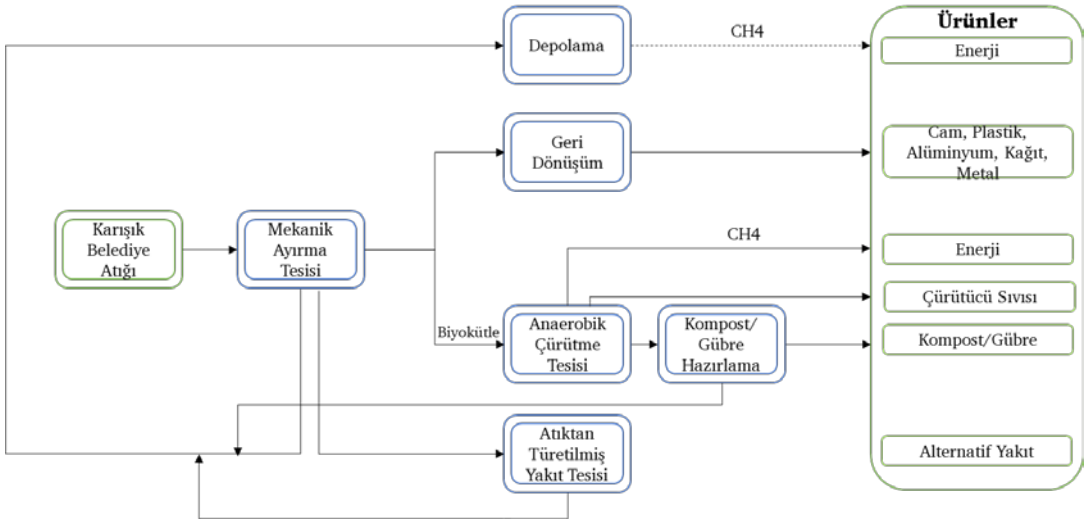
Elde edilen sıvı faz, düşük kuru madde içeriğine sahip gübre olarak kullanılabilir nitelikte olacaktır. Susuzlaştırma işleminden kalan katı madde ise bir helezon vasıtasıyla konteynerlere iletilecek, dolan konteynerler kamyonlara yüklenerek kompost tesisine sevk edilecektir.

5.3 Kömürcüoda Mekanik Ön İşlem ve Biyometanizasyon Tesisi Verileri

Bölüm 5.1.3'te bahsedilen Şile-Kömürcüoda Biyometanizasyon Tesisi, Mart 2021'de faaliyete alınmış olup organik atık besleme kapasitesi teorik olarak günde 1.200 tondur. Şu anda güncel olarak 800 ton/gün atık besleme kapasitesine sahiptir. Aynı yerde bulunan Mekanik Biyolojik Ön İşlem Tesisinin mekanik ayırma besleme kapasitesi ise teorik olarak 2.000 ton/gün'dür. Aktif olarak yaklaşık 1.600 ton/gün atık beslenmektedir. Biyometanizasyon Tesisi'nin kurulu gücü 18 MW olmakla birlikte toplam 12 adet motorla çalışma kapasitesine sahiptir. Şu anda aktif olarak 4 motor çalışmaktadır. Aynı zamanda günde 100 ton atıktan türetilmiş yakıt üretme gücüne de sahiptir. Şekil 5.13'de Şile-Kömürcüoda konumun genel yerleşim planı ve Şekil 5.14'te tesislerin akım şeması verilmektedir.



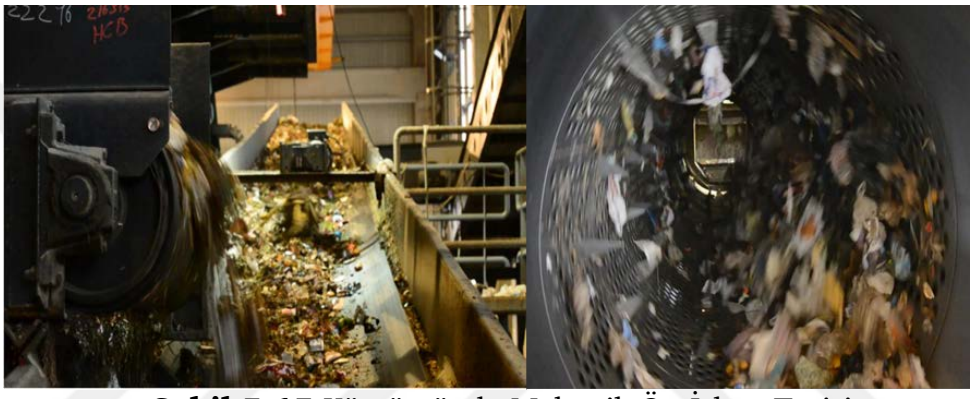
Şekil 5.13 Şile-Kömürcüoda konumunun genel yerleşim planı



Şekil 5.14 Şile-Kömürcüoda konumundaki tesislerin akım şeması

5.3.1 Kömürcüoda Mekanik Ön İşlem Tesisi Verileri

Kömürcüoda Düzenli Depolama Sahası'na Anadolu Yakasında yer alan tüm ilçelerden gelen atığın %30'luk kısmı Mekanik Ön İşlem Tesisi'ne gönderilmektedir. Mekanik Ayırma Tesisi'ne gelen karışık belediye atıkları içerisindeki biyobozunur atıklar Biyometanizasyon Tesisi'ne alınacak olup burada katı fermente ürün, sıvı fermente ürün ve biyogaz elde edilecektir. Elde edilen biyogaz, Elektrik Enerjisi Üretim Tesisi'nde gaz motorlarında yakılarak ısı ve elektrik elde edilecektir. Şekil 5.15'de ön işlem tesisine ait görüntüler bulunmaktadır.



Şekil 5.15 Kömürcüoda Mekanik Ön İşlem Tesisi

Mekanik Ayırma Tesisi' nde bulunan üniteler aşağıda verilmiştir.

- Atık Kabul Birimi
- Parmak Elekler
- Balistik Separatörler
- Optik Separatörler
- Balya Pres
- Ürün/Atık Biriktirme Alanı

Mekanik Ayırma Tesisi'nden Biyometanizasyon Tesisi'ne gönderilecek biyobozunur organik atık yüzdesi %51,49'dur. Yine Mekanik Ayırma Tesisi'nden çıkacak bakiye atık miktarı %17,56, geri dönüşümü/kazanımı mümkün olan atık miktarı %29,79'dur. Çıkacak olan tehlikeli atık miktarı ise %1,16 olarak kabul edilmiştir.

Mekanik Ön İşlem Tesisi'ne ait kütle-denge verileri Tablo 5.2'de verilmiş olup hesaplamalar güncel ve ÇED dosyası verilerine göre yapılmıştır.

Toplam Giren Karışık Belediye Atığı: 1.600 ton/gün

Çıkan Biyobozunur Atık: 1.600*51,49/100 = 823,84 ton/gün

Çıkan Bakiye Atık: 1.600*17,56/100 = 280,96 ton/gün

Çıkan Geri Dönüştürülebilir Atık: 1.600*29,79/100 = 476,64 ton/gün

Çıkan Tehlikeli Atık: 1.600*1,16/100 = 18,56 ton/gün

Toplam Giren = Toplam Çıkan

1.600 ton/gün = 823,84 + 280,96 + 476,64 + 18,56 = 1.600 ton/gün

Tablo 5.2 Kömürcüoda Mekanik Ayırma Tesisi kütle-denge sistemi

Giren	**Toplam Atık- %100**	Teorik: 2.000 ton/gün Güncel: 1.600 ton/gün
	Toplam	Teorik: 2.000 ton/gün Güncel: 1.600 ton/gün
Çıkan	**Biyobozunur Atık- %51,49**	Teorik: 1029.8 ton/gün Güncel: 823.84 ton/gün
	Bakiye Atık- %17,56	Teorik: 351.2 ton/gün Güncel: 280.96 ton/gün
	Geri Dönüşümü/Kazanımı Mümkün Atık- %29,79	Teorik: 595.8 ton/gün Güncel: 476.64 ton/gün
	Tehlikeli Atık- %1, 16	*%1,16 oranında tehlikeli atığın karışık belediye atığı içerisinde olduğu kabul edilerek bu değer hesaplama dışında tutulmuştur.
	Toplam	Teorik: 2.000 ton/gün Güncel: 1.600 ton/gün

5.3.2 Kömürcüoda Biyometanizasyon Tesisi Verileri

Bir önceki aşama olan Mekanik Ön İşlem Tesisi'nden Biyometanizasyon Tesisi'ne beslenen organik atık miktarı teorik olarak 1.200 ton/gün güncel olarak ise yaklaşık 800 ton/gün'dür. Hesaplamalar bu iki veriye ve ÇED dosyası verilerine göre yapılmıştır. Günlük olarak 800 ton organik atık beslenen tesiste, prosesteki sıcaklık ve reaktörün çalışmasını etkileyen diğer fiziksel çevre şartları ile proses sonucu metan gazı oluşması kütle kaybına sebebiyet vermektedir.

Kütle-denge verilerine bakacak olursak;

Toplam Giren Organik Atık: 800 ton/gün

Çıkan Katı Fermente Ürün: 800*27,30/100 = 218,4 ton/gün

Çıkan Sıvı Fermente Ürün: 800*36,35/100 = 290,8 ton/gün

Proses Kaybı: 800*36,35/100 = 290,8 ton/gün

Toplam Giren = Toplam Çıkan

800 ton/gün = 218,4 + 290,8 + 290,8 = 800 ton/gün

Tablo 5.3'de tesise ait kütle-denge sistemi verilmektedir.

Tablo 5.3 Kömürcüoda Biyometanizasyon Tesisi kütle-denge sistemi

Giren	**Mekanik Ayırma Tesisi 'nden Biyometanizasyon Tesisi 'ne Gelecek Biyobozunur Atık Miktarı**	Teorik: 1.200 ton/gün Güncel: 800 ton/gün
	Toplam	Teorik: 1.200 ton/gün Güncel: 800 ton/gün
Çıkan	**Katı Fermente Ürün- %27,3**	Teorik: 327.6 ton/gün Güncel: 218.4 ton/gün
	Sıvı Fermente Ürün- %36,35	Teorik: 436.2 ton/gün Güncel: 290.8 ton/gün
	Proses Kaybı- %36,35	Teorik: 436.2 ton/gün Güncel: 290.8 ton/gün
	Toplam	Teorik: 1.200 ton/gün Güncel: 800 ton/gün

Hesaplamalara göre tesisten çıkan toplam anaerobik çürüme maddesi;

Katı + Sıvı Fermente Ürün: 218,4 + 290,8 = 509,2 ton/gün'dür. Tesisin 332 gün aktif olarak çalışacağı ÇED dosyasında belirtilmiştir. Yıllık olarak üretilecek AÇM miktarı;

Yıllık AÇM miktarı: 509,2 ton/ gün * 332 gün/yıl = 169.054 ton/yıl olarak bulunmuştur. Tesisi işleten firma tarafından çıkan bu anaerobik çürüme maddesinin susuzlaştırılmasına, çıkan suyun prosese geri devrettirilmesine ve çıkan katı atığın ise Tarım ve Orman Bakanlığı tarafından çıkarılan Yönetmelik'teki şartları sağlayacak şekilde gübre olarak piyasada satışının yapılmasına karar verilmiştir.

5.4 Organik Atık Yönetimi ile İlgili Hedefler

Ülkemizde son yıllarda ortaya çıkan Sıfır Atık kavramının benimsenmesiyle atıkların ayrıştırılması ve bertarafına yönelik hedefler de bu doğrultuda şekillenmiştir. Bu hedeflere göre Sıfır Atık Yönetmeliği ile Ulusal Atık Yönetimi ve Eylem Planı (UAYP) hazırlanmıştır. Bu yönetmelik ve plan çerçevesinde kurum/kuruluşlar, hastaneler, restorantlar, belediyeler dahil birçok yerde Sıfır Atık Sistemi'nin kurulması gerekmektedir. Sıfır Atık Sistemi'ne göre cam, plastik, kağıt/karton, metal vb. geri dönüştürülebilir atıklar ayrıştırılmakta ve atık türüne göre geri dönüşümleri sağlanmaktadır. Dolayısıyla bu sistem kapsamında organik atıklar da ayrı toplanmalı ve geri kazanılmalıdır. Bu kısımda Sıfır Atık Sistemi'ne göre hazırlanan yönetmelik ve plan incelenecektir.

5.4.1 Sıfır Atık Yönetmeliği

12.07.2019 tarih ve 30829 sayılı Resmi Gazete' de yayınlanan ve T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından hazırlanan Sıfır Atık Yönetmeliği' nin amacı "*hammadde ve doğal kaynakların etkin yönetimi ile sürdürülebilir kalkınma ilkeleri doğrultusunda atık yönetimi süreçlerinde çevre ve insan sağlığının ve tüm kaynakların korunmasını hedefleyen sıfır atık yönetim sisteminin kurulmasına, yaygınlaştırılmasına, geliştirilmesine, izlenmesine, finansmanına, kayıt altına alınarak belgelendirilmesine ilişkin genel ilke ve esasların belirlenmesidir*" (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2019).

Sıfır Atık; israfın önlenmesini, kaynakların daha verimli kullanılmasını, atık oluşumunun en aza indirgenmesini, atığın kaynağında ayrı toplanması ve geri kazanımının sağlanmasını kapsayan bir atık yönetimi hedefidir. Atıkların geri dönüşüm/kazanım sürecinden geçmeden bertaraf edilmesi ciddi şekilde kaynak israfına yol açmaktadır. Bu durum göz önüne alındığında, doğal kaynakların verimli kullanılmasının önemi ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle son yıllarda tüm dünyada sıfır atık uygulama çalışmaları hem bireysel hem kurumsal hem de belediyeler genelinde yaygınlaşmaktadır.

5.4.2 Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik

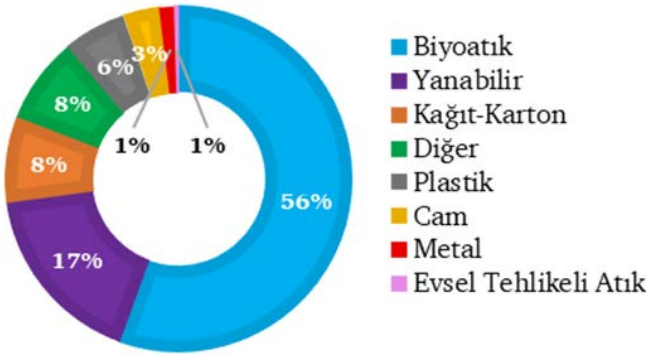
26.03.2010 tarih ve 27533 sayılı Resmî Gazete'de yayınlanan ve T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından hazırlanan Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmeliği'nde 26.12.2019 tarih ve 30990 sayılı Resmi Gazete'de çıkan yönetmelik ile bu yönetmelikte bulunan biyobozunur atık azaltımı maddesinde *"belediye atıklarının sıfır atık yönetim sistemine uygun olarak geri kazanımının sağlanması amacıyla çevre ile uyumlu fiziksel, kimyasal, biyolojik veya termal teknolojilerin kullanılması esastır. Bu teknolojilerin kullanıldığı ön işlem tesisleri ve kapasiteleri, 2035 yılında toplanan belediye atığı miktarının ağırlıkça en az %60'ı geri kazanılabilecek şekilde teşkil edilir."* denmektedir (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2019).

5.4.3 Ulusal Atık Yönetimi ve Eylem Planı (UAYP)

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından doğal kaynakların korunup ekosistemlerin geliştirilmesi ile gelecek nesillere yaşanabilir bir çevre bırakılmasını sağlamak üzere; sürdürülebilirlik ilkesi çerçevesinde, uluslararası normlar ve ulusal öncelikler gözetilerek, strateji ve mevzuat geliştirme, atıkların kaynağında en aza indirilmesi, sınıflara ayrılması, toplanması, taşınması, geçici depolanması, geri kazanılması, bertaraf edilmesi, yeniden kullanılması, arıtılması, enerjiye dönüştürülmesi ve nihai depolanması konularında politika ve strateji belirleme sorumluluğu çerçevesinde 2016-2023 yıllarını kapsayan Ulusal Atık Yönetimi ve Eylem Planı hazırlanmıştır.

Ulusal Atık Yönetimi ve Eylem Planı'nda atık yönetimine ilişkin 81 ilde atık yönetiminin mevcut durumu analiz edilerek, atıkların türlerine göre kaynağında ayrı toplanması, geri dönüştürülmesi, farklı yöntemlerle geri kazanılması ve bertaraf yöntemleri ortaya konulmuş; atık yönetim sisteminde iyileştirilmesi veya geliştirilmesi gereken hususlar, nüfus ve atık projeksiyonları, 2023 yılına kadar yapılması planlanan dönemsel atık yönetim faaliyetleri ile atık yönetimine yönelik yatırımlar ve finansman ihtiyaçları belirlenmiştir. Organik atıklara yönelik olarak bu planda biyobozunur atıkların nasıl değerlendirilebileceği de yer almaktadır. Biyometanizasyon, kompost ve mekanik biyolojik prosesler gibi arıtma yöntemlerinin detaylarını bulmak mümkündür.

Mevcut plana göre Türkiye'de oluşan atıkların %87'sinin belediye atığı olduğu Şekil 2.5'te gösterilmişti. Atık karakterizasyonu ise Şekil 5.16'da gösterildiği gibidir. Güncel durumda Türkiye'de oluşan atıkların yaklaşık %56'sı biyoatık yani organik/biyobozunur atıklardan oluşmaktadır.



Şekil 5.16 Türkiye katı atık karakterizasyonu

Ulusal yönetmelikler ve planlara göre, biyoatıkların depolama sahalarına gönderimini azaltmaya ve ikili toplama sisteminin verimli şekilde hayata geçirilmesi ile geri kazanım oranlarının artırılmasına yönelik atık yönetim planlamaları yapılmalıdır.

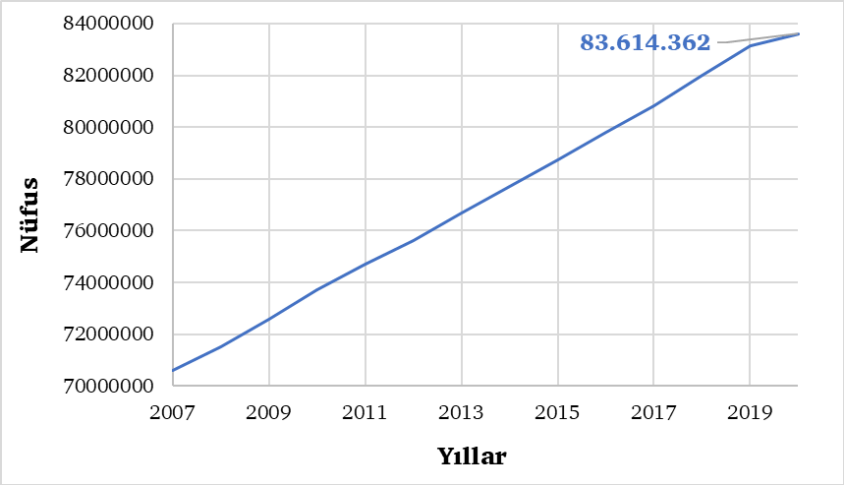
Bu eylem planına göre mevcut durumda, kaynağında ayrı toplanmış organik atıkların işlendiği ve biyolojik proseslerin uygulandığı 8 adet tesis bulunmaktadır. Amasya, Aydın, Balıkesir, Çanakkale, Denizli, Kütahya illerinde Kompost; Kocaeli ve Sakarya illerinde ise Biyometanizasyon prosesi kullanılmıştır. Karışık belediye atıklarının işlendiği 6 adet Mekanik Biyolojik İşlem (MBT) Tesisi bulunmaktadır. Bunlar, İstanbul'da 2 adet MBT (kompost ve biyokurutma prosesi), Ankara, Adana ve Samsun'da 4 adet MBT tesisi (biyometanizasyon prosesi) şeklindedir (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2017).

5.5 2035 Yılı İçin Projeksiyonlar

Bu kısımda Ulusal Atık Yönetimi ve Eylem Planı (2016-2023)'nda bulunan verilere ve hazırlık aşamasında olan Ulusal Atık Yönetimi ve Eylem Planı (2023-2035)'nın 2035 hedeflerine göre gelecek projeksiyonları yapılacaktır.

5.5.1 Nüfus Projeksiyonu

Hesaplamalara başlarken öncelikle Türkiye nüfus tahminleri için 2007 yılı başlangıç yılı olarak kabul edilmiştir. 2007 yılı öncesi nüfus sayımları dikkate alınmamıştır. 2007-2020 yılları arasında yapılan Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi (ADNKS) verileri incelenerek hesaplamalar yapılmıştır. Bu amaçla, Türkiye'ye ait il bazında TÜİK nüfus verileri kullanılmış; iller bankası, geometrik artış yöntemi, aritmetik artış yöntemi ve Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı (UNDP) nüfus artış yaklaşımları uygulanarak analiz edilmiştir. Tablo 5.4'te 2007-2020 yılları arası Türkiye nüfus verileri tablo halinde ve Şekil 5.17'de ise grafik halinde verilmiştir.



Şekil 5.17 2007-2020 yılları arası Türkiye nüfusu

Tabla 5.4 2007-2020 yılları arası TÜİK'e ait Türkiye nüfus verileri

Yıllar	Nüfus Verileri (TÜİK)
2007	70.586.256
2008	71.517.100
2009	72.561.312
2010	73.722.988
2011	74.724.269
2012	75.627.384
2013	76.667.864
2014	77.695.904
2015	78.741.053
2016	79.814.871
2017	80.810.525
2018	82.003.882
2019	83.154.997
2020	83.614.362

5.5.1.1 İller Bankası Yöntemi

Yürürlükte olan iller bankası içme suyu talimatnamesine göre yerleşim merkezlerinin içme suyu ve kanalizasyon projelerinin hazırlanmasında esas olan gelecekteki nüfusları hesaplanır.

5.5.1.2 Geometrik Artış Yöntemi

Nüfus artış hızı nüfusun logaritmik bir fonksiyonu olarak ifade edilir. Geometrik artış metodunda toplum nüfusunun birim zamandaki artışının toplumun nüfusu ile orantılı olduğu kabul edilmiştir.

5.5.1.3 Aritmetik Artış Yöntemi

Bu metotta nüfusun birim zamandaki artışının sabit kaldığını ifade eden bir matematiksel model kullanır. Yani dt gibi bir zaman aralığında dy gibi bir nüfus artışı söz konusu ise nüfus artış hızı olan dy/dt sabit olup; Ka "aritmetik artış sabiti" ile ifade edilir.

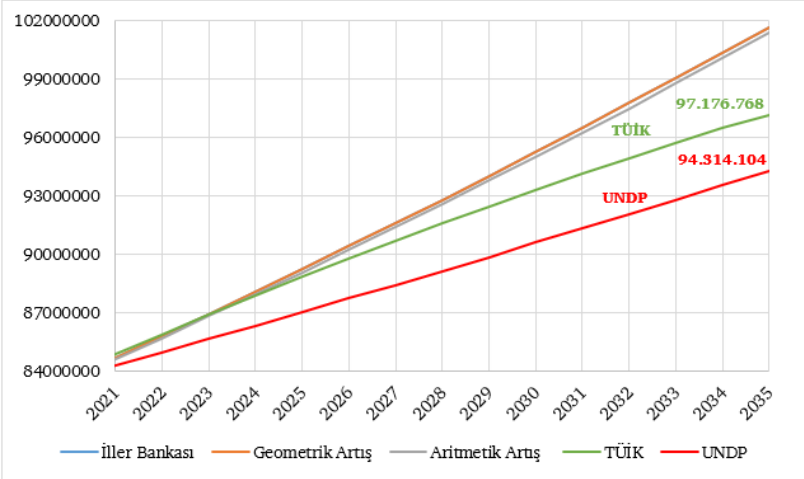
5.5.1.4 UNDP Yöntemi

Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı (UNDP) çerçevesinde çeşitli demografik ve sosyo-ekonomik faktörler göz önünde tutularak, dünya ülkelerinin 2020-2050 dönemindeki genel nüfus artış hızlarını gösteren beşer yıllık dönemler halinde yıllık ortalama artış hızları hesaplanmıştır. Birleşmiş Milletler Nüfus Birimi tarafından yayınlanan bu nüfus artış hızları tahminleri yüksek, orta ve düşük olmak üzere farklı senaryoları içermekte ve farklılık göstermektedir. Türkiye'nin 2035 yılına kadar olan nüfusları, UNDP tarafından öngörülen artış hızları kullanılarak hesaplanmıştır.

5.5.1.5 Seçilen Nüfus Projeksiyonu

2020 yılı ADNKS verilerine göre Türkiye'nin nüfusu 83.614.362 kişidir. Nüfus trendi yıllara göre artış gösterse de artış oranının düşük olduğu görülmektedir. 2007 ve sonrasında uygulanan adrese dayalı nüfus verileri dikkate alındığında 2035 yılında Türkiye nüfusunun yaklaşık 95-100 milyon aralığında kalması beklenmektedir. TÜİK tahminlerine göre Türkiye nüfusunun 2035 yılında 97.176.768 kişi olması beklenmektedir. TÜİK'in gelecek 20 yıl projeksiyonu irdelendiğinde, nüfus tahminlerinin UNDP yaklaşım değerine yakın olduğu

görülmektedir. UNDP yaklaşımına göre 2035 yılı için Türkiye nüfus tahmini 94.314.104 kişidir. Tablo 5.5'de hesaplama yöntemlerine göre 2035 nüfus projeksiyonu ve Şekil 5.18'de tüm yöntemlerin grafiği gösterilmiştir.



Şekil 5.18 Nüfus tahmin yöntemlerinin karşılaştırılması

Tablo 5.5 Hesaplama yöntemlerine göre 2035 nüfus projeksiyonu

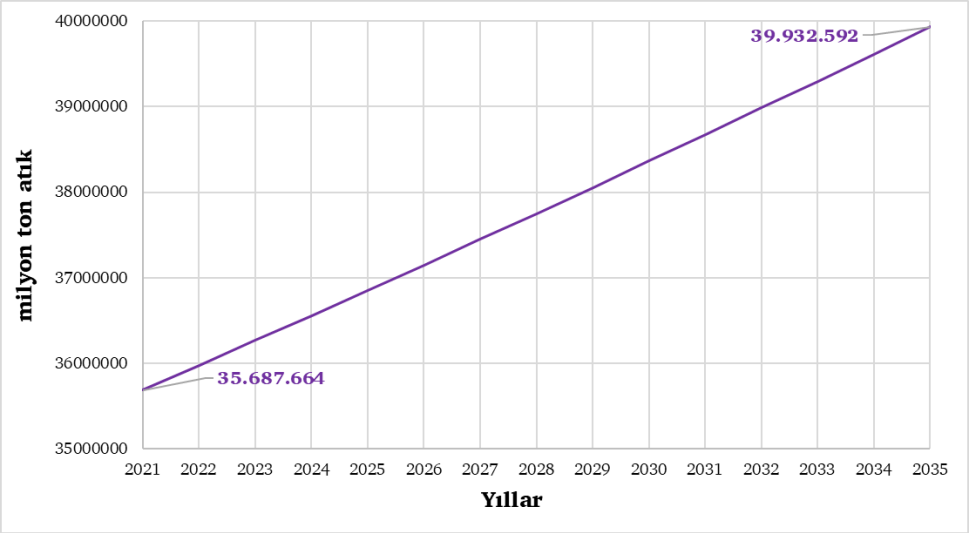
Hesaplama Yöntemi	**2035 Nüfusu**
İller Bankası	101.666.261
Geometrik Artış	101.666.324
Aritmetik Artış	98.646.792
UNDP	94.314.104
TÜİK	97.176.768

5.5.2 Organik Atık Projeksiyonu

Türkiye geneli belediye atığı üretim tahminleri ülke geneli için hesaplanan nüfus tahminleri ve kişi başı atık miktarları dikkate alınarak belirlenmiştir. TÜİK verilerine göre katı atık üretim oranları ülke için günde kişi başına 1,16 kg olarak hesaplanmıştır. Türkiye genelindeki durum incelendiğinde, 2018 yılında toplam 32,21 milyon ton kentsel katı atık üretildiği raporlanmıştır. Günümüzden 2035 yılına kadar olan belediye atığı üretim projeksiyonları Tablo 5.6'da verilmiştir. Bu tabloya göre 2035 yılında ülke bazında yıllık yaklaşık 40 milyon ton kentsel katı atık oluşması beklenmektedir. Şekil 5.19'da ise tahmini belediye atığı miktarı grafiği verilmiştir.

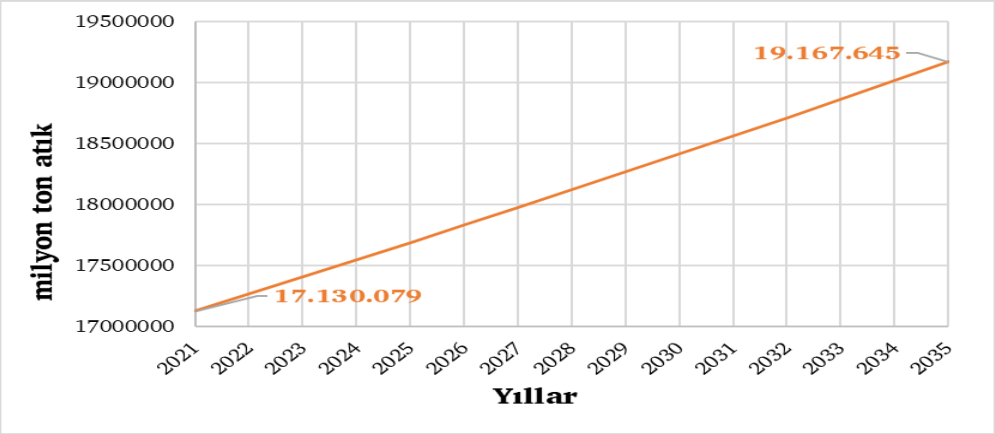
Tablo 5.6 2021-2035 yılları arası oluşması beklenen belediye atığı miktarları

Yıllar	Oluşması tahmin edilen belediye atığı miktarı (milyon ton/yıl)
2021	35.687.664
2022	35.975.306
2023	36.265.268
2024	36.557.566
2025	36.852.220
2026	37.149.249
2027	37.448.672
2028	37.750.509
2029	38.054.778
2030	38.361.499
2031	38.670.693
2032	38.982.379
2033	39.296.578
2034	39.613.308
2035	39.932.592



Şekil 5.19 Tahmini belediye atığı miktarları

Bu projeksiyonlara göre 2035 yılına göre oluşacak organik/biyobozunur atıkları bulmak mümkündür. Günümüz atık karakterizasyonu Şekil 5.16'da gösterilmişti. Mevcut durumda belediye atığının yaklaşık %56'lık kısmı organik yani biyobozunur atıklardan oluşmaktadır. Mevcut durumda biyobozunur atıkların arıtılması için yeni yapılan ve yapılması planlanan kompost, biyometan vb. tesislerin varlığı göz önünde bulundurularak önümüzdeki yıllarda bu organik atık miktarının %48'e düşeceği kabulü yapılarak gelecek projeksiyonları hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalarda 2035 yılında yıllık 19 milyon ton organik atık oluşacağı hesaplanmıştır. 2021-2035 yılları arası yapılan projeksiyon Tablo 5.7'de bulunmaktadır. Projeksiyonun grafiği ise Şekil 5.20'de verilmiştir.



Şekil 5.20 Tahmini organik atık miktarları

Tablo 5.7 2021-2035 yılları arasında oluşması beklenen organik atık miktarları

Yıllar	Oluşması beklenen organik atık miktarı (milyon ton/yıl)
2021	17.130.079
2022	17.268.148
2023	17.407.329
2024	17.547.633
2025	17.689.067
2026	17.831.640
2027	17.975.364
2028	18.120.245
2029	18.266.294
2030	18.413.520
2031	18.561.934
2032	18.711.543
2033	18.862.358
2034	19.014.389
2035	19.167.645

5.5.3 Tesis Projeksiyonları

UAYP'ye göre bir şehirde biyometanizasyon tesisi kurmanın fizıbıl olabilmesi için o şehirde en az 100 ton/gün veya 365.000 ton/yıl kaynağında ayrı toplanmış biyobozunur atık üretilmesi gerekmektedir. 2023 ve 2035 yılları atık yönetiminde öncelikli hedefler atık miktarının azaltılması, kaynağında ayrı toplamanın yaygınlaştırılması, geri kazanıma yönlendirilen atık miktarının artırılması ile depolama sahasına gönderilen organik atık miktarının azaltılmasıdır.

Bu kısımda UAYP'de detaylandırılan coğrafi bölgeler ile özelliklerine göre seçilmiş ve büyükşehir olan toplam 12 İl'in tesis projeksiyonları yapılacaktır.

5.5.3.1 Marmara Bölgesi

Marmara Bölgesi'nde bulunan 5 adet büyükşehir projeksiyon için seçilmiştir. Bunlar İstanbul, Kocaeli, Sakarya, Bursa ve Balıkesir'dir.

- **İstanbul**

İstanbul'un Türkiyenin en fazla atık üreten ili olduğu bilinmektedir. 2020 TÜİK verilerine göre Türkiye'de oluşan atığın %22'si İstanbul'a aittir. Bu yaklaşım varsayılarak 2035 yılında üretilmesi beklenen yıllık 39.932.532 milyon ton atığı bin ton/gün cinsine çevirecek olursak;

39.932.532/365/1000 = 109.404 ton/gün

Bu atığın %22'sini alırsak;

109.404 * 0,22 = 24.069 ton/gün

2035 yılında İstanbul'da günlük 24.069 ton atık toplanması beklenmektedir. İstanbul İl Sıfır Atık Yönetim Sistemi Planında bulunan atık karakterizasyonuna göre toplanan atığın %48,27'si organik atıklardan oluşmaktadır.

24.069 * 0,4827 = 11.618 ton/gün organik atık toplanacak.

Oluşan bu organik atığın yaklaşık %17'sinin ise biyometanizasyona gönderilmesi planlanmıştır.

11.618 * 0,17 = 1.936 ton/gün biyometanizasyona gönderilecektir.

İstanbul'un Avrupa Yakası'nda bulunan ve kaynağında ayrı toplanmış biyobozunur atıkların işlendiği Kemerburgaz Biyometanizasyon Tesisi'nin mevcut kapasitesi 130 ton/gün'dür. İstanbul'un nüfus artışı ve buna bağlı olarak organik atık artışı göz önünde bulundurularak tesis kapasitesinin net 350 ton/gün olması için planlamalar yapılmıştır.

İstanbul'un Anadolu Yakası'nda bulunan ve karışık belediye atıklarının işlendiği Kömürcüoda Biyometanizasyon Tesisi'nin mevcut kapasitesi 1.200 ton/gün'dür.

Mevcut durumda toplam biyometanizasyon kapasitesi;

350 + 1.200 = 1.550 ton/gün

2035 yılında oluşacak organik atık göz önüne alınarak toplam kapasitenin 2.000 ton/gün olması planlanmıştır.

- **Bursa**

2020 TÜİK verilerine göre Bursa'da 1.167.046 ton/yıl atık üretilmiştir. Bu da Türkiye'de üretilen belediye atığının %3,61'ine tekabül etmektedir. Bursa Büyükşehir Belediyesi'nin İSTAÇ A.Ş. ile yapmış olduğu "Entegre Katı Atık Yönetim Planı"na göre Bursa'da 2035 yılında biyobozunur organik atık yüzdesinin %51,61 olacağı öngörülmektedir (İSTAÇ A.Ş., 2015). Bu yaklaşım varsayılarak 2035 yılında üretilmesi beklenen 109.404 ton/gün atığın %3,61'i alınırsa;

109.404 * 0,0361 = 3.950 ton/gün atık toplanması hedeflenmektedir.

3.950 * 0,5161 = 2.039 ton/gün

Oluşan bu organik atığın yaklaşık %17'sinin ise biyometanizasyona gönderilmesi planlanmıştır.

Bursa Büyükşehir Belediyesi, nihai bertaraf edilecek atık miktarının azaltılması amacıyla yeni entegre katı atık yönetim sistemi kurulmasına karar vermiştir. Tesise gelen karışık belediye atıkları Mekanik Ayırma Tesisi'nde cinslerine göre ayrıldıktan sonra biyobozunur atıkların bir kısmı Biyometanizasyon Tesisi'ne, bir kısmı Düzenli Depolama Alanı'na yönlendirilmesi planlanmıştır. Tesiste bulunacak 5 anaerobik çürütücü tankı ile kapasitenin 669 ton/gün olması planlanmaktadır

(İTÜ, 2021). Bu tesisle birlikte biyobozunur atık miktarının önemli ölçüde azalması beklenmektedir.

2.039 * 0,17 = 346,5 ton/gün organik atık biyometanizasyona gönderilecektir.

Planlanan 669 ton/gün kapasite 2035 yılı için yeterli olacaktır.

- **Kocaeli**

2020 TÜİK verilerine göre Kocaeli'nde 713.431 ton/yıl atık üretilmiştir. Bu da Türkiye'de oluşan atığın %2,2'sine denk gelmektedir. Kocaeli Büyükşehir Belediye'sinin yapmış olduğu katı atık karakterizasyonuna göre oluşan atığın %40,9'u organik atıklardan oluşmaktadır (Yenice, Doğruparmak, & Durmuşoğlu, 2009). Bu yaklaşım varsayılarak 2035 yılında üretilmesi beklenen 109.404 ton/gün atığın %2,2'si alınırsa;

109.404 * 0,022 = 2.406,88 ton/gün atık toplanması hedeflenmektedir.

2,406.88 * 0,409 = 984 ton/gün

Oluşan bu organik atığın yaklaşık %17'sinin ise biyometanizasyona gönderilmesi planlanmıştır.

Kocaeli'nde bulunan Biyometanizasyon Tesisi'nin kapasitesi yaklaşık olarak 30 ton/gün'dür (9.600 ton/yıl) (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2017).

984 * 0,17 = 167,28 ton/gün

Mevcut tesisin kapasitesi 170 ton/gün'e çıkartılmalıdır.

- **Balıkesir**

2020 TÜİK verilerine göre Kocaeli'nde 511.344 ton/yıl atık üretilmiştir. Bu da Türkiye'de oluşan atığın %1,58'ine denk gelmektedir. Balıkesir'de yapılan katı atık karakterizasyonuna göre oluşan atığın %50,43'ü organik atıklardan oluşmaktadır (Yılmaz M. , 2019). Bu yaklaşım varsayılarak 2035 yılında üretilmesi beklenen 109.404 ton/gün atığın %1,58'i alınırsa;

109.404 * 0,0158 = 1.730 ton/gün atık toplanması hedeflenmektedir.

1.730 * 0,5043 = 872 ton/gün organik atık

Oluşan bu organik atığın yaklaşık %17'sinin ise biyometanizasyona gönderilmesi planlanmıştır.

872 * 0,17 = 148,24 ton/gün organik atık

Balıkesir'e toplam 150 ton/gün kapasiteli 1 adet Biyometanizasyon Tesisi yapılması planlanmıştır.

- **Sakarya**

2020 TÜİK verilerine göre Sakarya'da 370.840 ton/yıl atık üretilmiştir. Bu da Türkiye'de oluşan atığın %1,15'ine denk gelmektedir. Sakarya İl Sıfır Atık Yönetim Sistemi Planı'nda (Sakarya Çevre, Şehircilik ve İklim İl Müdürlüğü, 2020) bulunan katı atık karakterizasyonuna göre oluşan atığın %47'si organik atıklardan oluşmaktadır. Bu yaklaşım varsayılarak 2035 yılında üretilmesi beklenen 109.404 ton/gün atığın %1,15'i alınırsa;

109.404 * 0,0115 = 1.255 ton/gün atık toplanması hedeflenmektedir.

1.255 * 0,47 = 590 ton/gün organik atık

Oluşan bu organik atığın yaklaşık %17'sinin ise biyometanizasyona gönderilmesi planlanmıştır.

590 * 0,17 = 100 ton/gün organik atık

Sakarya'da bulunan Biyometanizasyon Tesisi'nin kapasitesi yaklaşık olarak 30 ton/gün'dür (9.600 ton/yıl) (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2017).

Toplam kapasitenin 100 ton/güne çıkartılması için 70 ton/gün kapasite artışı planlanmıştır.

5.5.3.2 Ege Bölgesi

Ege Bölgesi'nde bulunan İzmir projeksiyon için seçilmiştir.

2020 TÜİK verilerine göre İzmir'de 2.336.954 ton/yıl atık üretilmiştir. Bu da Türkiye'de oluşan atığın %7,23'üne denk gelmektedir. İzmir İl Sıfır Atık Yönetim Sistemi Planı'nda (İzmir Çevre, Şehircilik ve İklim İl Müdürlüğü, 2020) bulunan katı atık karakterizasyonuna göre oluşan atığın %54,36'sı organik atıklardan oluşmaktadır. Bu verileri birleştirecek olursak 2035 için;

109.404 * 0,0723 = 7.910 ton/gün

7.910 * 0,5436 = 4.300 ton/gün organik atık toplanması hedeflenmektedir.

Oluşan bu organik atığın yaklaşık %17'sinin ise biyometanizasyona gönderilmesi planlanmıştır.

4.300 * 0,17 = 731 ton/gün organik atık

İzmir Entegre Katı Atık Yönetim Planı kapsamında Ödemiş'te kurulması planlanan 1.600 ton/gün kapasiteli Biyometanizasyon Tesisi, Menderes'te 1.200 ton/gün kapasiteli Biyometanizasyon Tesis ve Bergama'da kurulması planlanan 800 ton/gün kapasiteli Biyometanizasyon Tesisi sayesinde İzmir'in kurulu biyometanizasyon kapasitesi toplam 3.600 ton/gün'dür (İTÜ, 2021). Tesislere gelen atığın %15'inin biyometanizasyona gönderileceği kabulü ile;

3.600 * 0,15 = 540 ton/gün atık işleme kapasitesi

2035 yılına kadar kurulması planlanan üç tesisin kapasitesi toplam 750 ton/gün'e çıkartılmalıdır.

5.5.3.3 Akdeniz Bölgesi

Akdeniz Bölgesi'nde bulunan Adana projeksiyon için seçilmiştir.

2020 TÜİK verilerine göre Adana'da 799.951 ton/yıl atık üretilmiştir. Bu da Türkiye'de oluşan atığın %2,5'ine denk gelmektedir. Adana İl Sıfır Atık Yönetim Planı'nda (Adana Çevre, Şehircilik ve İklim İl Müdürlüğü, 2020) bulunan katı atık karakterizasyonuna göre oluşan atığın %61,21'i organik atıklardan oluşmaktadır. Bu verileri birleştirecek olursak 2035 için;

109.404 * 0,025 = 2.707,5 ton/gün

2.707,5 * 0,6121 = 1.657 ton/gün organik atık toplanması hedeflenmektedir.

Oluşan bu organik atığın yaklaşık %17'sinin ise biyometanizasyona gönderilmesi planlanmıştır.

1.657 * 0,17 = 282 ton/gün organik atık

Adana'nın Sofulu ilçesinde bulunan Entegre Katı Atık Tesisi'nin kapasitesi günlük 2.000 ton olup organik atık işleme kapasitesi 1.500 ton/gün'dür (ITC, 2022). 2035 yılına kadar tesisin kapasitesi yeterlidir.

5.5.3.4 İç Anadolu Bölgesi

İç Anadolu Bölgesi'nde bulunan 3 adet büyükşehir projeksiyon için seçilmiştir. Bunlar Ankara, Eskişehir ve Konya'dır.

- **Ankara**

2020 TÜİK verilerine göre Ankara'da 2.126.019 ton/yıl atık üretilmiştir. Bu da Türkiye'de oluşan atığın %6,57'sine denk gelmektedir. Ankara İl Çevre Durumu Raporu'nda (Ankara Çevre, Şehircilik ve İklim İl Müdürlüğü, 2020) bulunan katı atık karakterizasyonuna göre oluşan atığın %44,5'i organik atıklardan oluşmaktadır. Bu verileri birleştirecek olursak 2035 için;

109.404 * 0,0657 = 7.195 ton/gün

7.195 * 0,445 = 3.202 ton/gün organik atık toplanması hedeflenmektedir.

Oluşan bu organik atığın yaklaşık %17'sinin ise biyometanizasyona gönderilmesi planlanmıştır.

3.202 * 0,17 = 544 ton/gün organik atık

Mamak'ta bulunan Entegre Katı Atık Tesisi'nin günlük atık alma kapasitesi 1.500 ton/gün ve Sincan'da bulunan Entegre Katı Atık Tesisi'nin günlük atık alma kapasitesi 4.000 ton/gün'dür (ITC, 2022). Toplam 5.500 ton/gün atık alma kapasitesine sahip bu tesislere gelen atığın %15'inin biyometanizasyon tesislerine gittiği kabulü ile mevcut biyometanizasyon kapasitesi;

5.500 * 0,15 = 825 ton/gün'dür.

2035 yılına kadar tesisin kapasitesi yeterlidir.

- **Eskişehir**

2020 TÜİK verilerine göre Eskişehir'de 327.869 ton/yıl atık üretilmiştir. Bu da Türkiye'de oluşan atığın %1,01'ine denk gelmektedir. Eskişehir İl Çevre Durumu Raporu'nda (Eskişehir Çevre, Şehircilik ve İklim İl Müdürlüğü, 2020) bulunan katı

atık karakterizasyonuna göre oluşan atığın %48'i organik atıklardan oluşmaktadır. Bu verileri birleştirecek olursak 2035 için;

109.404 * 0,0101 = 1.110 ton/gün

1.110 * 0,48 = 533 ton/gün organik atık toplanması hedeflenmektedir.

Oluşan bu organik atığın yaklaşık %17'sinin ise biyometanizasyona gönderilmesi planlanmıştır.

533 * 0,17 = 91 ton/gün organik atık

Eskişehir'de bulunan Entegre Katı Atık Tesisi'nin günlük atık alma kapasitesi 900 ton/gün'dür (ITC, 2022). Bu tesise gelen atığın %15'inin biyometanizasyon tesisine gittiği kabulü ile mevcut biyometanizasyon kapasitesi;

900 * 0,15 = 135 ton/gün'dür.

2035 yılına kadar tesisin kapasitesi yeterlidir.

- **Konya**

2020 TÜİK verilerine göre Konya'da 920.552 ton/yıl atık üretilmiştir. Bu da Türkiye'de oluşan atığın %2,85'ine denk gelmektedir. Konya İl Çevre Durumu Raporu'nda (Konya Çevre, Şehircilik ve İklim İl Müdürlüğü, 2020) bulunan katı atık karakterizasyonuna göre oluşan atığın %44,85'i organik atıklardan oluşmaktadır. Bu verileri birleştirecek olursak 2035 için;

109.404 * 0,0285 = 3.116 ton/gün

3.116 * 0,4485 = 1.397 ton/gün organik atık toplanması hedeflenmektedir.

Oluşan bu organik atığın yaklaşık %17'sinin ise biyometanizasyona gönderilmesi planlanmıştır.

1.397 * 0,17 = 238 ton/gün organik atık

Konya'da mevcut durumda Biyometanizasyon Tesisi bulunmamaktadır. Bundan dolayı toplam 250 ton/gün kapasiteli 1 adet biyometanizasyon tesisi kurulması planlanmıştır.

5.5.3.5 Karadeniz Bölgesi

Karadeniz Bölgesi'nde bulunan 2 adet büyükşehir projeksiyon için seçilmiştir. Bunlar Ordu ve Samsun'dur.

- **Ordu**

2020 TÜİK verilerine göre Ordu'da 241.859 ton/yıl atık üretilmiştir. Bu da Türkiye'de oluşan atığın %0,75'ine denk gelmektedir. Ordu İl Sıfır Atık Yönetim Sistemi Planı'nda (Ordu Çevre, Şehircilik ve İklim İl Müdürlüğü, 2020) bulunan katı atık karakterizasyonuna göre oluşan atığın %48,84'ü organik atıklardan oluşmaktadır. Bu verileri birleştirecek olursak 2035 için;

109.404 * 0,0075 = 819 ton/gün

819 * 0,4884 = 400 ton/gün organik atık toplanması hedeflenmektedir.

Oluşan bu organik atığın yaklaşık %17'sinin ise biyometanizasyona gönderilmesi planlanmıştır.

400 * 0,17 = 68 ton/gün organik atık

Ordu'da mevcut durumda Biyometanizasyon Tesisi bulunmamaktadır. Bundan dolayı toplam 70 ton/gün kapasiteli 1 adet biyometanizasyon tesisi kurulması planlanmıştır.

- **Samsun**

2020 TÜİK verilerine göre Samsun'da 392.948 ton/yıl atık üretilmiştir. Bu da Türkiye'de oluşan atığın %1,22'sine denk gelmektedir. Samsun İl Sıfır Atık Yönetim Sistemi Planı'nda (Samsun Çevre, Şehircilik ve İklim İl Müdürlüğü, 2020) bulunan katı atık karakterizasyonuna göre oluşan atığın %49,89'u organik atıklardan oluşmaktadır. Bu verileri birleştirecek olursak 2035 için;

109.404 * 0,0122 = 1.335 ton/gün

1.335 * 0,4989 = 666 ton/gün organik atık toplanması hedeflenmektedir.

Oluşan bu organik atığın yaklaşık %17'sinin ise biyometanizasyona gönderilmesi planlanmıştır.

666 * 0,17 = 113,22 ton/gün organik atık

Samsun'da 1 adet Biyometanizasyon/Biyogaz Tesisi bulunmaktadır ve yıllık kapasitesi 48.000 ton'dur (yaklaşık 130 ton/gün) (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2017). 2035 yılına kadar tesisin kapasitesi yeterlidir. Tablo 5.8'de yapılan projeksiyonlar sonrası 12 büyükşehirde 2035 yılı için hesaplanan toplam biyometanizasyon kapasitesi verilmiştir.

Tablo 5.8 2035 yılı için hesaplanan biyometanizasyon kapasitesi

İller	**2035 yılı için toplam biyometanizasyon kapasitesi (ton/gün)**
Adana	1.500
Ankara	825
Balıkesir	150
Bursa	669
Eskişehir	135
İstanbul	2.000
İzmir	750
Kocaeli	170
Konya	250
Ordu	70
Sakarya	100
Samsun	130
Toplam	**6.749**

5.5.4 Çürütücü Sıvısı Projeksiyonu

Bir önceki bölümde yapılan projeksiyonlar sonrası 2035 yılı için yaklaşık olarak 6.750 ton/gün (2.227.500 ton/yıl) biyometanizasyon kapasite ihtiyacı olduğu görülmektedir. Projeksiyon yapılan 12 il için mevcut ve yeni tesisler göz önüne alındığında 2035 yılı için söz konusu şehirlerde toplam 16 tesis bulunmaktadır. Aşağıda sıralanan tesislerin ıslak proses kullanması kabulü ile oluşacak çürütücü sıvısı miktarını hesaplayalım.

- İstanbul Kemerburgaz Biyometanizasyon Tesisi: 350 ton/gün (115.500 ton/yıl)
- Bursa Biyometanizasyon Tesisi: 669 ton/gün (220.770 ton/yıl)

- Balıkesir Biyometanizasyon Tesisi: 150 ton/gün (49.500 ton/yıl)
- İzmir Bergama Biyometanizasyon Tesisi: 120 ton/gün (39.600 ton/yıl)
- Konya Biyometanizasyon Tesisi: 250 ton/gün (82.500 ton/yıl)
- Ordu Biyometanizasyon Tesisi: 70 ton/gün (23.100 ton/yıl)

Toplamda 1.609 ton/gün (530.970 ton/yıl) atık işleme kapasitesi.

Bu tesislerden yaklaşık %64 oranında sıvı fermente ürün oluşacağı kabulü ile;

1.609 * 0,64 = 1.029,76 ton/gün çürütücü sıvısı oluşacaktır. Tesislerin bakım günlerini hesaba katmadan yılda 330 gün çalışacakları kabulü ile yıllık bazda oluşacak çürütücü sıvısı miktarı;

1.029,76 * 330 = 339.821 ton/yıl'dır.

Bu hesaplamalar çürütücü sıvısının gün geçtikçe büyüyen bir sorun olduğunu gözler önüne sermektedir. Bu sorun mevcut ve gelişmekte olan teknolojiler kullanılıp arıtılarak ya da değerlendirilerek bertaraf edilebilir.

5.5.5 Arıtma/Değerlendirme Yöntemine Göre Fayda/Maliyet Analizi

Bu bölümde tez çalışması kapsamında anlatılan çürütücü sıvısı değerlendirme yöntemlerinden olan membran arıtma, vakum buharlaştırma ve amonyak sıyırma gibi yöntemlerin maliyet analizleri incelenip karşılaştırma yapılacaktır.

Almanya Gıda ve Tarım Bakanlığı tarafından desteklenen Tarımda Teknoloji ve Yapılar Derneği'nin (KTBL) 2008 yılında yapmış olduğu analiz çalışmasında katı-sıvı ayırma prosesi (seperatör), membran arıtma prosesi, buharlaştırma prosesi ve amonyak sıyırma prosesi incelenmiştir (KTBL, 2008). Çalışmanın sonuçları Şekil 5.21'de görülmektedir.

Yapılan analiz çalışmasında m^3 başına en fazla arıtma maliyeti membran arıtma prosesindedir. Bunun sebebi proseste kullanılan mikrofiltrasyon, ultrafiltrasyon ve en son aşamada bulunan ters ozmos modüllerinin fiyatlandırılmasından kaynaklanmaktadır. Fayda/maliyet oranının yüksek seviyede kaldığı görülmektedir.

İkinci en yüksek arıtma maliyeti ise buharlaştıma prosesidir. Bu yöntemin maliyetinin yüksek olmasının sebebi buharlaştırma işlemi için sisteme ısı enerjisi verilmesidir. Fayda/maliyet oranının orta-yüksek aralıkta olduğu görülmektedir.

En az maliyetli seçeneklerden biri olarak amonyak sıyırma prosesi karşımıza çıkmaktadır. Hem kimyasal gerektirmemesi açısından maliyetinin az olması hem de geri kazanılan besin maddesinin yüksek olması fayda/maliyet açısından olumlu sonuçlanmaktadır.

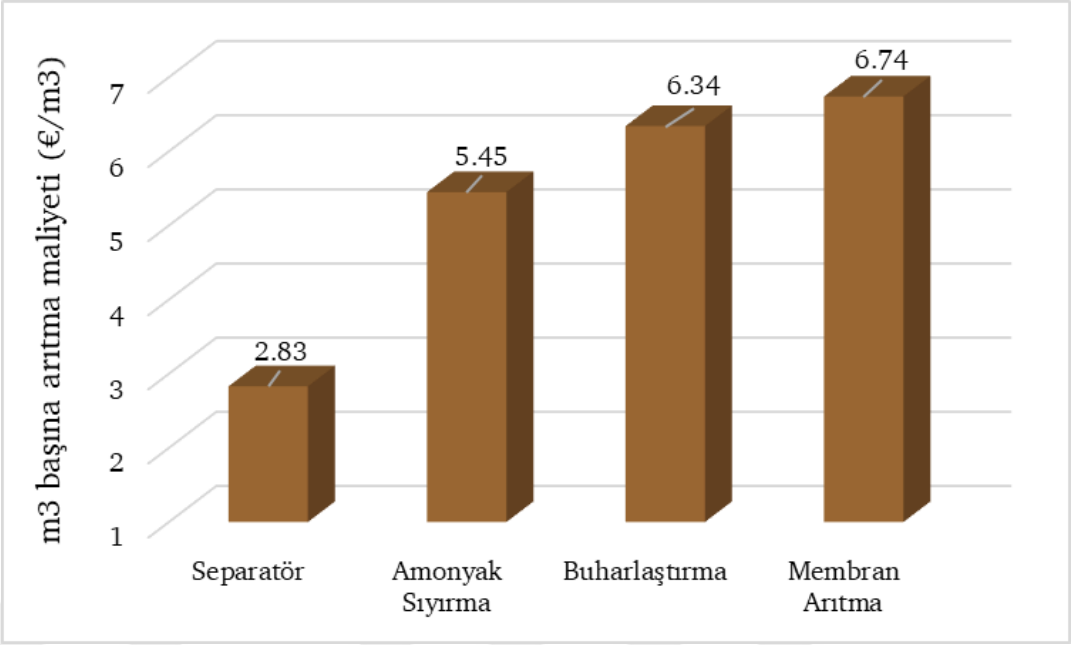
Maliyet açısından en az olan seçenek ise katı-sıvı separatörlerden geçirilip faz ayrımı yapıldıktan sonra kalan sıvının prosese geri devrettirilmesi veya katı/sıvı kısmın tesis sahasında ya da yakınındaki tarım alanlarında gübre olarak kullanılması seçeneğidir.

Bu arıtma yöntemlerinin maliyetinin karşılaştırılması yapılırken öncelikle çıkan katı-sıvı çürüme ürününün yoğunluğu 1.000 kg/m^3 olarak kabul edilmiştir.

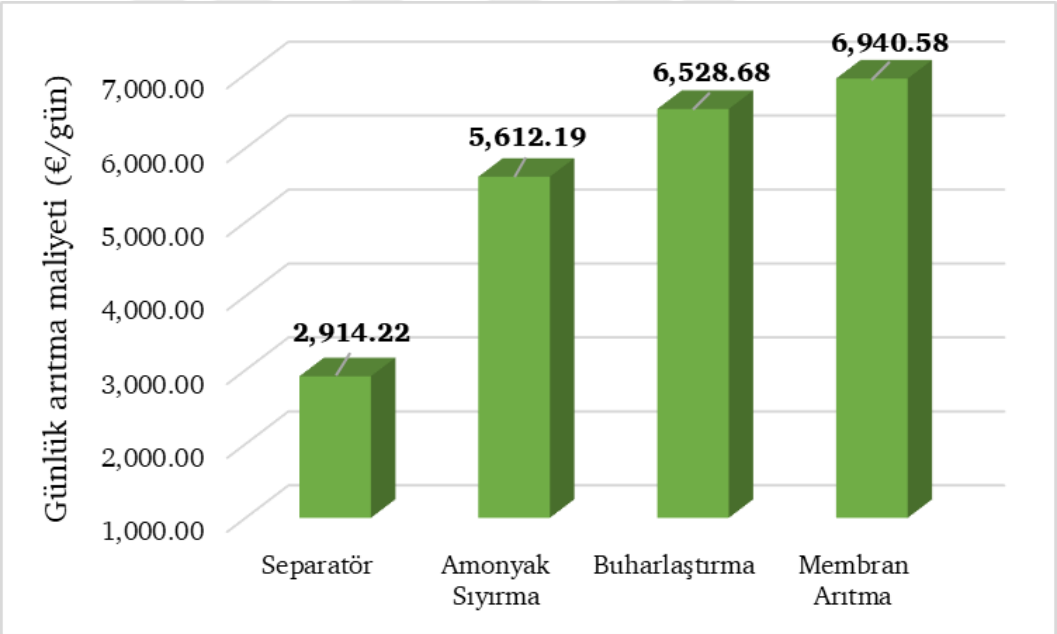
Projeksiyon sonucu 1.029,76 ton/gün çürüme ürünü çıkacağı bulunmuştu. Günlük oluşacak çürüme ürününü m^3 cinsine çevirecek olursak;

1.029,76 * 1000 / 1000 = 1.029,76 m^3/gün

Proses bazında harcanacak günlük arıtma maliyetleri karşılaştırılması Şekil 5.22'de gösterilmiştir.



Şekil 5.21 Model bir biyogaz tesisinde çürütücü sıvısı işleme için maliyetlerin karşılaştırılması (KTBL, 2008)



Şekil 5.22 Çürüme ürünü işleme için günlük arıtma maliyetlerinin karşılaştırılması

6
SONUÇ VE ÖNERİLER

Gelecekte, uygulanabilir en iyi çevresel seçenek atıklardan enerji elde etmek olacaktır. Enerji geri kazanım teknolojileri, atıkların yakılmasını ve anaerobik çürümeyi içerir (Verma, 2002). Ülkemizde organik atıklardan geri kazanılabilecek enerji potansiyeli oldukça yüksektir. Özellikle Türkiye gibi organik madde potansiyelinin çok yüksek olduğu bir ülkede, evsel organik katı atık ve diğer organik atıklardan biyogaz elde eden tesislerin kurulması ile önemli miktarda enerji geri kazanımı sağlanabilecektir (Öztürk, 2006).

Ülkemizde anaerobik çürütme teknolojilerinin kentsel katı atıkların organik kısmında, gıda ve benzeri endüstriyel tesislerde, tarım ve hayvan atıklarında kullanılarak biyogaz üretilmesi hem temiz enerji üretimini sağlayacak hem de çevre kirliliğinin azalmasına katkı sağlayacaktır. Ayrıca proses sonucu stabilize olmuş katı atıklar da gübre ve toprak düzenleyici olarak kullanılabilecektir. Yenilebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerji için devlet tarafından yeterince teşvik sağlandığı takdirde, yabancı ve özellikle yerli arıtma firmaları bu büyük pazardan pay alabilmek için harekete geçecektir. Bu sayede hem ülkemizin enerji açığı azaltılabilecek hem de istihdam yaratılabilecektir.

Yapılan bu biyogaz/biyometan tesislerinin en önemli sorunlarından biri de işletmesinin zor olmasıdır. Ayrıca anaerobik çürütücü tanklarından çıkan ve atık olarak nitelendirilen AÇM'nin nasıl değerlendirileceği de problem teşkil etmektedir.

Çoğu ülkede giderek katılaşan çevre mevzuatı, her türlü kirliliğin ve biyolojik çeşitlilik kaybının önlenmesinin yanı sıra, canlı organizmalar için olası toksik etkilerin ve sağlık risklerinin önlenmesini amaçlamaktadır. Yüksek kaliteli çürütme ürünü üretmek, günümüz toplumunda genel kalite talebinin bir parçasıdır ve yenilenebilir enerjiden fazlasını sağlayan biyogaz teknolojilerinin ayrılmaz bir parçasıdır. Biyogübre olarak çürüme ürününün kullanılması,

gezegenimizde oldukça sınırlı bir fosil kaynağı olan fosfor gibi organik madde ve besinlerin geri dönüştürülmesi yoluyla kaynakların korunmasına katkıda bulunur. Çürütme ürününün kalitesi, çürütme ürünü işleme yoluyla koşullandırma yoluyla daha da geliştirilebilir. Çürütme ürünü işleme ek yatırımlar, işletme ve bakım maliyetleri anlamına gelse de çürütme ürünü kalitesini, taşınabilirliği ve pazarlanabilirliği iyileştirme olasılığı önemli teşviklerdir. AÇM, birçok türde kullanıma uygun iyi bir üründür (Al Seadi ve Lukehurst, 2012).

Bu tez kapsamında katı, sıvı ve karışık formda bulunan çürüme ürününün arıtma ve döngüsel ekonomiye kazandırma yöntemleri araştırılmıştır. Tez konusu olan çürütücü sıvısının ileri arıtma ve değerlendirme stratejilerinin avantaj/dezavantajları detaylı olarak araştırılmıştır. Yapılan projeksiyonlar sonucu 2035 yılında yılda 339.821 ton çürütücü sıvısının oluşması beklenmektedir. Bu hesaplamalar da sorunun büyüklüğünü teşkil etmektedir. Özellikle çürütücü sıvısı hakkında araştırmaların yapıldığı bu tez çalışması sonucunda bu sıvıyı değerlendirmenin en iyi yöntemleri sıvı organik gübre olarak kullanılması, amonyak sıyırma gibi besin geri kazanımı işlemlerinden geçerek sıvının içindeki nütrientlerin geri kazanılması ya da eğer yeterli teknoloji yoksa ileri arıtma olmadan prosese geri devrettirilmesidir. Yapılan projeksiyonlar sonucu bu çürtücü sıvısını değerlendirmenin fayda/maliyet açısından en uygun yolunun katı-sıvı separatörlerden geçirdikten sonra sıvı fazın anaerobik reaktöre geri devrettirilmesi ya da kompost sulama malzemesi olarak kullanılması, katı fazın ise tarım arazilerinde kompost gübre olarak kullanılması seçeneği olduğu görülmektedir.

Tez kapsamında araştırılmış olan ve kütle denge sisteminin çıkarıldığı İstanbul Kömürcüoda Biyometanizasyon Tesisi'ne baktığımız zaman bu tesisten çıkan anaerobik çürüme maddesinin katı-sıvı separatörlerinden geçerek katı çürüme maddesi kurutulup gübre olarak kullanılmakta, geri kalan sıvı ise prosese geri devrettirilmektedir. Prosese geri devrettirilen çürütücü sıvısının içindeki yüksek nütrient içeriği sayesinde biyogaz/biyometan verimini arttırdığı yapılan literatür araştırmalarından bilinmektedir. Yapılan tez çalışmasının bu çürütücü sıvısı sorununu en uygun şekilde çözümleyebilmek açısından ileri çalışmalara yol gösterici nitelikte olması hedeflenmektedir.

KAYNAKÇA

Adana Çevre, Şehircilik ve İklim İl Müdürlüğü. (2020). Adana İl Sıfır Atık Yönetim Sistemi Planı.

Afnor, B. (2006). Amendements organiques, dénominations, spécifications et marquages. *NFU 44-051*. Fransa.

Al Seadi, T., & Lukehurst, C. (2012). *Quality of Digestate From Biogas Plants Used As Fertilizer*. IEA Bioenergy, 37.

Alburquerque, J. A., De la Fuente, C., Campoy, M., Carrasco, L., Najera, I., Baixauli, C., & Bernal, M. P. (2012). Agricultural Use of Digestate for Horticultural Crop Production and Improvement of Soil Properties. *European Journal of Agronomy, 43*, 119-128.

Ankara Çevre, Şehircilik ve İklim İl Müdürlüğü. (2020). Ankara İli 2019 Çevre Durum Raporu.

Ar, F. F. (2018). Ottan Çöpten Enerji. *Enerji ve Çevre Dünyası*, 22-25.

Aso, S. (2020). Digestate: The Coproduct of Biofuel Production in a Circular Economy, and New Results for Cassava Peeling Residue Digestate. *Renewable Energy Technologies and Applications.* içinde IntechOpen.

Badgie, D., Samah, M. A., Manaf, L. A., & Muda, A. B. (2012). Assessment of Municipal Solid Waste Composition in Malaysia: Management, Practice, and Challenges. *Polish Journal of Environmental Studies, 21(3)*, 539-547.

Briski, F., Vukovic, M., Papa, K., Gomzi, Z., & Domanovac , T. (2007). Modelling of compositing of food waste in a acolumn reactor. *Chemical Papers, 61(1)*, 24-29.

British Standard Institution. (2010). PAS 110: 2010, Specification for Whole Digestate, Separated Liquor and Separated Fibre Derived from the Anaerobic Digestion of Source-segregated Biodegradable Materials. Londra: British Standard Institution.

Copper, P. (1999). A Review of the Design and Pertformance of Vertical-Flow and Hybrid Reed Bed Treartment Systems. *Water Science and Technology, 40(3)*, 1-9.

Cristancho, D. E., & Arellano, A. V. (2006). Study of the operational conditions for anaerobic digestion of urban solid wastes. *Waste Management, 26 (5)*, 546-556.

Croft, M. T., Lawrence, A. D., Raux-Deery, E., Warren, M. J., & Smith, A. G. (2005). Algae acquire vitamin B 12 through a symbiotic relationship with bacteria. *Nature, 438(7064)*, 90-93.

Cuetos, M. J., Gomez, X., Otero, M., & Moran, A. (2008). Anaerobic digestion of solid slaughterhouse waste (SHW) at laboratory scale: Influence of co-digestion with the organic fraction of municipal solid waste (OFMSW). *Biochemical Engineering Journal, 40 (1)*, 99-106.

Dahlin, J., Herbes, C., & Nelles, M. (2015). Biogas Digestate MArketing: Qualitative Insights Into the Supply Side. *Resources, Conversation and Recycling, 104*, 152-161.

Dahlin, J., Nelles, M., & Herbes, C. (2017). Biogas Digestate Management: Evaluating the Attitudes and Perceptions of German Gardeners Towards Digestate-Based Soil Amendments. *Resources, Conservation and Recycling, 118*, 27-38.

Dereli, R. K. (2006, Şubat). Evsel Organik KAtı Atıklar ve Arıtma Tesisi Çamurlarının Birlikte Anaerobik Arıtımının Modellenmesi. *Evsel Organik Katı Atıklar ve Arıtma Tesisi Çamurlarının Birlikte Anaerobik Arıtımının Modellenmesi*. İTÜ.

Diaz, L. F., De Bertoldi, M., & Bidlingmaier, W. (. (2011). *Compost Science and Technology*. Elsevier.

Dlgs217/06, G. U. (2006). Dlgs 217/06 Italian Legislative Decree 217/06. İtalya: Gazzetta Ufficiale.

Ermiş, H. (2020). Microalgae growth in anaerobic digestate for high-value product recovery. Doctoral dissertation, İTÜ Graduate School.

Eskişehir Çevre, Şehircilik ve İklim İl Müdürlüğü. (2020). Eskişehir İli 2019 Yılı Çevre Durum Raporu.

European Biogas Association. (2018). *EBA Statistical Report.* Brussesls, Belgium.

European Biogas Association. (2020). *EBA Statistical Report.* Brussesls, Belgium.: EBA.

European Comission-General Environment Directorate. (2001). *Working Document: Biological Treatment of Biowaste 2nd Draft.* Biological Treatment of Biowaste: http://www.cre.ie/docs/EU_BiowasteDirective_workingdocument_2nddraft.pdf adresinden alındı

European Union. (2018). *European Waste Directive Article 6.* https://www.legislation.gov.uk/eudr/2008/98/article/6# adresinden alındı

European Waste Catalogue. (2021, 05 15). European Waste Codes: https://dsposal.uk/ewc-codes/19/19-06/ adresinden alındı

Fabbri, D., & Torri, C. (2016). Linking Pyrolysis and Anaerobic Digestion (Py-AD) for the Conversion of Lignocellulosic Biomass. *Current Opinion in Biotechnology, 38*, 167-173.

Fernández-Nava, Y., Del Rio, J., Rodríguez-Iglesias, J., Castrillón, L., & Marañón, E. (2014). Life Cycle Assessment of Different Municipal Solid Waste Management Options: A Case Study of Austrias (Spain). *Journal of Cleaner Production, 81*, 178-189.

Fuchs, W., & Drosg, B. (2013). Assessment of the State of the Art of Technologies for the Processing of digestate Residue From Anaerobic Digesters. *Water Science and Technology, 67(9)*, 1984-1993.

Garfi, A., Ferrer, L., Velo, E., & Ferrer, I. (2012). Evaluating Benefits of Low-Cost Household Digestors for Rurl Anden Communities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16*, 575-581.

Gazette of the Hellenic Republic. (2014). *Waste Regulation*. Yunanistan: Gazette of the Hellenic Republic.

German Biogas Association. (2018). *Digestate as Fertilizer*. German Biogas Association.

Guercini, S., Castelli, G., & Rumor, C. (2014). Vacuum Evaporation Treatment of Digestate: Full Exploitation of Cogeneration Heat to Process the Whole Digestate Production. *Water Science and Technology, 70(3)*, 479-485.

Hartmann, H., Angelidaki, I., & Ahring, B. K. (2002). Co-Digestion of the Organic Fraction of Municipal Waste With Other Waste Types. Biomethanization of the Organic Fra*ction of Municipal Solid Wastes* (s. 181-200). içinde IWA Publishing.

Haug, R. T. (2018). The Practical Handbook of Compost Engineering. Routledge.

h*ttps://www.enerjiatlasi.com/biyogaz/*. (2021, 1 30). https://www.enerjiatlasi.com/biyogaz/: https://www.enerjiatlasi.com/biyogaz/ adresinden alındı

Inyang, M., Gao, B., Yao, Y., Xue, Y., Zimmerman, A. R., & Pullammanappallil, P. (2012). Removal of Heavy Metals From Aqueous Solution by Biochars Derived From Anaerobically Digested Biomass. *Bioresourece Technology, 110*, 50-56.

İSTAÇ A.Ş. (2015). *Bursa İli Entegre Katı Atık Yönetim Planı.*

İSTAÇ A.Ş. (2019). *Faaliyet Raporu.* İstanbul: İSTAÇ A.Ş.

İstanbul Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü. (2020). *İstanbul İl Sıfır Atık Yönetim Sistemi Planı.* İstanbul: T.C. İstanbul Valiliği Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü.

ITC. (2022, 01 09). http://www.itcturkiye.com/tr/tesislerimiz: http://www.itcturkiye.com/tr/tesislerimiz adresinden alındı

İTÜ. (2021). *BIOTREND Atık ve Enerji Tesislerinin Teknik Değerlendirme Raporu.*

İzmir Çevre, Şehircilik ve İklim İl Müdürlüğü. (2020). İzmir İl Sıfır Atık Yönetim Sistemi Planı.

Jain, S., Wolf, I. T., Lee, J., & Tong, Y. W. (2015). A comprehensive review on operating parameters and different pretreatment methodologies for anaerobic digestion of municipal solid waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 142-154.

Kim, D., & Oh, S. (2011). Continuous High-Solids Anaerobic Co-digestion of Organic Solid Wastes Under Mesophilic Conditions. *Waste Management, 31(9-10)*, 1943-1948.

Kirk, D. M., & Gould, M. (2019, 03). *Uses of Solids and By-Products of Anaerobic Digestion.* Farm Energy: https://farm-energy.extension.org/uses-of-solids-and-by-products-of-anaerobic-digestion/#Livestock_bedding adresinden alındı

Kisielewska, M., Debowski, M., Zielinski, M., Kazimierowicz, J., Quattrocelli, P., & Bordiean, A. (2021). Effects of Liquid Digestate Treatment on sustainable Microalgae Biomass Production. *BioEnergy Research*, 1-14.

Konya Çevre, Şehircilik ve İklim İl Müdürlüğü. (2020). Konya İli 2019 Çevre Durum Raporu.

Koszel, M., & Lorencowicz, E. (2015). Agricultural Use of Biogas Digestate As a Replacement Fertilizers. *Agriculture and Agricultural Science Procedia, 7*, 119-124.

Koupaie, E. H., Azizi, A., Lakeh, A. B., Hafez, H., & Elbeshbishy, E. (2019). Comparison of Liquid and Dewatered Digestate as Inoculum for Anaerobic Digestion of Organic Solid Wastes. *Waste Management, 87*, 228-236.

Kratzeisen, M., Starcevic, N., Martinov, M., Maurer, C., & Müller, J. (2010). Applicability of Biogas Digestate as Solid Fuel. *Fuel, 89(9)*, 2544-2548.

KTBL. (2008). Umweltgerechte, innovative Verfahren zur Abtrennung von Nährstoffen aus Gülle und Gärrückständen .

Logan, M., & Visvanathan, C. (2019). Management Strategies for Anaerobic Digestate of Organic Fraction of Municipal Solid Waste: Current Status and Future Prospects. *Waste Management & Research, 37(1)*, 27-39.

Lü, F., Zhou, Q., Wu, D., Wang, T., Shao, L., & He, P. (2015). Dewaterability of Anaerobic Digestate From Food Waste: Relationship with Extra cellular Polymeric Substances. *Chemical Engineering Journal, 262*, 932-938.

Madsen, M., Holm-Nielsen, J. B., & Esbensen, K. H. (2011). Monitoring of Anaerobic Digestion Process: A Review Perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(6)*, 3141-3155.

Makádi, M., Tomócsik, A., & Orosz, V. (2012). Digestate: A New Nutrient Source-Review. *Biogas, 14* (s. 295-312.).

Maurer, C., & Müller, J. (2012). Ammonia (NH3) Emissions During Drying of Untreated and Dewatered Biogas Digestate in a Hybrid Waste-Heat/Solar Dryer. *Engineering in Life Sciences, 12(3)*, 321-326.

Miles, A., & Ellis, T. G. (2001). Struvite precipitation potential for nutrient recovery from anaerobically treated wastes. *Water Science and Technology, 43(11)*, 259-266.

Monlau, F., Sambusiti, C., Ficara, E., Aboulkas, A., Barakat , A., & Carrere, H. (2015). New Opportunities For Agricultural Digestate Valorization: Current Situation and Perspectives. *Energy & Environmental Science, 8(9)*, 2600-2621.

Muscolo, A., Settineri, G., Papalia, T., Attina, E., Basile, C., & Panuccio, M. R. (2017). Anaerobic Co-Digestion of Recalcitrant Agricultural Wastes: Characterizing of Biochemical Parameters of Digestate and Its Impacts on Soil Ecosystem. *Science of The Total Environment, 586*, 746-752.

Neumann, J., Binder, S., Apfelbacher, A., Gasson, J. R., Garcia, P. R., & Hornung, A. (2015). Production and Characterization of A New Quality Pyrolysis Oil, Char And Syngas From Digestate-Introducing the Thermo-Catalytic Reforming Process. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 113*, 137-142.

Nielsen, S., & Willoughby, N. (2005). Sludge treatmenr and drying reed bed systems in Denmark. *Water and Environmental Journal, 19(4)*, 296-305.

Official Gazette of the Republic of Slovenia. (2013). *Decree On the Treatment of Biodegradable Waste and the Use of Compost or Digestate* . Official Gazette of the Republic of Slovenia.

Oleszkiewicz, J. A., & Poggi-Varaldo, H. M. (1997). High-Solids Anaerobic Digestion of Mixed Municipal and Industrial Waste. *Journal of Environmental Engineering, 123(11)*, 1087-1092.

Opatokun, S. A., Strezov, V., & Kan, T. (2015). Product Based Evaluation of Pyrolysis of Food Waste and Its Digestate. *Energy, 92*, 349-354.

Ordu Çevre, Şehircilik ve İklim İl Müdürlüğü. (2020). Ordu İl Sıfır Atık Yönetim Sistemi Planı.

Özbay, İ. (2015). Evaluation of municipal solid waste management practices for an industrialized city. *Polish Journal of Environmental Studies, 24(2)*, 637-644.

Öztürk, İ., Arıkan, O. A., Altınbaş, M., Alp, K., & Güven, H. (2015). *Katı Atık Geri Dönüşüm ve Arıtma Teknolojileri.* Ankara: Türkiye Belediyeler Birliği.

Pantelopoulos, A., Magid, J., & Jensen, L. S. (2016). Thermal Drying of the Solid Fraction from Biogas Digestate: Effects of Acidification, Temperature and Ventilation on Nitrogen Content. *Waste Management, 48*, 218-226.

Peng, W., & Pivato, A. (2019). Sustainable Management of Digestate From the Organic Fraction of Municipal Solid Waste and Food Waste Under the Concepts of Back to Earth Alternatives and Circular Economy. *Waste and Biomass Valorization, 10(2)*, 465-481.

Pisello, A. L., Petrozzi, A., Castaldo, V. L., & Cotana, F. (2016). On an Innovative Integrated Technique for Energy Refurbishment of Historical Buildings: Thermal-energy, Economic and Environmental Analysis of a Case Study. *Applied Energy, 162*, 1313-1322.

RISE-AT, N. (1998). Review of Current Status of Anaerobic Digestion Technology for Treatment of Municipal Solid Waste. Regional Information Service Center for South East Asia on Appropriate Technology, Institute of Scientific and Technical Research and Development, Chiang Mai University.

Sakarya Çevre, Şehircilik ve İklim İl Müdürlüğü. (2020). Sakarya İl Sıfır Atık Yönetim Sistemi Planı.

Samsun Çevre, Şehircilik ve İklim İl Müdürlüğü. (2020). Samsun İl Sıfır Atık Yönetim Sistemi Planı.

Saveyn, H., & Eder, P. (2014). *End-of-Waste Criteria For Biodegradable Waste Subjected to Biological Treatment (Compost & Digestate): Technical Proposals.* Sevilla, Spain.: IPTS.

Sayın, U., & Erdoğan, D. (2011, 06 17). Atık Yönetiminde Biyometanizasyon Teknolojisi. Türkiye: Çevre ve Orman Bakanlığı, Atık Yönetimi Dairesi Başkanlığı.

Siebert, S. (2008). Quality requirements and quality assurance of digestion residuals in Germany. Nüremberg, Almanya.: ECN/ORBIT Worshop The Future for Anaerobic Digestion of Organic Waste in Europe.

Sophin, P., & Preston, T. R. (2001). Effect of Processing Pig Manure in a Biodigester As Fertilizer Input for Ponds Growing Fish in Polyculture. *Livestock Research for Rural Development, 13(6)*, 185-206.

Spelter, H., Winandy, J., & Zauche, T. (2008). Anaerobically Digested Bovine Biofiber As a Source of Fiber for Particleboard Manufacturing: An Economic Analysis. *BioResources, 3(4)*, 1256-1266.

Srisowmeya, G., Chakravarthy, M., & Devi, G. N. (2020). Critical Considerations in Two-Stage Anaerobic Digestion of Food Waste – A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 119*, 109587.

Stürmer , B., Pfundtner, E., Kirchmeyr, F., & Uschnig, S. (2020). Legal Requirements for Digestate as Fertilizer in Austria and the European Union Compared to Actual Technical Parameters. *Kournal of Environmental Management, 253*, 109-756.

Sverige, A. (2013). Årsrapport Certifierad Återvinning, SPCR 120. İsveç: produktionsaren 2012, 2011, 2010.

T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2017). *Ulusal Atık Yönetimi ve Eylem Planı 2016-2023*. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2015, 10 10). Mekanik Ayırma, Biyokurutma ve Biyometanizasyon Tesisleri ile Fermente Ürün Yönetimi Tebliği. Türkiye: T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı.

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2017). Ulusal Atık Yönetimi ve Eylem Planı (2016-2023). *Ulusal Atık Yönetimi ve Eylem Planı (2016-2023)*. Türkiye: T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı.

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2019, 12 26). Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelikte Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik. Türkiye: T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı.

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2019, 07 12). Sıfır Atık Yönetmeliği. *Sıfır Atık Yönetmeliği*. Türkiye: Resmi Gazete.

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2021, 02 06). T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Çevresel Göstergeler: https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/belediye-atiklari-miktari-ve-bertaraf-miktari-i-85749 adresinden alındı

T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı. (2018, 02 23). Tarımda Kullanılan Organik, Mineral ve Mikrobiyal Kaynaklı Gübrelere Dair Yönetmelik. Resmi Gazete, 30341.

T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı. (2021). *Kompost El Kitapçığı.* Yalova.

Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. (1993). *Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues.* McGraw-Hill.

Topper, P., Graves, R., & Richard, T. (2017). *Fate of Nutrients and Pathogens During Anaerobic Digestion of Dairy Manure.* The Pennsylvania State University.:

https://extension.psu.edu/fate-of-nutrients-and-pathogens-during-anaerobic-digestion-of-dairy-manure adresinden alındı

Torres-Climent, A., Martin-Mata, J., Marhuenda-Egea, F., Moral, R., Barber, X., Perez-Murcia, M. D., & Paredes, C. (2015). Composting of the Solid Phase of Digestate From Biogas Production: Optimization of the Moisture, C/N Ratio, and pH Conditions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis, 46(sup1)*, 197-207.

Turan, G. N., Çoruh, S., Akdemir, A., & Ergun, O. N. (2009). Municipal Solid Waste Management Strategies in Turkey. *Waste Management, 29(1)*, 465-469.

TÜİK. (2018, 1 30). *TÜİK Çevre İstatistikleri*. TÜİK Çevre İstatistikleri 2018 Katı Atık Verileri: https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=119&locale=tr adresinden alındı

Uggetti, E., Ferrer, I., Llorens, E., & Garcia, J. (2010). Sludge Treatment Wetlands: A Review on the State of the Art. *Bioresource Technology, 101 (9)*, 2905-2912.

US EPA. (2021, 02 21). *US EPA*. US EPA Web Sitesi: https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/national-overview-facts-and-figuresmaterials#:~:text=In%202018%2C%20the%20amount%20of,composted%20was%2024.9%20million%20tons.&text=The%20amount%20of%20MSW%20combusted,landfills%20 adresinden alındı

Ülgüdür, N. (2019). Treatment and valorization of anaerobic digestate. Doctorate dissertation, METU Graduate School.

Vandevivere, P., De Baere, L., & Verstraete, W. (2003). Types of Anaerobic Digester for Solid Wastes. *Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes* (s. 111-140). içinde Iwa Publishing.

Verisk Maplecroft. (2019). *Waste Generation Index Overview*. İngiltere: Verisk Maplecroft.

Verma, S. (2002). Anaerobic Digestion of Biodegradable Organics in Municipal Solid Wastes. Columbia, Amerika Birleşik Devletleri: Columbia University.

Vickers, N. J. (2017). Animal Communication: When I'm Calling You, Will You Answer Too? *Current Biology, 27(14)*, 713-715.

Wang , W., Zhang, Y., Liu, Y., Jiang, N., Zhao, Q., & Deng, L. (2021). Managing liquid digestate to support the sustainable biogas industry in China: Maximizing biogas-linked agro-ecosystem balance. *GCB Bioenergy, 13(6)*, 880-892.

Wang, L., Li, Y., Chen, P., Min, M., Chen, Y., Zhu, J., & Ruan, R. R. (2010). Anaerobic digested dairy manure as a nutrient supplement for cultivation of oil-rich green microalgae Chlorella sp. *Bioresource Technology, 101(8)*.

Wellinger, A., Murphy, J., & Baxter, D. (2013). *The Biogas Handbook* . Woodhead Publishing.

Westergard, R., & Teir, J. (1999). The Waasa Process Integrated in the Eco-cycling Society. *II Int. Symp. Anaerobic Dig. Solid Waste*, (s. 310-313). Barcelona.

World Bank Group. (2018). *What A Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Washington, DC: World Bank Publications.

Xia, A., & Murphy, J. D. (2016). Microalgal cultivation in treating liquid digestate from biogas systems. *Trends in Biotechnology, 34(4)*, 264-275.

Yenice, M., Doğruparmak, Ş. Ç., & Durmuşoğlu, E. (2009). Kocaeli İli Katı Atık Karakterizasyonu. *Türkiye'de Katı Atık Yönetimi Sempozyumu*, s. 15-17.

Yıldız, Ş., Saltabaş, F., Balahorli, V., Sezer, K., & Yağmur, K. (2009). Organik Atıklardan Biyogaz Üretimi (Biyometanizasyon) Projesi-İstanbul Örneği. *Türkiye'de Katı Atık Yönetimi Sempozyumu, YTÜ*, 15-17.

Yılmaz, A., Ünvar, S., Koca, T., & Koçer, A. (2017). Türkiye'de Biyogaz Üretimi ve Biyogaz Üretimi İstatistikleri. *Technological Applied Sciences, 12(4)*, 218-232.

Yılmaz, M. (2019). Balıkesir İli Evsel Katı Atıklarının Bertarafında Uygun Termal Yöntemin Seçilmesi. Hasan Kalyoncu Üniversitesi.

Zhang, Y., Huang, G. H., & He, L. (2014). A multi-echelon supply chain model for municipal solid waste management system. *Waste management, 34(2)*, 553-561.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Gençoğlu, S. & Bilgili, M. S. (2021). Management of liquid digestate in biogas plants. *2nd International Integrated Pollution Prevention and Control Symposium*, Karabük, Türkiye.