

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ANAEROBİK SİSTEMLERDE BİYOGAZ İÇERİĞİNİN ENERJİ
ÜRETİM SİSTEMLERİNE ETKİSİ

Kübra SORGULU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Çevre Mühendisliği Programı

Danışman
Prof. Dr. Ahmet DEMİR

Temmuz, 2020

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ANAEROBİK SİSTEMLERDE BİYOGAZ İÇERİĞİNİN ENERJİ ÜRETİM
SİSTEMLERİNE ETKİSİ

Kübra SORGULU tarafından hazırlanan tez çalışması 17.07.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Çevre Mühendisliği Programında **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ahmet DEMİR
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Ahmet DEMİR, Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Bestami ÖZKAYA

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Osman Atilla ARIKAN

İstanbul Teknik Üniversitesi

Danışmanım Sn. Prof. Dr. Ahmet DEMİR sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Anaerobik Sistemlerde Biyogaz İçeriğinin Enerji Üretim Sistemlerine Etkisi 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.

Kübra SORGULU

İmza



Kızım Erva'ya

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimimin her safhasında tecrübeleriyle bizlere her zaman yol gösterip emeğini esirgemeyen danışmanım Sn. Prof. Dr. Ahmet DEMİR'e en içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Bilgisini ve emeğini hiçbir zaman esirgemeyen, yönlendirmeleriyle her zaman destek veren, Sn. Prof. Dr. Bestami ÖZKAYA'ya sabrı, ilgisi ve katkılarından dolayı şükranlarımı sunuyorum.

Çalışmamın her aşamasında yardımlarıyla yanımda olan Sn. Dr. Emre Oğuz KÖROĞLU ve Sn. Dr. Hülya CİVELEK YÖRÜKLÜ'ye katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunuyorum.

Gerek çalışmanın konusu itibarıyla akademik olarak gerekse sosyal yaşamımın her aşamasında yanımda olup bana benden çok inanarak beni destekleyen, her daim yanımda olduğunu bildiğim sevgili eşim Fatih SORGULU'ya teşekkürlerimi sunuyorum.

Ne zaman ihtiyacım olsa hep yanımda olan, desteklerini hep arkamda hissettiğim, bilhassa bu tezin yazımında yolumu tamamen açmak için tüm çabayı gösteren başta annem ve kız kardeşim olmak üzere hayat boyu bana sağladıkları tüm imkânlar için aileme teşekkürlerimi sunuyorum.

Son olarak çalışmanın tamamlanması için anneannesi ve teyzesiyle oyunlar oynayıp sabırla beni bekleyen henüz 7 aylık kızım Erva'ya teşekkürlerimi sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiv
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	7
1.3 Hipotez	8
2 ANAEROBİK ÇÜRÜTME	9
2.1 Anaerobik Çürütmenin Esasları	9
2.1.1 Hidroliz.....	10
2.1.2 Asit Oluşumu	10
2.1.3 Metan Oluşumu	11
2.2 Anaerobik Sistemlerde Biyogaz Üretimini Etkileyen Faktörler	12
2.2.1 Sıcaklık	13
2.2.2 Substrat Karakteristiği	13
2.2.3 pH	13
2.2.4 Hidrolik Bekletme Süresi	14
2.2.5 Karıştırma	14
2.3 Anaerobik Sistemlerde Hidrojen Üretimi	15
2.4 Anaerobik Sistemlerde Biyohitan Oluşumu.....	17
3 TERMOKİMYASAL YÖNTEMLERLE ATIKTAN ENERJİ ÜRETİMİ	19
3.1 Yakma	19
3.2 Piroliz	20
3.3 Gazlaştırma	21

4 MATERYAL VE METOT	23
4.1 Biyogaz Oluşumu.....	23
4.2 Hidrojen Oluşumu.....	25
4.3 Hitanın Yanması.....	27
4.4 Atığın Direk Yakılması.....	27
4.5 Engineering Equation Solver (EES).....	28
5 SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER	29
5.1 Atıktan Faydalı Gaz Elde Edilmesi	29
5.2 Hitan Oluşumu ve Yanması.....	32
5.3 Atığın Direk Yakılması.....	37
6 SONUÇ VE ÖNERİLER	40
KAYNAKÇA	42
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	47

SİMGE LİSTESİ

ω	Asentrik Faktör
N_2	Azot
T_{sat}	Doyma Sıcaklığı
h	Entalpi
s	Entropi
β	Hacimsel Isıl Genleşme Katsayısı
H_2	Hidrojen
k	Isı Kapasitesi Oranı
α	Isıl Yayınlm
u	İç Enerji
k	İletkenlik
CO_2	Karbondioksit
T_{nb}	Kaynama Sıcaklığı
ν	Kinematik Viskozite
P_c	Kritik Basınç
T_c	Kritik Sıcaklık
$\dot{m}$	Kütlesel debi
MW	Molar Kütle
v	Özgöl Hacim
c_p	Özgöl Isı (sabit basınçta)
c_v	Özgöl Isı (sabit hacimde)
Pr	Prandtl Sayısı
SS	Ses Hızı
Z	Sıkıştırılabilirlik Faktörü
f	Uçuculuk
μ	Viskozite
ρ	Yoğunluk

KISALTMA LİSTESİ

AİD	Alt Isıl Değer
BOİ	Biyolojik Oksijen İhtiyacı
EES	Engineering Equation Solver
HRT	Hidrolik Bekletme Süresi
KM	Kuru Madde
KOİ	Kimyasal Oksijen İhtiyacı
MTEP	Milyon Ton Eşdeğer Petrol
TOK	Toplam Organik Karbon
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
UYA	Uçucu Yağ Asidi
ÜİD	Üst Isıl Değer

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Türkiye’de 2019 yılında üretilen atık miktarları (Kaynak [2]’den uyarlanmıştır)	2
Şekil 1.2	Evsel atık karakterizasyonu.....	3
Şekil 1.3	Türkiye’de 2019 yılında yakıt türüne göre gerçekleşen elektrik üretimi (Kaynak [4]’ten uyarlanmıştır)	4
Şekil 1.4	Türkiye’de biyokütle kaynaklı santrallerinde gerçekleşen elektrik üretimi (Kaynak [3]’den uyarlanmıştır)	4
Şekil 2.1	Anaerobik çürütme prosesinin aşamaları	9
Şekil 2.2	Anaerobik çürütme ile a) tek aşamalı biyometan b) iki aşamalı ve biyohitan üretimi	18
Şekil 4.1	Tez akım şeması	23
Şekil 4.2	Anaerobik çürütme prosesinin ilk aşaması (hidrojen üretimi)	26
Şekil 5.1	Değişen atık miktarına göre metan ve hitanın hacmi	30
Şekil 5.2	Değişen atık miktarına göre hitan ve metanın enerjileri	31
Şekil 5.3	Değişen atık miktarlarına göre atık ve metan karakterizasyonu	32
Şekil 5.4	Hidrojen fraksiyonuna göre hitanın alt ısı değeri ve enerjisi.....	33
Şekil 5.5	Değişen ortam sıcaklığına göre gazların alt ısı değerleri	35
Şekil 5.6	Değişen ortam sıcaklığına göre gazların enerjileri	35
Şekil 5.7	Değişen ortam sıcaklığına göre gazların hacimleri.....	36
Şekil 5.8	Farklı hidrojen fraksiyonları için hidrojenin hacmindeki ve oluşan su buharı emisyonundaki değişim	36
Şekil 5.9	Farklı miktarlardaki atıktan elde edilen hitanın miktarı ve hitanın yanması sonucu çıkan emisyonlar	37
Şekil 5.10	Farklı biyokütle miktarlarına göre gerekli hava debisi ve yakma sonrası ortaya çıkan emisyonlar	38
Şekil 5.11	Farklı biyokütle miktarları için gerekli hava miktarı ve yakma sonrası ortaya çıkan ısıнын değişimi	38

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	Metan ve Hidrojenin 300°K sıcaklık ve 100 kPa basınçtaki fiziksel özellikleri	11
Tablo 2.2	Temel hidrojen üretim metotları.....	16
Tablo 4.1	Organik atığın karakterizasyonu	25
Tablo 5.1	Değişen atık miktarlarına göre madde miktarları	29
Tablo 5.2	Değişen atık miktarlarına göre elde edilebilecek gazların özellikleri	31
Tablo 5.3	Hidrojen fraksiyonuna göre hitanın fiziksel özellikleri	33
Tablo 5.4	Anaerobik çürütme prosesinde ortaya çıkan ürünler	33
Tablo 5.5	Hidrojen fraksiyonuna göre hitanın yanması sırasında ortaya çıkan gazların molar fraksiyonları	34
Tablo 5.6	Farklı çevre sıcaklıklarına göre gazların fiziksel özellikleri	34

Anaerobik Sistemlerde Biyogaz İçeriğinin Enerji Üretim Sistemlerine Etkisi

Kübra SORGULU

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Ahmet DEMİR

Bu çalışmada organik atıklardan metan, hidrojen ve bunların belirli oranlarda karışımı olan hitan üretimi ve bu gazların enerji üretim potansiyeli incelenmiştir. Doğal gazın da ana bileşeni olan metan evsel uygulamalardan endüstriyel uygulamalara geniş kullanım alanına sahip bir fosil yakıttır. Halen yaygın bir şekilde ana enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Ancak tıpkı diğer fosil yakıtlar gibi doğal gaz rezervleri hızla tükenmekte ve fosil yakıt kullanımı sonucu çevre kirliliği artmaktadır. Hidrojen ise yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak sudan ve atıklardan elde edilebilen temiz bir enerji taşıyıcısıdır. Bu gazın ulaşım araçlarından taşınabilir cihazlara ve endüstriyel uygulamalara kadar yaygın bir kullanım alanı mevcuttur.

Son yıllarda kullanılmaya başlayan, metan içerisine belirli oranlarda hidrojen ilavesiyle elde edilen hitan, bir yandan doğal gaz bağımlılığını azaltma açısından, diğer yandan da çevreye verilen zararı azaltma açısından umut vadeden bir gaz karışımıdır.

Bu tez çalışması kapsamında yemek atıklarından anaerobik çürütme yöntemi ile elde edilebilecek metan ve hidrojen miktarları hesaplanmış, metana %30'a kadar

değişen oranlarda hidrojen eklenerek elde edilen hitanın özellikleri araştırılmıştır. Hidrojen oranı, çevre sıcaklığı, atık miktarı gibi farklı parametrelere göre fiziksel özelliklerdeki değişim izlenmiştir.

Ayrıca anaerobik sistemlerde üretilen biyogaz içeriğinin enerji üretim sistemlerine etkisini analiz etmek ve kıyaslama yapmak için kimyasal ve biyolojik yöntemlere alternatif olarak sıkça kullanılan atıkların direk yakılmasının da analizi yapılmıştır. Bu kapsamda, kurutulmuş organik atıkların yanması sonucu elde edilen ısı miktarı ve ortaya çıkan emisyonlar hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Emisyon, hidrojen, hitan, metan, yakma.



The Effect of Biogas Content in Anaerobic Systems on Energy Production Systems

Kübra SORGULU

Department of Environmental Engineering
Master of Science Thesis

Advisor: Prof. Dr. Ahmet Demir

In this study, the amount of potential production of methane, hydrogen from organic wastes and hythane which is a blend of hydrogen and methane with a particular rate are discussed. Methane, which is the main component of natural gas, is a fossil fuel with a wide range of uses, from domestic applications to industrial systems. It is still widely used as the main energy source. However, just like other fossil fuels, natural gas reserves are rapidly depleted and environmental pollution increases as a result of fossil fuel use.

The hythane obtained by injecting particular amounts of hydrogen into methane is a promising gas, in terms of natural gas dependence, and environmental issues.

In this particular study, the amount of methane and hydrogen that can be obtained from the food wastes by anaerobic digestion method has been calculated. Changes in physical properties are studied according to different parameters such as hydrogen ratio, ambient temperature, and the amount of organic waste.

In addition, incineration of organic wastes, which are frequently used as an alternative to chemical and biological methods, is also analyzed. The amount of heat and emissions resulting from the combustion of dried organic wastes are calculated.

Keywords: Emission, hydrogen, hythane, methane, incineration.

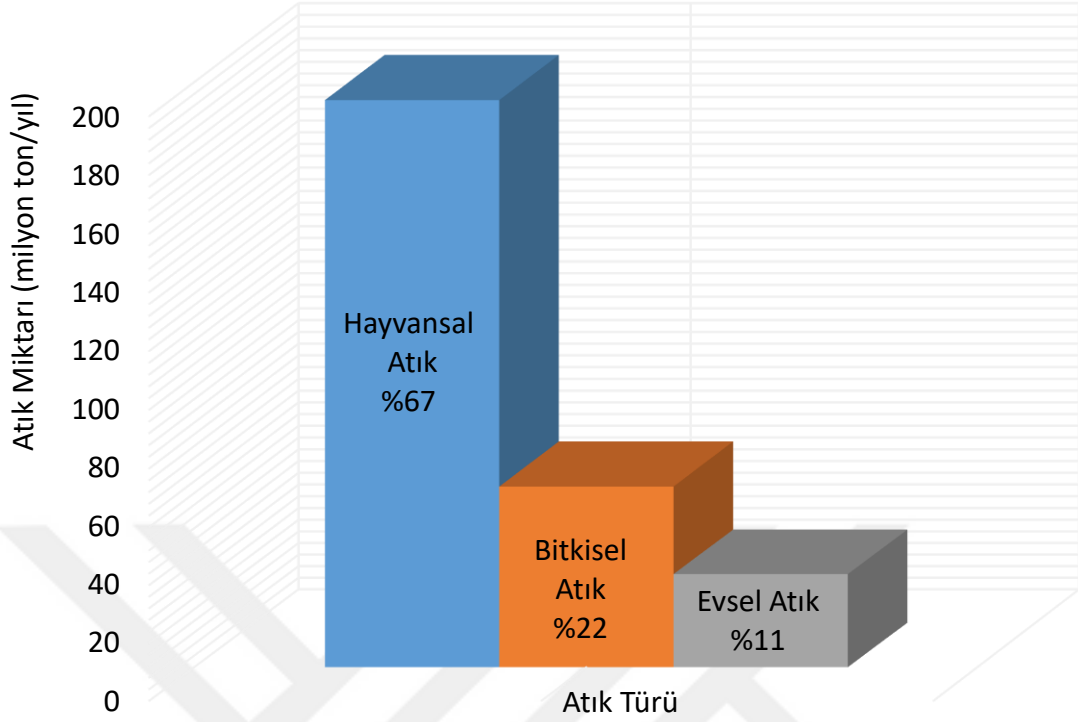


YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

1.1 Literatür Özeti

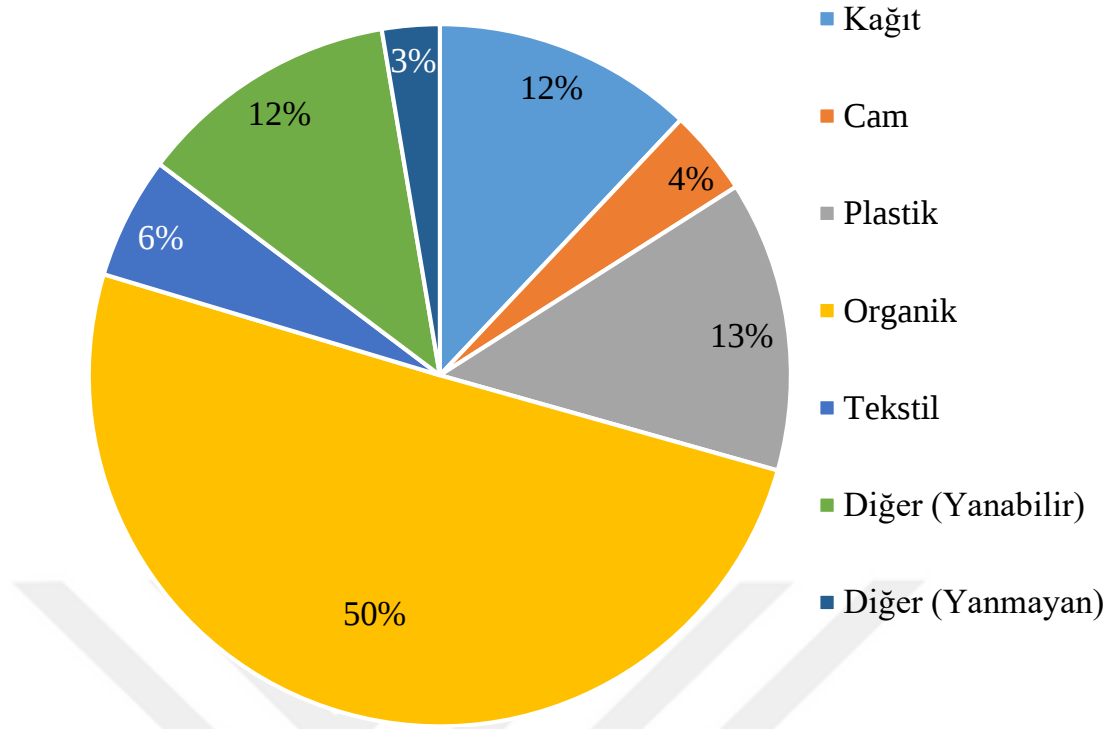
Küresel bazda nüfus artışı ve hayat standartlarındaki gün geçtikçe artan yükseliş tüketimde kaçınılmaz bir artışa sebep olmaktadır. Bu değişim enerji kaynaklarımız üzerindeki talebi ciddi oranda artırarak arz talep dengesini bozmakta, sınırlı fosil kaynaklar bu talebe cevap vermekte zorlanmaktadır. Bu durum alternatif enerji kaynaklarına ve yeni teknolojilere yönelime sebep olmaktadır. Rüzgâr, güneş ya da jeotermal gibi dünyanın bize sunduğu doğal kaynakların yanında tüketim çılgınlığının çok yüksek olduğu günümüzde sürekli üretmeye devam ettiğimiz “atık” içerisindeki organik kısım da bir enerji kaynağı olarak karşımıza çıkmaktadır. Zaten atık bertarafı tüm dünyada ve Türkiye’de en verimli şekilde çözülmesi gereken bir sorundur. Hem atıktan kurtulup hem faydalı kullanıma dönüştürme yöntemi olarak organik atıklardan enerji eldesi gün geçtikçe popülaritesi artan bir seçenektir.

Büyük bir atık potansiyeline sahip olan ülkemizde son yıllarda atığın enerjije dönüşümü konusunda ciddi adımlar atılmaktadır. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre 2018 yılında atık hizmeti veren tüm belediyelerde toplam 32 milyon 209 bin ton evsel atık toplanmıştır. Belediyelerden alınan veriler doğrultusunda yapılan hesaplamalara göre kişi başına düşen günlük ortalama atık miktarı 1,16 kg’dır [1]. Bu miktar tüm atığı temsil etmektedir. Bu atığın düzenli depolama tesislerine gönderilen miktarı %67,2 ile yüksek bir orandır. %20,2’si belediyelere ait çöplüklere, %12,3’ü geri kazanım tesislerine gönderilmiş, %0,2’si ise gömme, açıkta yakma, arazi veya dereye dökme gibi daha ilkel yöntemler ile bertaraf edilmiştir. Şekil 1.1’de de görülebileceği gibi Türkiye’de 2019 yılında 193,9 milyon ton hayvansal atık, 62,2 milyon ton bitkisel atık ve 32,2 milyon ton evsel atık ortaya çıkmaktadır [2].



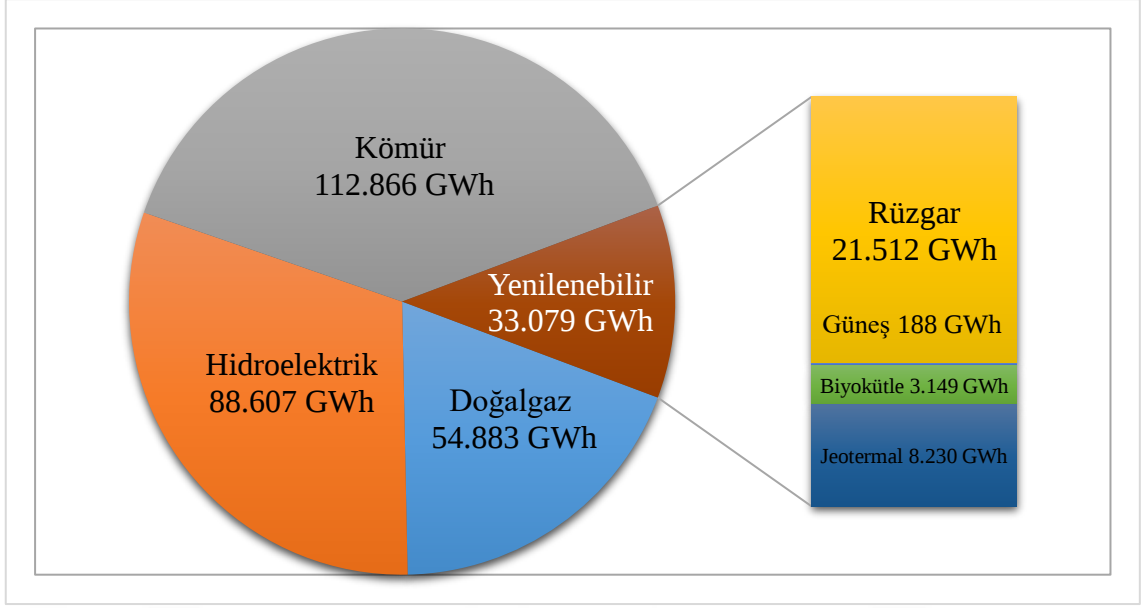
Şekil 1.1 Türkiye’de 2019 yılında üretilen atık miktarları (Kaynak [2]’den uyarlanmıştır)

Evsel atık içeriği organik atıkların yanı sıra plastik, kâğıt, metal, cam, mobilya gibi hacimli atıklar, bahçe atıkları, pil ve ampul gibi kimyasal içerikli atıklardan oluşur. Bunların bir kısmı geri dönüştürülebilir, bir kısmı faydalı kullanıma uygun atıklardır. Atıkların ayrılması için en uygun metot kaynağında ayrıştırma olsa da çoğu durumda bu uygulanamadığı için toplandıktan sonra ayrıştırılıp gerekli işleme tabi tutulurlar. Atık yönetimine göre öncelikli kural atık önlemek olmalıdır. Önlenemediği noktada atık azaltmaya gidilmelidir. Tüm bunlardan sonra gene de ortaya çıkan atıklar için takip edilecek adımlar yeniden kullanım, geri dönüşüm, enerji geri kazanımı ve son seçenek olarak bertarafıdır. Türkiye için bakıldığında Şekil 1.2’de görüldüğü üzere ortaya çıkan evsel atığın yarısını organik atıklar oluşturmaktadır. Kalan yarısı ise tüm diğer atık türlerini ihtiva eder. Organik atık oranının yüksek olması biyoenerji dönüşümü için oldukça önemli bir avantajdır.



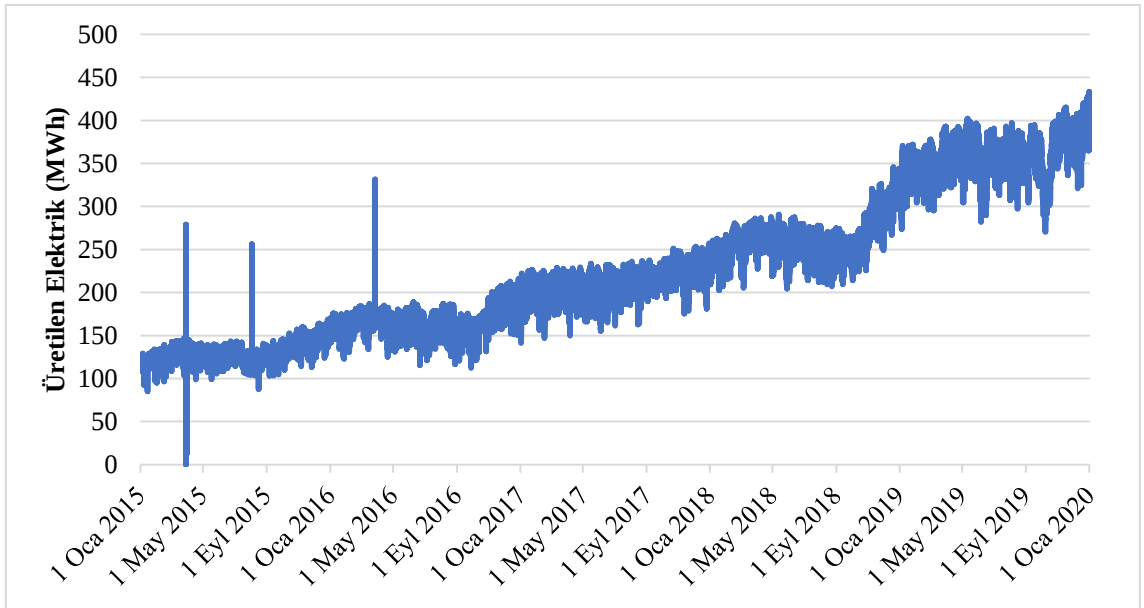
Şekil 1.2 Evsel atık karakterizasyonu

Ülkemizde ve dünyada gelişmişlik düzeyi arttıkça enerji ihtiyacı dolayısıyla elektrik tüketimi sürekli artmaktadır. Türkiye’de elektrik enerjisi tüketimi 2017 yılına göre 2018 yılında %2,2 artmıştır. 2018 yılındaki tüketim 304,2 milyar kWh olarak ölçülmüştür. Elektrik üretimi ise 2018 yılında gene 2017’ye kıyasla %2,2 artmıştır ve toplam 304,8 milyar kWh elektrik üretilmiştir. Ülkemizin kurulu gücü 2019 yılı Eylül ayı sonunda ölçüldüğünde 90.720 MW olarak belirlenmiştir [3]. Ülkemizde elektrik; kömür, doğal gaz, hidroelektrik ve rüzgâr, güneş, jeotermal ve biyokütle gibi yenilenebilir kaynaklar kullanılarak elde edilir. Ayrıca nükleer enerjiden elektrik elde edilmesi için çalışmalar devam etmektedir. Şekil 1.3’de görülebileceği gibi 2019 yılında elektrik üretiminin %11’i yenilenebilir enerji santrallerinden (güneş, rüzgâr, biyokütle ve jeotermal) sağlanmıştır. Hidroelektrik santraller de dâhil edildiğinde 120 TWh elektrik üretimi yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilmektedir [4]. Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı verilerine göre Türkiye’de biyokütle kaynaklı atık potansiyeli 8,6 milyon ton eşdeğer petrol (MTEP) ve elde edilebilecek biyogaz miktarı ise 1,5-2 MTEP olduğu tahmin edilmektedir [3].



Şekil 1.3 Türkiye’de 2019 yılında yakıt türüne göre gerçekleşen elektrik üretimi (Kaynak [4]’ten uyarlanmıştır)

Yaşam sürdüğü sürece biyokütle sonsuz elde edilebilecek bir enerji kaynağıdır. Bu kaynağı verimli şekilde değerlendirmek hem çevresel hem de ekonomik açıdan önemlidir. Türkiye’de mevcut biyokütle kaynaklı elektrik üretimi yapan santrallerde gerçekleşen anlık elektrik üretimi Şekil 1.4’te verilmiştir. Yenilenebilir enerjiye verilen teşvikler ve teknolojik gelişimler sayesinde son 5 yılda biyokütle bazlı elektrik üretimi 3 kat artmıştır [3].



Şekil 1.4 Türkiye’de biyokütle kaynaklı santrallerinde gerçekleşen elektrik üretimi (Kaynak [3]’den uyarlanmıştır)

Küresel enerji talebi, daha yüksek yaşam standartları sağlamak ve dünya ekonomisinin gelişmesine izin vermek için artmaya devam etmektedir. Mevcut enerji sağlayıcı bağlamında fosil yakıtlar günümüzde hala en yaygın kullanımı olan kaynaklardır ve toplam birincil enerji talebinin %80'ini 2035'e kadar tedarik etmeleri beklenmektedir [5]. Bunun yanında, 2035 yılına kadar yenilenebilir kaynakların kullanımı hızla artacak ve taleplerin de dört kat artacağı öngörülmektedir [6]. Gelecekteki enerji senaryolarına göre sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada yenilenebilir kaynaklar önemli rol oynayacaktır. Atıklardan biyogaz üretimi uzun yıllardır bilinen ve hakkında çok fazla çalışma olan bir konudur. Biyogaz içeriğinde yüksek oranda bulunan metan gazı doğal gaz için kritik öneme sahip bir gazdır. Ekonomik kalkınma, çevresel faktörler gibi kriterler tüm dünya için metanı vazgeçilmez bir kaynak olarak görmeye mecbur bırakmıştır. 2015 yılı itibarıyla tüm dünyada 201,9 trilyon m³ doğal gaz rezervi bulunmaktadır. Bu rezerv yaklaşık %25'lik payla Rusya'da bulunmaktayken onu yaklaşık %17 ile İran ve %12'lik pay ile Katar takip etmektedir. Ülkemizde doğal gaz rezervi %0,01 seviyelerindedir [7]. Yaklaşık %95 metan gazından oluşan doğal gaz tek başınayken zehirsiz, kokusuz, hafif bir gazdır. Farklı yakıt türlerine kıyasla CO₂ emisyonu minimum seviyededir. Bu durum küresel iklim değişikliğini artıracak etkilere katkısının düşük olduğunu gösterir.

Bunun yanı sıra son yıllarda temiz bir enerji taşıyıcısı olarak hidrojen ön plana çıkmaktadır. Hidrojen doğada en fazla bulunan element olmasına rağmen saf halde bulunmaz. Temel olarak fosil yakıtlardan, biyokütleden ve sudan çeşitli prosesler uygulanarak elde edilebilir.

Hidrojen, karbondan arındırmak için bir seçenek olmakla beraber, enerji eldesinin ihtiyaçtan fazla olduğu vakitlerde üretilen yenilenebilir enerjiyi depolama ve iletme için de kullanılabilir [8]. Hidrojenin metana ilave edilmesiyle elde edilen ısı değer artarken karbondioksit emisyonunda düşüş meydana gelir. Hidrojenin doğal gaz ile karıştırılması, sera gazı etkisine sebep olacak emisyonlara sebep olmayacağı gibi çevre dostu alternatifler sunmaktadır. Bu avantajlar düşünüldüğünde çeşitli yenilenebilir kaynaklar kullanılarak hidrojen ve metan eldesi ve bunların karışımı olan biyohitan eldesi ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmaktadır. Henüz yeni bir konu olmasıyla beraber konuyla alakalı gerek teorik gerek deneysel çalışmalar literatürde

mevcuttur [9-10-11]. Yapılan çalışmalardan bazılarını inceleyecek olursak örneğin; Ghimire ve diğ. yaptıkları çalışmada atık su arıtma ve sıvı biyo-yakıt üretimi (biyodizel ve biyoetanol) için mikroalglerin kullanımı ile ortaya çıkan yan ürünleri, gaz halinde biyo-yakıtların üretimi için anaerobik fermantasyonda besin olarak kullanmışlardır. Dolayısıyla anaerobik çürütme ile birleştirilmiş karanlık fermantasyon yönteminin alg biyokütlelerinden hidrojen ve metan üretimi için potansiyel bir teknoloji olabileceğini görmüşlerdir. Hitan (Hythane) olarak bilinen bu gaz formundaki biyo-yakıt karışımının üstün özelliklere sahip olduğu ve giderek fosil yakıtlara bir alternatif olacağı iddiasında bulunmuşlardır [12]. Akhlaghi ve diğ. aktif çamurun aşı olarak kullanıldığı evsel yemek atıklarından biyohidrojen üretimi konusunda pH ve aşı/substrat oranının biyohidrojen üretimi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu iki parametrenin H_2 verimini, fermantasyon oranını ve biyokimyasal süreçleri etkilediğini tespit etmişlerdir. Minimum ve maksimum verimleri 41 L H_2 /kg (pH = 7,5, aşı/substrat oranı=1,74 iken) ve 156-160 L H_2 /kg TOK (pH=5,5, aşı/substrat oranı=0,58 ve 1,74 iken) olarak tespit etmişlerdir. Karbonhidratların H_2 'ye dönüşüm aralığı teorik eşiğin %9,4-36,2'sine karşılık gelen 0,37-1,45 mol H_2 /mol heksozdur. H_2 üretimi için düşük pH'larda ve yüksek aşı/substrat oranlarının uygun şartlar olduğu belirlenmiştir [13].

Chen ve diğ. yapmış oldukları çalışmada anaerobik fermantasyon sürecini verimli şekilde düzenleyerek evsel organik atıklardan hidrojen ve metan üretim verimlerini arttırmak için iki aşamalı yeni bir yöntem üzerinde durmuşlardır. Öncelikle atığı alkalın koşullar altında fermente ederek hidrojen ve uçucu yağ asitleri ile zenginleştirilmiş fermantasyon sıvısı (aşama I) üretmek için fermente etmişler ve daha sonra fermantasyon sıvısının metan üretimi (aşama II) için nötr pH değerinde anaerobik olarak işlemişler ve böylece hem hidrojen hem de metanın verimi önemli ölçüde artmıştır. En yüksek H_2 ve uçucu yağ asidi verimleri, C/N oranının 25,2, pH'ın 8 olduğu birinci aşamada elde etmişlerdir. İkinci aşamada ise fermantasyon sıvısı ile en yüksek CH_4 verimi elde edilmiştir. Sonuç olarak toplam enerji kazancını ise 4,54 kWh/kg-KOİ olarak kaydetmişlerdir [14].

Kraussler ve diğ. metan ve hidrojen karışımı olan hitanla ilgili deneysel bir çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışma sonucu karışıma ait alt ısı değeri 15,5 MJ/m³ ve Wobbe Index değeri 43,4 MJ/m³ bulunmuştur [15].

Yeshanew ve diğ. entegre bir sistem üzerinde çalışmış, ve anaerobik sabit yataklı reaktör ile sürekli ve tam karışımli reaktöre entegre edilmiş bir sistemde yemek artıklarından biyohitan üretimini deneysel olarak gerçekleştirmişlerdir. Hidrolik bekletme süresi 200 gün olduğu belirtilen bu çalışmada maksimum biyohidrojen 391,7 L-H₂/m³-gün ve maksimum biyometan 2021,6 L-CH₄/m³-gün olarak bulunmuştur. En yüksek hitan verimlerini ise sürekli tam karışımli reaktör için 3,5 ve sabit yataklı reaktör için 1,5 gün hidrolik bekletme süresinde elde ettiklerini ifade etmişlerdir [16].

1.2 Tezin Amacı

Küresel bazda enerji alanında yenilenebilir kaynaklara eğilim her geçen gün artmaktadır. Bir yandan kaynakları daha az tüketebilmek bir yandan da çevreyi daha az kirletecek sistemler üzerinde akademik ve endüstriyel alanda yoğun şekilde çalışılmaktadır. Tüm dünyada odak konulardan biri olan karbondioksit emisyonlarının azaltılması için daha verimli, çevre dostu atığın en aza indirildiği sistemler geliştirilmelidir.

Hidrojen, karbondioksit emisyonu “sıfır” olan bir enerji taşıyıcısıdır [17]. Metan ve hidrojenin belirli oranlarda karışımı olan hitan enerji ve çevre açısından pek çok avantaja sahiptir. Bir yandan daha yüksek ısı değerde gaz elde edilirken diğer yandan da metanın yakılarak enerji elde edildiği sistemlerde karbondioksit emisyonunda düşüş sağlanmaktadır. Dahası dünyanın büyük bir bölümünde kömür ve petrol ile birlikte uzun süredir ana enerji kaynağı olan metanın tüketimi bu sayede azaltılabilir.

Bu tez çalışmasının amacı; anaerobik sistemlerde atıklardaki organik içeriğin metan ve hidrojen yoluyla enerji eldesinin verimlerini hesaplamak, metana hidrojen ilavesi yapıldığında gerçekleşen durumu hesaplamak ve bu enerji miktarının atığın direkt olarak yakılmasıyla kıyaslanmasıdır. Bu kapsamda gerçekleştirilecek çalışmanın spesifik amaçları ise;

- Organik atıktan metan eldesinin hesabının yapılması,
- Organik atıktan hidrojen eldesi hesabının yapılması,

- Metan gazına hidrojen gazı ilavesiyle elde edilen hitan gazı eldesi hesabının yapılması,
- Organik atığın direkt olarak yakılması sonucu ortaya çıkan ısıl güç hesabının yapılması ve
- Elde edilen sonuçların farklı çevresel koşullar altında verimlerinin nasıl değiştiğinin gözlemlenmesidir.

Bu tez kapsamında evsel organik atıklardan anaerobik koşullar altında laboratuvar şartlarında hidrojen ve biyogaz üretimi sonucu elde edilebilecek enerji ve karbondioksit emisyonu teorik olarak hesaplanmıştır. Ayrıca metan ve hidrojenin bir karışımı olan hitan (hythane) için hesaplamalar yapılmıştır. Son olarak organik atığın direk yanması sonucu ortaya çıkan ısıl enerji ve karbondioksit miktarı da hesaplanmış ve tüm senaryolar kıyaslanmıştır.

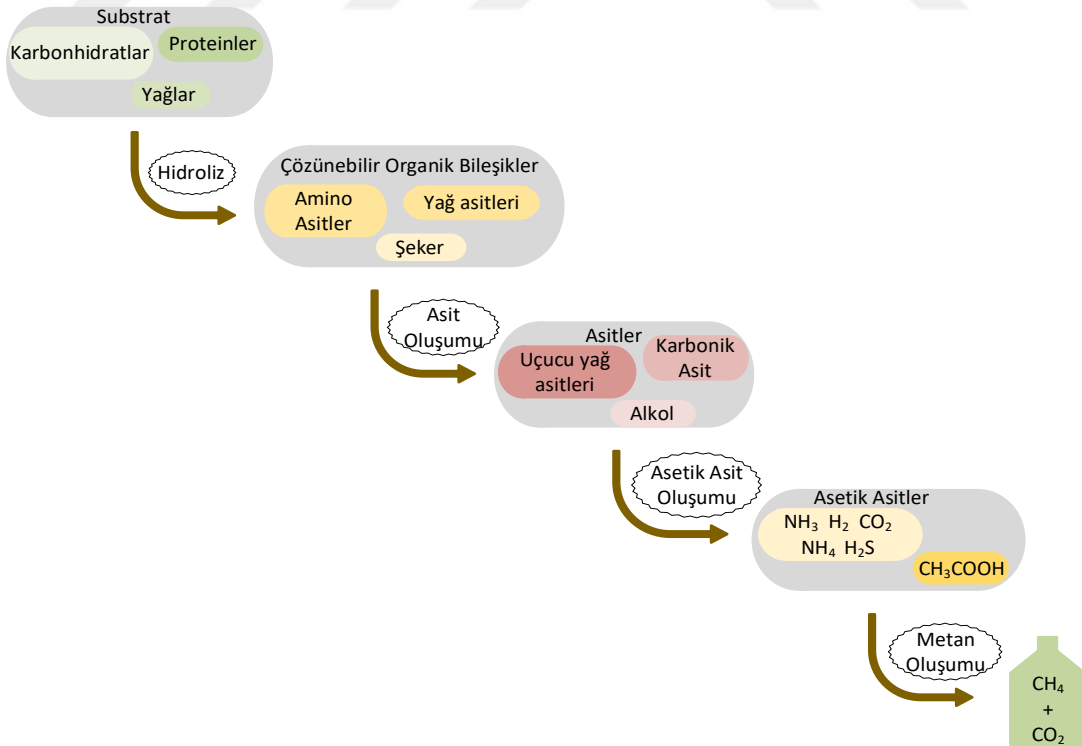
1.3 Hipotez

Bu çalışmanın hipotezi; ayrı ayrı enerji alanında popüler olan metan ve hidrojenin organik atıklardan eldesi ile enerji yoğunluklarının teorik olarak hesaplanması ve daha temiz bir enerji taşıyıcısı olan hidrojenin metanla karıştırıldığında enerji verimini nasıl etkilediğini teorik olarak göstermektir. Ayrıca organik atığın yakılması ile ortaya çıkan enerji potansiyeli de tüm bu sonuçlarla kıyaslanarak değerlendirilecektir.

2.1 Anaerobik Çürütmenin Esasları

Anaerobik çürütme, atık sulardan, katı atıklardan ve çeşitli biyokütle türlerinden organik maddeyi biyogaz, metan, hidrojen gibi faydalı gazlara dönüştürmek için kullanılan çevre dostu bir yöntemdir [18]. Söz konusu proseste, mikroorganizmalar, oksijensiz ortamda organik materyali parçalayarak, metan (CH_4), karbondioksit (CO_2) ve H_2 gibi diğer indirgenmiş gazların üretilmesini sağlarlar [19]. Şekil 2.1’de de görülebileceği gibi çeşitli organik maddelerin metan ve karbondioksite dönüşümü karışık mikrobiyolojik flora tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu oksijensiz parçalanma temel olarak üç fazda gerçekleşir:

- Asit Oluşumu
- Hidroliz
- Metan Oluşumu



Şekil 2.1 Anaerobik çürütme prosesinin aşamaları (Kaynak [7]' uyarlanmıştır)

2.1.1 Hidroliz

Hidroliz basamağında karmaşık yapılı organik moleküller, mikroorganizmaların hücre dışı enzimleri vasıtasıyla çözünerek daha basit yapıda moleküllere dönüşürler. Kompleks karbonhidrat olan selüloz, lignin ve hemiselüloz gibi ürünler daha kısa zincirli yapı olan glikoz, pentoz ve heksoza; benzer şekilde proteinler, polipeptid ve aminoasitlere; yağlar ise alkol, asit ve hidrojene dönüşür. Böylece hidroliz basamağı tamamlanır. Hidroliz basamağında biyolojik parçalanma hızını yağın hidrolizi belirler. Yağın hidrolizi çok yavaş gerçekleşir [20].

2.1.2 Asit Oluşumu

Asit oluşumu evresinde, hidrolizde çözünen organik moleküller fermantatif bakteriler veya anaerobik oksitleyiciler tarafından kullanılır [21]. Bu mikroorganizmalar hem zorunlu hem de fakültatif anaeroblardır. Kararlı bir anaerobik çürütücüde, çürüme asetat, karbondioksit ve hidrojenin oluşması ile devam eder. Bir miktar uçucu yağ asitleri ve alkoller gibi ara ürünler de proseste yer alır. Bu çürüme mikroorganizmalar için yüksek enerji verimi sağlar ve ürünler doğrudan metan üreten mikroorganizmalar tarafından kullanılabilir.

Asit üretimi aşamasında elde edilen ürünler yaklaşık olarak %51 asetat, %19 H_2/CO_2 ve %30 oranında ise uçucu yağ asitleri, alkoller veya laktat gibi indirgenmiş ürünlerden oluşur [21]. Bu adım genellikle kompleks yapıdaki organik maddenin anaerobik olarak çürütülmesinde en hızlı adım olarak kabul edilir. Oluşan ara maddeler; iki karbon atomundan daha uzun yağ asitleri, bir karbon atomundan daha uzun alkoller, dallı zincirli ve aromatik yağ asitlerinden oluşur. Bu ara ürünler doğrudan metan oluşumunda kullanılamaz ve hidrojen yardımcıları ile sentrofik ilişkide zorunlu proton indirgeyici bakteriler tarafından asit oluşumu aşamasında asetat ve H_2 'e oksitlenir [21]. Bu basamaktan elde edilen ürünler, daha sonra anaerobik çürütmenin son aşaması olan metan oluşum safhasında kullanılan metanojen adı verilen substratlardır.

2.1.3 Metan Oluşumu

Biyogaz bileşenlerinin çoğunluğu metan oluşumu fazı sırasında üretilir. Metanojenik bakteriler asetatın yaklaşık %70'ini metana ve geri kalan kısmı H_2 ve CO_2 'e dönüştürmektedir [22].

Anaerobik çürütme prosesinde metan bakterileri çok hassas olduğundan dolayı en kritik aşama metan oluşumu basamağıdır. Substrat tipi, pH, sıcaklık gibi birçok faktörden etkilenir. Çürütücünün aşırı yüklenmesi, $3^\circ C$ 'den fazla sıcaklık değişimi veya sisteme büyük miktarda oksijen dâhil olması gibi faktörler metan oluşumu fazında bakteri duyarlılığı nedeniyle çürütme sürecini sonlandırabilir [22]. Asit oluşumu ve metan oluşum fazları farklı ortam koşulları gerektirir ve belirli substrata ihtiyacı vardır. Son adım olan metan oluşumu önceki adımlardan daha yavaştır. Tablo 2.1'de CH_4 ve H_2 'in 300K de 100 kPa basınçtaki fiziksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.1 Metan ve Hidrojenin 300°K sıcaklık ve 100 kPa basınçtaki fiziksel özellikleri

Parametre	Birim	Hidrojen	Metan
Özgül Isı (c_p)	kJ/kgK	14,31	2,236
Özgül Isı (c_v)	kJ/kgK	10,19	1,713
Isı Kapasitesi Oranı (k)	-	1,406	1,303
Uçuculuk (f)	kPa	100,1	99,83
Entalpi (h)	kJ/kg	3958	3,156
İletkenlik (k)	W/mK	0,1779	0,03438
Molar Kütle (MW)	kg/kmol	2,016	16,04
Asentrik Faktör (ω)	-	-0,2187	0,01141
Kritik Basınç (P_c)	kPa	1296	4599
Kritik Sıcaklık (T_c)	K	33,15	190,6
Prandtl Sayısı (Pr)	-	0,7315	0,7318
Yoğunluk (ρ)	kg/m ³	0,08077	0,6443
Entropi (s)	kJ/kgK	53,52	0,01825
Ses Hızı (SS)	m/s	1319	449,7
Kaynama Sıcaklığı (T_{nb})	K	20,37	111,7

Tablo 2.1 Metan ve Hidrojenin 300°K sıcaklık ve 100 kPa basınçtaki fiziksel özellikleri (Devamı)

Parametre	Birim	Hidrojen	Metan
Doyma Sıcaklığı (T_{sat})	K	20,32	111,5
İç Enerji (u)	kJ/kg	2720	-152,1
Sıkıştırılabilirlik Faktörü (Z)	-	1,001	0,9983
Isıl Yayınlım (α)	m ² /s	0,0001539	0,00002387
Hacimsel Isıl Genleşme Katsayısı (β)	1/K	0,003332	0.003354
Özgül Hacim (v)	m ³ /kg	12,38	1,552
Üst Isıl Değer (ÜID)	kJ/kg	141764	55516
Alt Isıl Değer (AID)	kJ/kg	119946	50023
Kinematik Viskozite (v)	m ² /s	0,0001126	0,00001747
Viskozite (μ)	kg/ms	0,000009093	0,00001125
Faz	-	Gaz	Gaz

2.2 Anaerobik Sistemlerde Biyogaz Üretimini Etkileyen Faktörler

Anaerobik sistemlerde etkili faktörler hakkında genel olarak kabul görmüş iyi bilenen temel bilgiler vardır. Bu temel anlayışlar biyogaz üretimini geliştirme stratejilerinin de temelini oluşturur. Anaerobik sistemler büyük ölçüde bakteriyel faaliyetlere bağımlı süreçler olduğu için elverişli çevrenin koşulları çok önem taşır. Mikroorganizmaların yaşamını sürdüreceği ortam mevcut kullanılmak istenen hammaddedir. Bu nedenle, mikroorganizma toplulukları hammaddenin özelliklerinden doğrudan etkilenecektir. Mikroorganizmalar tarafından yiyecek olarak rol oynayan hammaddenin, anaerobik çürütme sistemi içindeki temel yaşam koşullarını içermesi gerekir. Genel olarak, çevresel faktörlerin verimli bir anaerobik çürütme sürecine sahip olabilmesi için izlenmesi gereken optimum değerler veya yöntemler vardır.

Anaerobik süreçlerde biyogaz verimini etkileyen temel faktörler; sıcaklık, substrat karakteristiği, pH, hidrolik bekletme süresi, karıştırma gibi parametrelerdir [23].

2.2.1 Sıcaklık

Sıcaklık, herhangi bir anaerobik reaktörün performansını etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Özellikle metan oluşumu bu parametreden büyük ölçüde etkilenir. Organik atıkların parçalanabilirliği sıcaklıktaki değişime göre değişir. Proses sürecindeki çalışma sıcaklığına bağlı olarak, anaerobik çürütme işlemi üç farklı kategoriye ayrılır; psikofilik (12-20 °C), mezofilik (20-40 °C) ve termofilik (40-65 °C). Anaerobik çürütme sürecinin çoğu mezofilik ve termofilik sıcaklık aralıklarında gerçekleşir [24]. Bunun nedeni, mezofilik sıcaklıkta işlemin daha kararlı olması, metan oluşum aşamasını inhibe eden UYA birikimine daha az eğilimli olması ve eşdeğer biyogaz verimi için daha az yatırım ve net enerji gereksinimidir [25]. Bunun yanı sıra termofilik fazda zayıf metan verimi, lignoselülozik biyokütlenin biyolojik olarak bozunabilirliği, uzun başlangıç ve çürüme süresi gibi bazı sınırlamaları da vardır [26-27].

2.2.2 Substrat Karakteristiği

Genel olarak değerlendirildiğinde ana bileşenlerinde karbonhidrat, protein ve yağ olan biyokütle türleri biyogaz üretmek için substrat olarak kullanılabilir. Seçilen substratlar, fermentasyon prosesine uygun olmak gibi birtakım özelliklere sahip olmalı, yüksek besin değeri içermeli ve çürütmeden sonra gübre olarak kullanılma gibi arazi uygulamaları ihtimalleri açısından patojenler ve ağır metaller bulunmamalıdır. Biyogaz üretimi için kullanılan substratlar; tarımsal atıklar, evsel atıklar ve endüstriyel atıklar olmak üzere üç ana gruba ayrılabilir. Substrat olarak farklı bir örnek düşünülecek olursa sucul bitkiler de popüler olmaya başlamıştır. Algler biyogaz ve hidrojen üretimi açısından üzerinde çalışmalar yapılmaya devam eden bir substrat kaynağıdır.

2.2.3 pH

Hammaddedeki pH seviyesi değişimi anaerobik çürütme prosesini etkiler. Yapılan bazı çalışmalar kültür ortamının hidrojen-iyon konsantrasyonunun mikrobiyal büyüme üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olduğu sonucunu ortaya koymuştur ve çürütme işlemi aşırı asitlik ile inhibe edilmiştir [28-29]. Anaerobik çürütmeye karışan bakteriler, optimum aktivasyon için pH=7'ye yakın değerler ile pH=6-8

aralığına sahiptir. 6,5'ten az ve 8,5'ten yüksek pH değerlerinde metan oluşumu inhibe edilmiş olur [30]. Anaerobik reaktördeki pH, prosesin meydana geldiği aşamaya göre değişir. Genellikle substratta bulunan proteinin parçalanması nedeniyle amonyak konsantrasyonundaki artışla birlikte artar ve uçucu yağ asidi konsantrasyonundaki artışla azalır. Organik evsel atıkların anaerobik olarak çürütülmesi sırasında, reaktörün pH değeri, fazla UYA oluşumu nedeniyle asidik aralığa (pH 4-5,5) düşebilir [31]. Bu ise tüm prosesi engelleyebilir. Bu sorunu çözmek için, reaktöre sığır gübresi gibi iyi bir tamponlama kapasitesine sahip çürütme substratı sodyum hidroksit (NaOH) veya sodyum bikarbonat (NaHCO₃) gibi bazı alkalın reaktiflerle birlikte eklenebilir [30]. Bu nedenle, anaerobik çürütme prosesinin başarılı sonuçlar verebilmesi için sistemin pH'ını düzenli olarak izlemek önemlidir.

2.2.4 Hidrolik Bekletme Süresi

Hidrolik bekletme süresi substratın reaktörde kaldığı süredir. HRT (Hydraulic Retention Time) ile ifade edilir. HRT aşağıda ifade edildiği gibi hesaplanır.

$$HRT = V_R / V_{subs} \quad (2.1)$$

Burada;

V_R : Reaktör hacmi (m³)

V_{subs} : Substratın miktarını (m³/gün) ifade eder.

Çok kısa HRT tüm sürecin başarısız olmasına neden olabilir. Genellikle, mezofilik koşullar altında ortalama bekleme süresi yaklaşık 20-30 gündür [22]. Kısa bekleme süreleri uçucu yağ asidi birikmesine sebep olabilir. Bu da ortamın pH'ını düşürür ki bu istenmeyen bir durumdur.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde bozunmanın %89-97'lik oranının 1,5-3 gün arasında bir bekleme süresinde gerçekleştiğini ortaya koymaktadır [32].

2.2.5 Karıştırma

Karıştırma; pH ve sıcaklığın dengelenmesine ve reaktörde katıların ve istenmeyen pisliklerin tabakalaşmasını ve birikmesini önlemeye yardımcı olur. Ayrıca, substrat ve mikroorganizmalar arasındaki teması arttırır ve biyogaz üretiminin artmasını sağlayan inhibitör maddeleri seyreltir.

Karıştırma davranışı, hesaplamalı akışkanlar dinamiği programları kullanılarak anaerobik çürütme prosesi parametreleri ile ilgili partikül hareketleri ile tahmin edilebilir [33-34].

Karıştırma; mekanik tel çekme, mekanik pompalama ve bir gaz enjeksiyon sistemi olmak üzere üç ana gruba ayrılabilir. Mekanik tel çekme en yaygın karıştırma türüdür. Bir pervane, bir çubuk karıştırıcı ve bir kanatlı karıştırıcıdan oluşur. Bu sistemin ana dezavantajı, bileşenlerinin aşınması ve onarım için daha fazla zaman ve para harcanmasıdır. Mekanik pompalama sistemi, reaktördeki alt tabakayı alır ve basınçla geri gönderir. Bu reaktörün içinde bir akış oluşturur. Sistemin dezavantajı, substratların neden olduğu bir tıkanıklığı içine alabilir.

Gaz enjeksiyon sistemi, reaktör seviyesini basınçla düşürmek için tedarik edilen biyogazı enjekte eder. Gaz kabarcıkları reaktörde yukarıya doğru hareket eder ve karışmayı sağlar [35].

2.3 Anaerobik Sistemlerde Hidrojen Üretimi

Hidrojen doğada en fazla bulunan element olmasıyla beraber saf halde bulunmaz. Temel olarak fosil yakıtlardan, biyokütleden ve sudan çeşitli prosesler uygulanarak elde edilebilir. Bu proseslerden elektroliz, buhar reformasyon ve kömür gazlaştırma metotlarında enerji kaynağı olarak bazen fosil yakıtlar kullanılır. Başlıca enerji kaynaklarına göre üretim metotları Tablo 2.2’de özetlenmiştir [36]. Termokimyasal ve elektrokimyasal metotlar yoğun enerji kullanırlar ve her zaman çevre dostu değildir. Yenilenebilir olmayan enerji kaynaklarının kullanımı ve bunların sürdürülebilir olmaması istenen bir durum değildir. Biyolojik hidrojen üretim prosesleri ise çevre sıcaklığı ve basıncında işletildiği için daha az enerji tüketimi söz konusudur. Bu prosesler düşük enerji tüketimine sahip oldukları ve yenilenebilir kaynakların kullanımı açısından yeni bir alan yarattıkları için çevre dostudur [37].

Tablo 2.2 Temel hidrojen üretim metotları

Metot	Enerji Kaynağı	Malzeme	Tanım ve Özellikler
Elektroliz	Elektrik	Su	Doğru akım, suyu O ₂ ve H ₂ 'ye (elektrokimyasal reaksiyon) ayırmak için kullanılır.
Termik	Termal	Su	Temizlenen doğal gaz, H ₂ ve karbon kurumlarını üretmek için plazma arkından geçirilir.
PV Elektroliz	Fotonlu	Su	PV panelleri elektrik üretmek için kullanılır.
Fotokataliz			Su, fotokatalizör tarafından hidrojen ve oksijene ayrılır.
Fotoelektrokimyasal metot			Bir hibrit hücre aynı anda ışığın emilmesi üzerine akım ve voltaj üretir.
Karanlık Fermantasyon	Biyokimyasal	Biyokütle	Işık yokluğunda H ₂ üretmek için biyolojik sistemler kullanılır.
Yüksek sıcaklık elektrolizi	Elektrik + Termal	Su	Elektrik ve termal enerji, yüksek sıcaklıklarda su ayrıştırma yapmak için birlikte kullanılır.
Hibrit Termokimyasal Çevrimler			Elektriksel ve termal enerji, döngüsel kimyasal reaksiyonları çalıştırmak için birlikte kullanılır.
Kömür Gazlaştırma			Kömürün sentez içine dönüştürülmesi
Fosil Yakıt İyileştirmesi			Fosil yakıtlar H ₂ ve CO ₂ 'ye dönüştürülür.
Biyofotoliz	Fotonlu + Biyokimyasal	Biyokütle + Su	H ₂ üretmek için biyolojik sistemler (mikrop, bakteri, vb.) kullanılır.
Fotofermantasyon		Biyokütle	Kimyasal olarak tasarlanmış sistemler H ₂ üretmek için fotosentezi taklit eder
Tarımsal Fotosentez			Fotoelektrotlar ve harici elektrik su elektrolizi için kullanılır.
Fotoelektroliz	Elektrik + Fotonlu	Su	

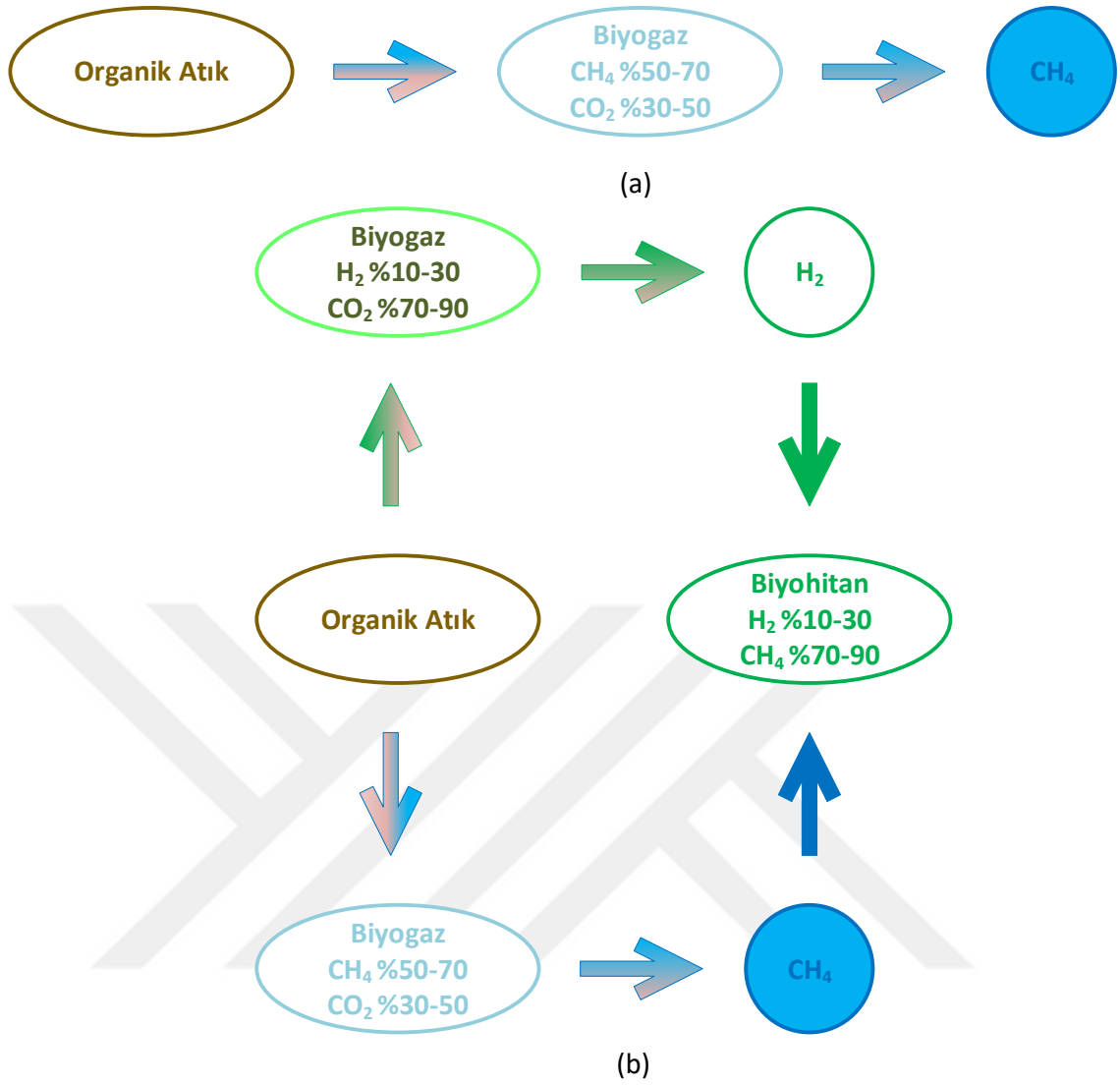
2.4 Anaerobik Sistemlerde Biyohitan Oluşumu

Biyohitan (biohythane), hidrojen ve metan gazlarının belirli oranlarda oluşturulmuş karışımıdır. Biyohitan, biyohidrojen üretimi aşamasından sonra biyometan basamağından oluşan iki aşamalı bir anaerobik fermantasyon işlemidir. Biyohitan seçeneği de organik atıkların daha iyi değerlendirilmesi için çevre dostu ve ekonomik olarak sürdürülebilir bir yaklaşım işlevi görmektedir. Metan ve hidrojenin avantajlarını birleştirdiği gibi gelecek için önemli bir yakıt olarak da kabul edilir. Bazı avantajlarını inceleyecek olursak;

- ❖ Sera gazı emisyonlarının azaltılması,
- ❖ Metanın ısı verimi büyük ölçüde artırıldığından yakıt verimliliğinin artırılması,
- ❖ Metanın yanma (alev) hızı büyük ölçüde artar ve metanın söndürme mesafesi azaltılabilir. Bu da motorun daha az giriş enerjisi ile tutuşmasını kolaylaştırır [38].

Hidrojen gazının birim kütlesine ait ısı değeri, doğal gazın birim kütlesine ait ısı değerinin neredeyse 2,1 katıdır. Birim hacimdeki ısı değeri olarak değerlendirildiğinde bu oran doğal gazın %30'u kadardır.

Hidrojen gazının doğal gaz içerisindeki oranının %10-15-20 gibi oranlara getirilerek yakılması ile yanma ünitesinin ve sistemin enerji ve ekserji verimlerinin arttığı, karbon emisyonlarının azaldığı yapılan çalışmalardan anlaşılmaktadır.



Şekil 2.2 Anaerobik çürütme ile a) tek aşamalı biyometan b) iki aşamalı ve biyohitan üretimi (Kaynak [9]'dan uyarlanmıştır)

İki aşamalı anaerobik çürütme, metan bakımından zengin biyogaz ile sonuçlanan asetojenik faz ve metanojenik fazdan hidrojen bakımından zengin bir biyogaz elde edilmesine izin veren asidojenik faz ve hidrolizin (aynı zamanda karanlık fermentasyon olarak da adlandırılır) fiziksel olarak ayrılması yoluyla meydana gelir. Bu iki aşama, aktiviteleri için spesifik çalışma koşulları gerektiren farklı mikroorganizmaların yaygınlığı ile tanımlanır. Anaerobik çürütme ile tek aşamalı biyometan ve iki aşamalı ve biyohitan üretimi Şekil 2.2'de gösterilmiştir [9].

TERMOKİMYASAL YÖNTEMLERLE ATIKTAN ENERJİ ÜRETİMİ

Sentez gazı, biyogaz, biyometan, biyohidrojen ve biyohitan gibi biyoyakıtlar, ve/veya ısı, gazlaştırma, piroliz, fermentasyon, ayrıştırma, yakma ve anaerobik çürütme işlemleriyle elde edilmektedir. Sürdürülebilir atık yönetimi sağlanırken, fosil yakıtlara alternatif olarak çevreye zarar vermeyecek şekilde faydalı gazlar, elektrik, ısıtma, soğutma ve tatlı su elde edilmektedir. Çevresel yaşam kalitesini sürdürmek için sürdürülebilir atık yönetimi sağlamak hayati önem taşır.

3.1 Yakma

Hayvansal, bitkisel, endüstriyel ve evsel atıkların direk yakılması ile ısı elde edilmesi yaygın bir şekilde kullanılan bir yöntemdir. Atıklar yakma tesislerinde uygun koşullarda (sıcaklık, nem) yakılır ve elde edilen ısı güç santrallerinde ya da ısıtmada kullanılır. Bir yandan atıklar bertaraf edilirken diğer yandan enerji elde edilir. Bu yüzden yakma tesisleri aynı zamanda atıktan enerji (Waste to Energy) tesisleri olarak da bilinir [39]. Yanmadan elde edilen ısı ile kazanlarda yüksek sıcaklık ve basınçta buhar üretilebilir ve elde edilen buhar, buhar türbinlerinde elektrik üretmek için kullanılır [40].

Kokuların ortama sızmasını önlemek için çöp bunkerindeki hava atmosferik basıncın altında tutulur. Yakıcı için uygun büyüklük ve nemdeki atıklar direk yakılırken, büyük veya nemli atıklar yakma öncesi işleme tabii tutulurlar. Büyük boyutlardaki atıkları yakmaya uygun hale getirmek için yüksek kapasiteli kırıcılar, nemli atıkları kurutmak için de kurutucular kullanılır. Bir depo veya düzenli depolama alanından gelen atık, yakıcıya beslenir [41].

Yakma atığın fiziksel özelliklerine göre 1000 °C civarında gerçekleşir. Bu yüzden yakıcı duvarlarını aşırı ısı ve korozyondan korumak için bir refrakter malzeme astarı kullanılır. Atık yakıldıktan sonra, hacminin büyük bölümünü kaybeder ve kül oluşur. Elektrostatik çökeltici, kireç tozu dozajlama ekipmanı ve katalitik torba filtrelerden oluşan baca gazı temizleme sistemi ile bacalardan atmosfere

salınmadan önce baca gazındaki toz ve kirleticiler temizlenir. Kül içindeki yanmayan malzemeler (demir, hurda, metal vb.) geri kazanılır ve dönüştürülerek ilgili sektörlerde kullanılır [42]. Oluşan kül ise başta çimento sektörü olmak üzere farklı sektörlerde değerlendirilir.

3.2 Piroliz

Piroliz, organik materyallerin oksijen olmadan yüksek sıcaklıklarda kimyasal olarak ayrıştırılması işlemidir. Herhangi bir organik (karbon bazlı) ürüne uygulanabilir [43]. Proses sonunda organik malzemeler faydalı gazlara ve küle dönüşür. Öte yandan aşırı piroliz, kalıntı olarak karbon verir ve işleme karbonizasyon adı verilir. Piroliz genel olarak 400 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda gerçekleşir [44]. Ham maddede aynı anda hem fiziksel faz ve hem de kimyasal bileşimin içeriği değişir.

Hidroliz ve yanma gibi diğer yüksek sıcaklık işlemlerinin aksine, piroliz, su, oksijen veya diğer reaktiflerle reaksiyonu içermez. Ancak, oksijensiz bir ortam elde etmek pratik olarak mümkün olmadığından, herhangi bir piroliz sisteminde her zaman az miktarda oksidasyon meydana gelir [45].

Hem karışımlar hem de saf ürünler piroliz işlemine tabii tutulabilir. Karışım veya saf malzeme yüksek sıcaklığa maruz bırakılır ardından oksijen yokluğunda kimyasal ve fiziksel olarak farklı moleküllere ayrıştırılır. Ayrışma, malzemelerin kimyasal bağlarının sınırlı termal stabilitesi sayesinde gerçekleşir ve bu da ısı kullanılarak parçalanmalarına izin verir.

Termal bozunma, yeni moleküllerin oluşumuna yol açar. Bu, orijinal kalıntıdan farklı, genellikle daha üstün bir karaktere sahip ürünlerin alınmasını sağlar [46]. Bu özellik sayesinde piroliz, günümüz endüstrisi için giderek daha önemli bir süreç haline gelmekte, atıkların daha değerli olmasını sağlamaktadır.

Piroliz sıklıkla ısıl işlemle karşılaştırılır. Ancak, malzemenin tamamen veya kısmen oksitlenmesini içeren yanma ve gazlaştırma işlemlerinin aksine, piroliz, havasız ortamda ısıtmaya dayanır ve elde edilen ürünlerde yüksek enerji içeriği sağlar.

Piroliz ile karışım veya saf malzemelerden (odun kömürü, biyokömür), sıvı ve/veya yoğunlaşmayan gazlar (H_2 , CH_4 , C_nH_m , CO , CO_2 ve N_2) elde edilir. Sıvı faz, piroliz gazından yalnızca soğurken çıkarıldığı için, bazı uygulamalarda, bu iki akış,

doğrudan brülöre veya oksidasyon odasına sıcak sentez gazı sağlarken birlikte kullanılabilir.

Piroliz sırasında, bir malzeme belirlenen sıcaklığa kadar ısıtılır. Malzeme piroliz ünitesi içerisinde kalır ve işlem tamamlanıncaya kadar vidalı konveyör ile belirlenen hızda taşınır [47]. Pirolizin seçilen sıcaklığı, ürünlerin bileşimini ve verimini tanımlar (piroliz yağı, sentez gazı ve kömür).

3.3 Gazlaştırma

Gazlaştırma, biyokütle ve kömür gibi karbon içeriği olan bir ham maddeden ısıl değeri yüksek sentetik gaz (sentez gazı) elde edilmesidir. Gazlaştırma prosesi bir gazlaştırıcıya beslenen kömür veya biyokütleyle yüksek sıcaklıkta hava (veya oksijen) ve buhar verilmesi ile gerçekleşir [48]. Gazlaştırıcıda meydana gelen kimyasal reaksiyonların sonunda metan, hidrojen, karbon monoksit ve karbondioksitten oluşan sentez gazı, kül, cüruf ve mineral kalıntıları oluşur. Çeşitli saflaştırma işlemlerinden sonra hidrojen, metan veya bunların birleşimi olan hitan gazı saf halde elde edilir [49]. Doğal gaz ile benzer olarak renksiz, kokusuz, yüksek derecede yanıcıdır. Endüstride yaygın şekilde kullanım alanı mevcuttur. Elde edilen sentetik gaz, petrolü rafine etmek veya amonyak ve gübre elde etmek için kullanılabileceği gibi doğrudan kojenerasyon tesislerinde yakıt olarak da kullanılmaktadır [50].

Gazlaştırma ile bir yandan atıklardan faydalı gaz, ısı ve elektrik üretilirken diğer yandan da atık bertarafı açısından umut vadeditici bir alternatif yöntem sunulmuş olur. Bu avantajları sayesinde gazlaştırma tesisleri tüm dünyada enerji ve endüstriyel pazarlarda giderek daha önemli hale gelmektedir. Maliyetlerin azalması ile birlikte çevresel açıdan sürdürülebilirlik ve güvenilirlik, gerekli ham maddedeki esneklik gibi öne çıkan özelliklerinden dolayı gazlaştırma proseslerinin kullanımının yaygınlaşması beklenmektedir.

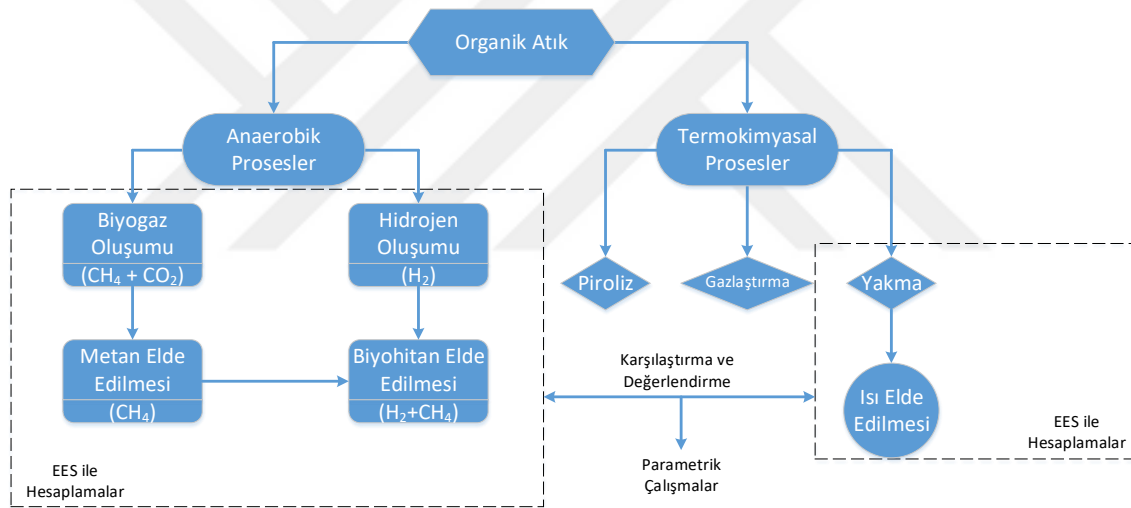
Gazlaştırma prosesinde yakıt olarak genellikle kömür, petrol atıkları, odun ve atıkları (dallar, dal, kök, ağaç kabuğu ve talaş), diğer bitkisel atıklar (mısır, hindistan cevizi kabuğu, hindistan cevizi kabuğu ve tahıl kamışı), orman artıkları, endüstriyel atıklar ve hayvansal atıklar (gübre) kullanılır [51]. Yakıtlar fiziksel ve kimyasal olarak farklılıklar gösterdiğinden, gazlaştırma yönteminde de farklı uygulamalar

mevcuttur. Farklı yakıtlar için farklı reaktör tasarımı ve/veya gazlaştırma teknolojisi gerekir.

Şu anda ticari kullanım için (i) sabit yataklı gazlaştırıcı (ii) akışkan yataklı gazlaştırıcı, (iii) sürüklenen akış gazlaştırıcı ve (iv) erimiş tuz veya erimiş metal kullanımını içeren işlemler olmak üzere dört tip gazlaştırıcı tip mevcuttur [51] Tüm sistemler, yakıt tipi, uygulama ve kullanım kolaylığı açısından göreceli avantajlar ve dezavantajlar gösterir ve her birinin belirli bir koşulda kendi teknik ve/veya ekonomik avantajları mevcuttur.



Bu tez kapsamında anaerobik koşullar altında organik atıklardan biyogaz oluşumu, hidrojen gazı oluşumu, hitan gazı oluşumu hesapları ve atığın direk yakılması konuları üzerinde durulmuş ve enerji eldesi hesabi yapılmıştır. Sıcaklık, pH gibi parametreler değiştirilerek yeni koşulların etkisi incelenmiştir. Ayrıca her bir yöntem için elde edilen ısıl güç sonucunda ortaya çıkacak emisyon miktarları hesaplanmıştır. Hesaplamalar EES (Engineering Equation Solver) programı ile yapılmıştır. Tez akım şeması Şekil 4.1’de verilmiştir. Farklı değişkenler için yapılan parametrik çalışma sonuçlarının tabloları ve grafikleri ortaya koyulmuştur.

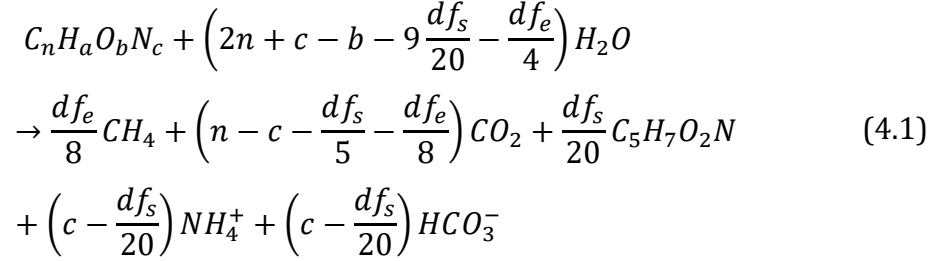


Şekil 4.1 Tez akım şeması

4.1 Biyogaz Oluşumu

Anaerobik prosesin mikrobiyolojisi oldukça karmaşıktır. Organik bileşikler, temel nihai ürün olan metana dönüşürken öncesinde farklı şekilde sentezlenirler. Net reaksiyona ulaşmadan önce ara adımlardan geçerler. Bu adımlar sırasında elektron dengesi sağlanmalıdır, çünkü organik maddede anaerobik prosese giren elektron eşdeğerlerinin çoğu veya BOİ_L, gaz fazına dönüşen CH₄'te korunur. Bu nedenle, BOİ'nin giderilmesi veya atık stabilizasyonu doğrudan metan oluşumuna bağlıdır. Arıtmadan sonra bazı ara ürünler kalırken, mikroorganizma tarafından tüketilen

organik maddelerin çoğu ana son ürünlere dönüştürülür. Bu ürünler karbondioksit, metan, su ve biyokütledir. Elektron eşdeğerleri olan “ f_s ”nin belirli bir kısmı (net) biyokütleyle sentezlenir ve buradaki amonyum hücre azotunun kaynağıdır [52]. Organik atıktan metan elde etme genelleştirilmiş reaksiyon aşağıdaki şekilde yazılabilir [52]:



Burada d aşağıdaki şekilde bulunur:

$$d = 4n + a - 2b - c \quad (4.2)$$

Burada f_e ve f_s enerji üretimi ve sentezi için kullanılan elektron fraksiyonlarıdır ve sırasıyla 0,9 ve 0,1 alınmıştır.

Analiz ve değerlendirmeler aşağıdaki kabullere göre yapılmıştır:

- Referans sıcaklık (T_0) ve basınç (P_0) sırasıyla 0°C and 1 atm alınmıştır.
- Kararlı hal şartları dikkate alınmıştır.
- Hava, hidrojen ve metan ideal gaz olarak modellenmiştir.

Belirli oranlarda metan ve hidrojenin karışımı olan hitanın alt ısı değeri (kJ/m³) aşağıdaki formülle hesaplanabilir:

$$AID = \sum y_i AID_i \quad (4.3)$$

Burada y_i ve AID_i sırasıyla karışım içindeki gazların hacimsel oranı ve alt ısı değeridir.

Hesaplamalar, çalışma grubumuz tarafından daha önce hazırlanmış olan bir teknik rapordaki organik atık analizi sonuçları referans alınarak yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmaya ait sonuçlar aşağıdaki Tablo 4.1’de verilmiştir:

Tablo 4.1 Organik atığın karakterizasyonu

Parametre	Birim	Değer
Moleküler Ağırlık	kg/kmol	12,18
Nem 65 °C	%	80,80
Kuru Madde	%	19,20
Yoğunluk	ton/m ³	0,42
Kızdırma Kaybı	%	92,80
Toplam Karbon	%	38,20
Toplam Azot	%	2,10
C/N	-	18,20
Toplam Organik Karbon	%	45,15
Toplam Kjeldahl Azotu, TKN	mg/kg	19,905
Toplam Kükürt	%	0,18
Toplam Fosfor	mg/kg	938
Potasyum	mg/kg	12,06
Hidrojen	mg/kg	3,5
Oksijen	mg/kg	40,2

4.2 Hidrojen Oluşumu

Odun, kömür, doğal gaz ve petrol gibi geleneksel enerji kaynakları insanlık tarihi boyunca kullanılmıştır. Son yılların en önemli gündemlerinden biri de fosil yakıtların yerini alacak alternatif yakıtlar tasarlamak ve geliştirmektir.

Hidrojen, fosil yakıtlara kıyasla daha yüksek enerji verimliliğinin yanında daha düşük kirletici ve daha düşük sera gazı emisyonları avantajları ile sürdürülebilirlik sağlamak için en umut verici alternatif enerji taşıyıcılarından biri olarak görünmektedir [53].

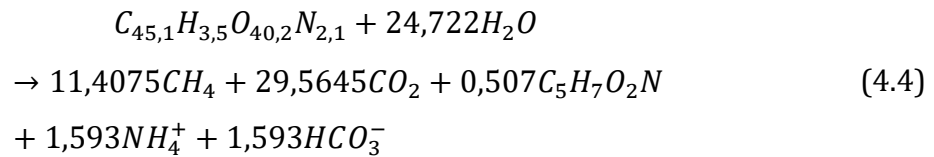
Hidrojenin, taşınması için petrol ürünleri ve elektrik üretimi için fosil yakıtlarla değiştirileceği kabul edilmektedir. Hidrojen doğada en çok bulunan elementlerden biri olmakla beraber tek ve kullanılabilir formda yer almaz. Genellikle oksijen, karbon ya da azot ile reaksiyona girer ve su, hidrokarbon, kömür, petrol ve doğal

gaz gibi fosil yakıtlara dönüşür. Hidrojen temel olarak; (i) yüksek sıcaklık buharı, (ii) fosil yakıt ya da biyokütle gazlaştırması, (iii) nükleer enerjinin termokimyasal su ayrıştırılması ve güneş yoğunlaştırıcıları, (iv) yenilenebilir enerji kaynağından elektroliz, (v) yüksek sıcaklık elektrolizi, (vi) nükleer enerji, (vii) etanol veya biyo-yag üretmek için sıvı ıslahı, (viii) fotoelektrokimyasal ve fotokatalitik yöntemler gibi metotlar ile elde edilir. Ayrıca hidrojen üretimi yöntemi çevresel etki açısından da önemlidir. Hidrojen temiz bir enerji taşıyıcısı olmasına rağmen, üretim yöntemi açısından olumsuz çevresel etkiler meydana gelebilir. Bu sebeple tüm yönleriyle değerlendirilip uygun yöntem seçilmelidir.

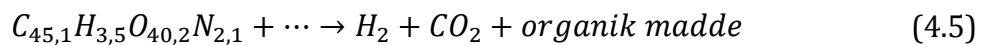


Şekil 4.2 Anaerobik çürütme prosesinin ilk aşaması (hidrojen üretimi)

Tablo 4.1'e ait karakterizasyon dikkate alınarak yapılan hesaplamalara göre net reaksiyon aşağıdaki şekliyle yazılabilir:

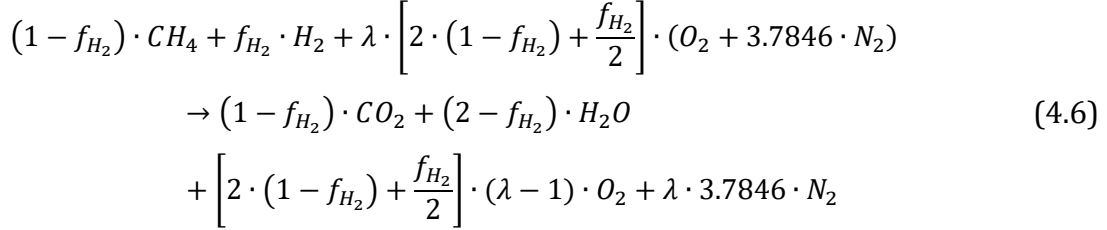


Anaerobik çürütmede hidrojen oluşum fazı reaksiyonu ise aşağıdaki şekilde yazılabilir:



4.3 Hitanın Yanması

Bir metan-hidrojen karışımı olan hitanın yanma reaksiyon aşağıdaki gibi ifade edilebilir:



Burada, f_{H_2} hitan içerisindeki hidrojen fraksiyonu, λ ise stokiyometrik orandır. Bu çalışma kapsamında hidrojen oranı %30'a kadar değişen oranlar için alt ısı değerleri ve CO₂ miktarı hesaplanmıştır.

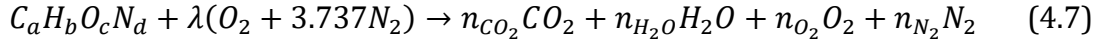
4.4 Atığın Direk Yakılması

Avrupa Birliğine bağlı ülkelerde yaklaşık 400 adet katı atık yakma tesisi vardır. Bu tesislerde yıllık yaklaşık olarak 59 milyon ton evsel atık termal yöntemler kullanılarak bertaraf edilir. Bunun sonucunda yıllık 7 milyon hanenin ihtiyacına karşılık gelen 23 milyon GWh elektrik enerjisi elde edilir. Ayrıca üretilen 58 milyon GWh'lık ısı enerjisi ile de 13 milyon evin ısınma gereksinimi giderilmektedir. Benzer şekilde Amerika'da da 87 adet atık yakma tesisi bulunmaktadır. Bu tesislerde de yıllık 15 milyon GWh'lık enerji elde etmek için yaklaşık 30 milyon ton evsel katı atık yakılmaktadır [54].

Bu işlemlerin altında yatan temel amaç atıkların kapladığı hacim ve miktarın azaltılması, depolama ihtiyacını minimize etmektir. Bu amaca hizmet ederken ortaya çıkan ısı kullanılarak enerji dönüşümü sağlanmış olur.

Biyokütlenin enerji elde etmek amacıyla direkt yakılması sebep olduğu hava kirliliği ve elde edilecek enerjinin büyüklüğü açısından genellikle etkin bir enerji dönüşüm sistemi olarak görülmez. Bununla beraber organik atıkları en basit haliyle enerjiye dönüştürme, atıkları direkt olarak yakmakla mümkün olabilir. Böyle bir sistemde atığı dönüştüren tesis veya reaktörlerin enerji ihtiyacı olan merkezlere olan mesafesi de değerlendirilmelidir. Ekonomik fayda düşünüldüğünde iletim için yapılacak masraf da göz önünde bulundurulmalıdır.

Organik atığın yanma reaksiyonu hava içeriği 78,1 azot ve 20,9 oksijen alınarak aşağıdaki şekilde yazılabilir:



Burada n ürünlerin molar fraksiyonunu, λ fazla hava miktarını temsil etmektedir.

4.5 Engineering Equation Solver (EES)

Tez kapsamında yapılan hesaplamalar ve parametrik çalışmalar için EES (Engineering Equation Solver) programı kullanılmıştır [55]. EES mühendislik hesaplamalarında sıklıkla kullanılan, katı sıvı ve gazlara ait pek çok termofiziksel ve mekanik özellikleri kütüphanesinde barındıran bir denklem çözme programıdır. Ayrıca ısı transferi ve akışkan hareketinin analizi için de yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. EES ayrıca, belirlenen bir değişkene göre farklı parametrelerin karşılaştırılmasına imkân sağlayan tablolar hazırlanabilir. Yine grafiklerde bu tablolarda oluşturulan değerlere göre çizilebilir.

Bu çalışmada da öncelikle atık miktarları ve karakterizasyonu sisteme kaydedildi. Daha sonra yazılımın içinde barındırdığı metan gazına ve hidrojen gazına ait özellikler ve kullanılarak temel denklemler elde edildi. Elde edilen denklemler belirlenen parametreler değiştirilerek program vasıtasıyla hesaplatıldı. Sonuç bölümünde ortaya çıkan bu grafiksel ve parametrik görseller ortaya koyuldu.

SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Bu tez kapsamında atığın karakterizasyonu dikkate alınarak hesaplamalar yapılmış, atıktan elde edilebilecek hidrojen ve metan potansiyeli belirlenmiştir. Ayrıca belirli oranlarda hidrojen-metan karışımı olan hitan için analizler yapılmıştır. Son olarak farklı parametrelere göre gazların fiziksel özelliklerinin değişimleri incelenmiştir.

5.1 Atıktan Faydalı Gaz Elde Edilmesi

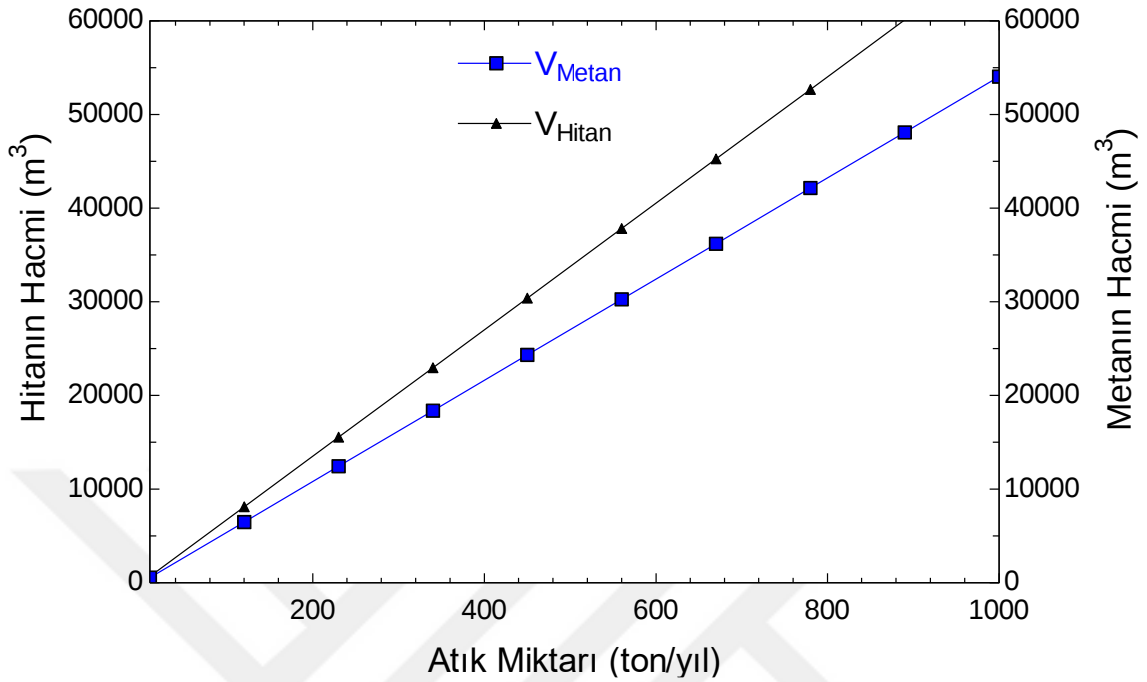
Çalışma pilot ölçekli yapılmış olup farklı atık miktarları için madde miktarlarının nasıl değişeceği değerlendirilmiştir. Tablo 5.1’de görüleceği gibi atık miktarı arttıkça metan kütlesi de artmaktadır. Aynı şekilde toplam karbon ve çözünebilir karbon miktarı gibi metan üretiminde doğrudan etkili parametreler de incelendiğinde atık miktarıyla doğru orantılı olarak arttığı görülebilir.

Tablo 5.1 Değişen atık miktarlarına göre madde miktarları

Atık Miktarı (ton/yıl)	Çözünebilir Kütle (ton/yıl)	Toplam Karbon Miktarı (ton/yıl)	Toplam Kuru Madde Miktarı (ton/yıl)	Metanın Kütlesi (ton/yıl)	Çözünebilir Karbon Miktarı (ton/yıl)
10	0,5196	0,8659	1,92	0,3817	0,29
120	6,235	10,39	23,04	4,58	3,43
230	11,95	19,92	44,16	8,779	6,57
340	17,66	29,44	65,28	12,98	9,72
450	23,38	38,97	86,4	17,18	12,86
560	29,09	48,49	107,5	21,37	16,00
670	34,81	58,02	128,6	25,57	19,15
780	40,53	67,54	149,8	29,77	22,29
890	46,24	77,07	170,9	33,97	25,43
1000	51,96	86,59	192	38,17	28,58

Atık miktarı değiştikçe artan metan Tablo 5.1’de verilmiştir. Metan gazının artmasıyla birlikte metan ve hidrojen gazı karışımından meydana gelen hitan

gazında da atığın artmasıyla birlikte doğrusal bir artış görülür. Şekil 5.1 bu artışa ait grafiği yansıtmaktadır.

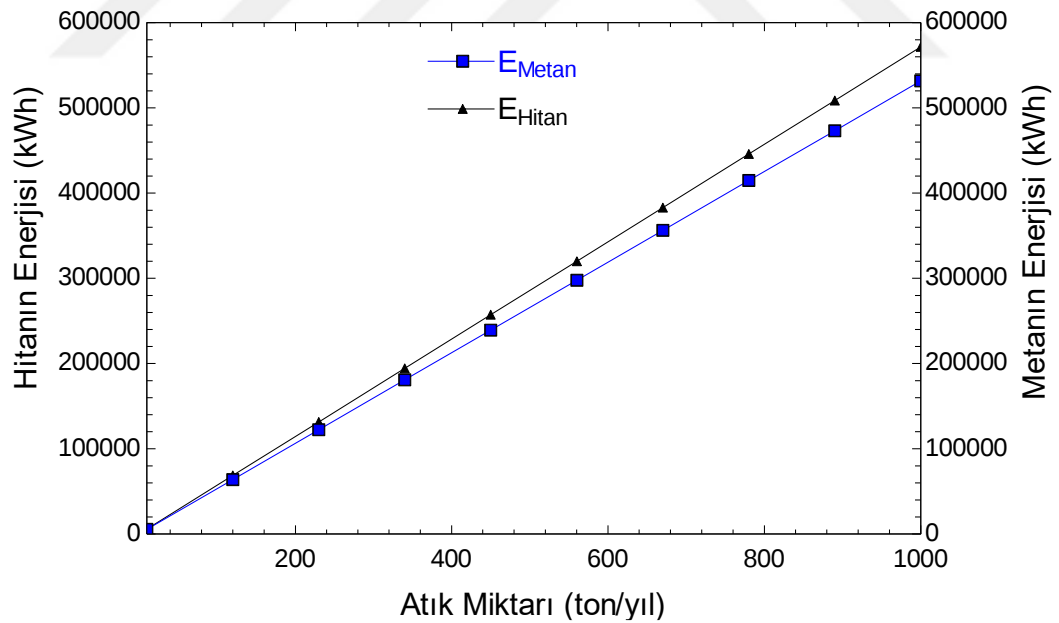


Şekil 5.1 Değişen atık miktarına göre metan ve hitanın hacmi

Atık miktarı, oluşan gazların hacim ve enerji özelliklerini de etkiler. Atığın miktarındaki artış, gazların da hacminde doğrudan artış sağlar. Enerji üretiminde rol alan gazların hacimsel artışı elde edilen enerji miktarını da doğrudan etkiler. Farklı miktarlardaki atıklar elde edilen gazları ve dolayısıyla enerji miktarlarını değiştirir. Tablo 5.2 bu oranları göstermektedir. Ayrıca Şekil 5.2 ise farklı miktarlardaki atıkların hitan ve metan enerjilerine ait grafik vardır. Grafiğe bakıldığında da atık miktarı arttıkça hem hitana ait enerjinin hem metana ait enerjinin doğrusal olarak arttığı görülmektedir.

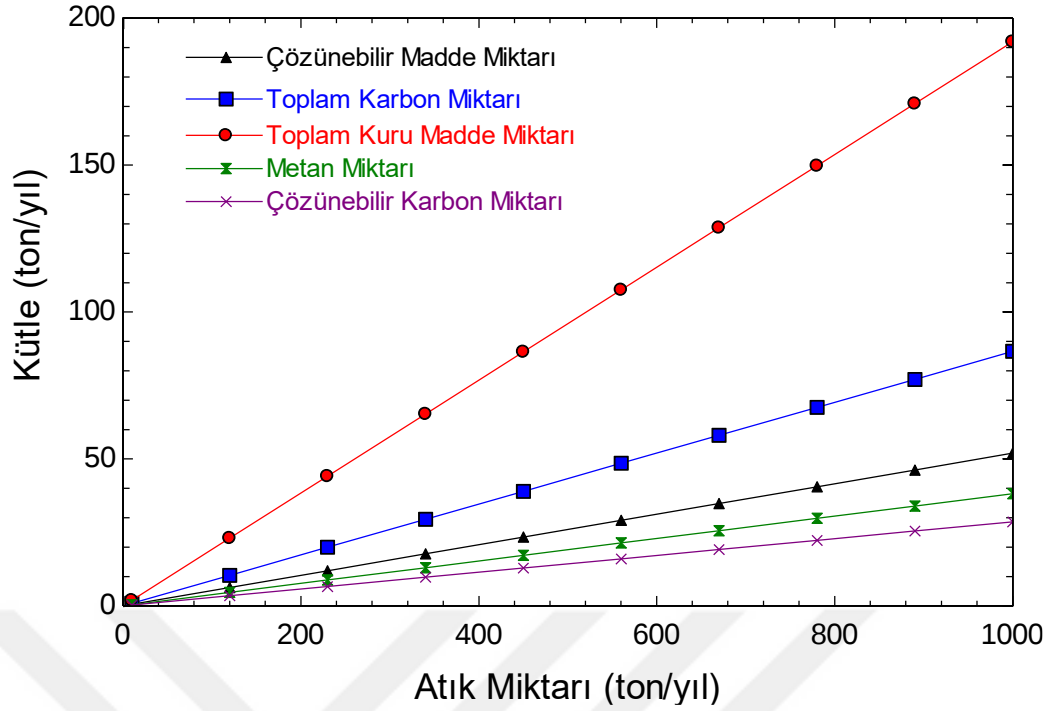
Tablo 5.2 Değişen atık miktarlarına göre elde edilebilecek gazların özellikleri

Atık Miktarı (ton/yıl)	Hidrojenin Hacmi (m ³)	Hitanın Hacmi (m ³)	Metanın Hacmi (m ³)	Hitanın Enerjisi (kWh)	Metanın Enerjisi (kWh)
10	135,1	675,4	540,3	5715	5.316
120	1.621	8.104	6.484	68.582	63.791
230	3.107	15.534	12.427	131.449	122.267
340	4.593	22.963	18.370	194.316	180.742
450	6.078	30.392	24.313	257.183	239.217
560	7.564	37.821	30.257	320.050	297.692
670	9.050	45.250	36.200	382.917	356.168
780	10.536	52.679	42.143	445.784	414.643
890	12.022	60.108	48.087	508.651	473.118
1000	13.507	67.537	54.030	571.518	531.594



Şekil 5.2 Değişen atık miktarına göre hitan ve metanın enerjileri

Farklı atık miktarları için ortaya çıkacak olan metan gazına ait birtakım özellikler de Şekil 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.3 Değişen atık miktarlarına göre atık ve metan karakterizasyonu

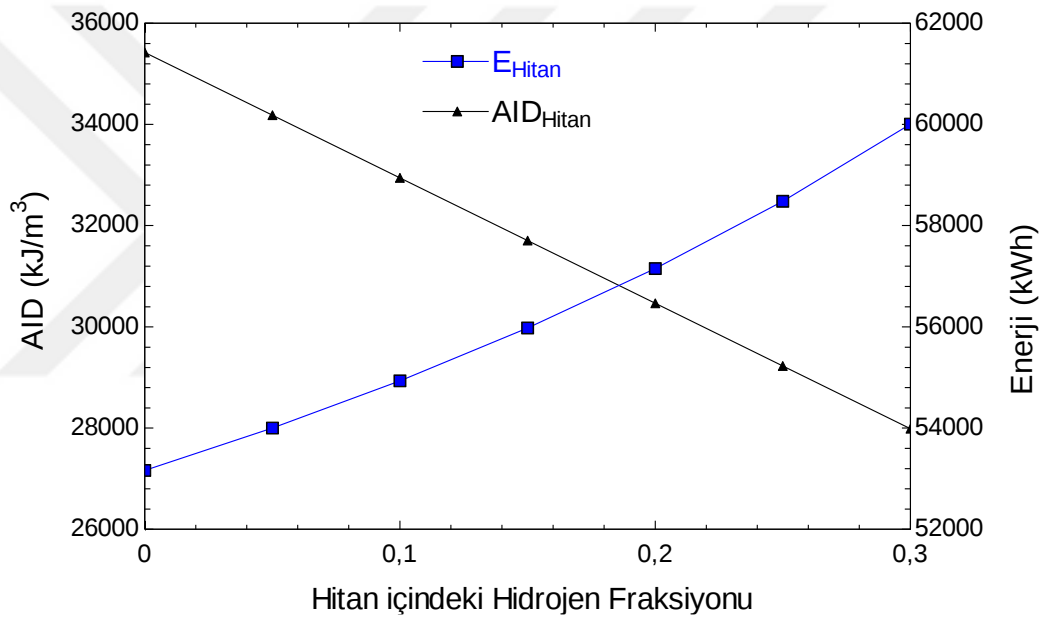
Anaerobik koşullar altında gazların özelliklerini etkileyen parametrelerden biri sıcaklıktır. Sıcaklık değiştirildiğinde süreçler etkileneceği gibi elde edilen gazların fiziksel özelliklerinde de farklılıklar meydana gelir. Farklı sıcaklıklar için metan, hidrojen ve hitan gazının alt ısı değer, hacim ve enerjisi Tablo 5.2’de ortaya koyulmuştur.

5.2 Hitan Oluşumu ve Yanması

Tablo 5.3’de hidrojen-metan karışımındaki hidrojen oranına göre hitanın alt ısı değeri ve enerjisi görülmektedir. Her ne kadar kütle bazda hidrojenin alt ısı değeri metanın alt ısı değerinin 2,4 katı olsa da ($AID_{CH_4} = 50.000 \text{ kJ/kg}$, $AID_{H_2} = 120.000 \text{ kJ/kg}$) metanın yoğunluğu hidrojenin yoğunluğunun 8 katı (çevre koşullarında) olduğu için hacimsel bazda alt ısı değeri; hitan içerisindeki hidrojen oranı arttıkça artmaktadır. Hidrojen fraksiyonuna göre hitanın alt ısı değeri ve enerjisi Şekil 5.4’de verilmiştir.

Tablo 5.3 Hidrojen fraksiyonuna göre hitanın fiziksel özellikleri

$f_{H_2}(\%)$	$AID (kJ/m^3)$	$Isı Oranı(GJ)$	$Hidrojenin Hacmi (m^3)$	$Brüt Enerji (kWh)$
0	35.420	191,40	0	53.159
5	34.181	194,40	284,4	54.000
10	32.942	197,80	600,3	54.934
15	31.703	201,50	953,5	55.978
20	30.464	205,70	1.351	57.152
25	29.225	210,50	1.801	58.483
30	27.986	216,00	2.316	60.004

**Şekil 5.4** Hidrojen fraksiyonuna göre hitanın alt ısı değeri ve enerjisi

Anaerobik çürütme prosesinde ortaya ürünler ise Tablo 5.4’de verildiği gibidir. Tüm ürünlerin molar oranları tabloda belirtilmiştir.

Tablo 5.4 Anaerobik çürütme prosesinde ortaya çıkan ürünler

Ürün	Oran (molar)
CH_4	11,4075
CO_2	29,5645
$C_5H_7O_2N$	0,507
NH_4^+	1,593
HCO_3^-	1,593

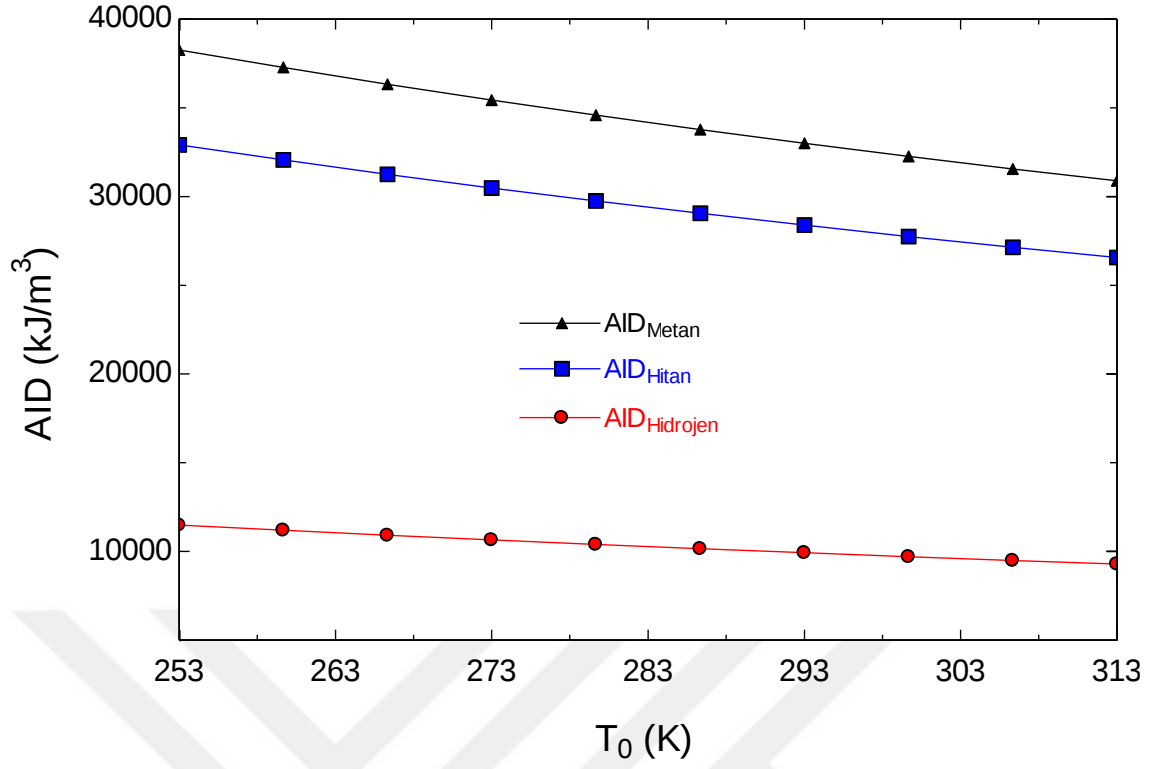
Hidrojenin yanması sıfır karbondioksit emisyonuna sahip olsa da metanın yanmasından karbondioksit gazı ortaya çıkar. Metan ve hidrojen gazı karışımından oluşan hitan gaz karışımı yanması esnasında da ortaya çıkan birtakım gazlar vardır. EES programında yapılan hesaplamalar sonucunda gaz karışımı içeriğindeki hidrojen oranına göre hitan yanması esnasında ortaya çıkan gazların molar oranları Tablo 5.5'te görülmektedir.

Tablo 5.5 Hidrojen fraksiyonuna göre hitanın yanması sırasında ortaya çıkan gazların molar fraksiyonları

f_{H_2}	f_{CH_4}	f_{Hava}	f_{CO_2}	f_{H_2O}	f_{N_2}
%0	%100	9,569	1	2	7,569
%5 (Kütlece %0,66)	%95	9,21	0,95	1,95	7,285
%10 (Kütlece %1,38)	%90	8,852	0,9	1,9	7,002
%15 (Kütlece %2,17)	%85	8,493	0,85	1,85	6,718
%20 (Kütlece %3,05)	%80	8,134	0,8	1,8	6,434
%25 (Kütlece %4,02)	%75	7,775	0,75	1,75	6,15
%30 (Kütlece %5,11)	%70	7,416	0,7	1,7	5,866

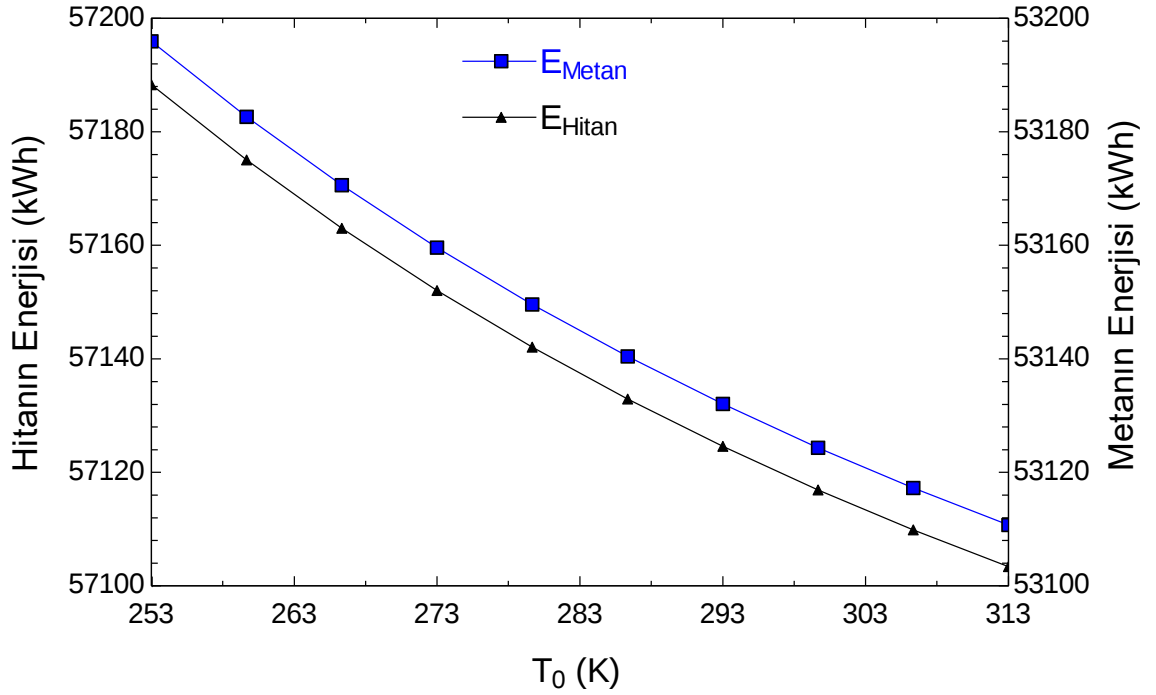
Tablo 5.6 Farklı çevre sıcaklıklarına göre gazların fiziksel özellikleri

T_0 (K)	AID_{Metan} (kJ/m ³)	$AID_{Hidrojen}$ (kJ/m ³)	AID_{Hitan} (kJ/m ³)	$V_{Hidrojen}$ (m ³)	V_{metan} (m ³)	E_{Hitan} (kWh)	V_{hitan} (m ³)	E_{Metan} (kWh)
253	38267	11488	32911	1251	5004	57188	6256	53196
259,7	37275	11193	32059	1284	5136	57175	6420	53183
266,3	36334	10913	31250	1317	5268	57163	6585	53171
273	35440	10646	30481	1350	5400	57152	6750	53160
279,7	34588	10393	29749	1383	5532	57142	6915	53150
286,3	33777	10151	29052	1416	5664	57133	7080	53140
293	33003	9920	28387	1449	5796	57125	7245	53132
299,7	32264	9699	27751	1482	5928	57117	7409	53124
306,3	31558	9488	27144	1515	6059	57110	7574	53117
313	3082	9286	26563	1548	6191	57103	7739	53111

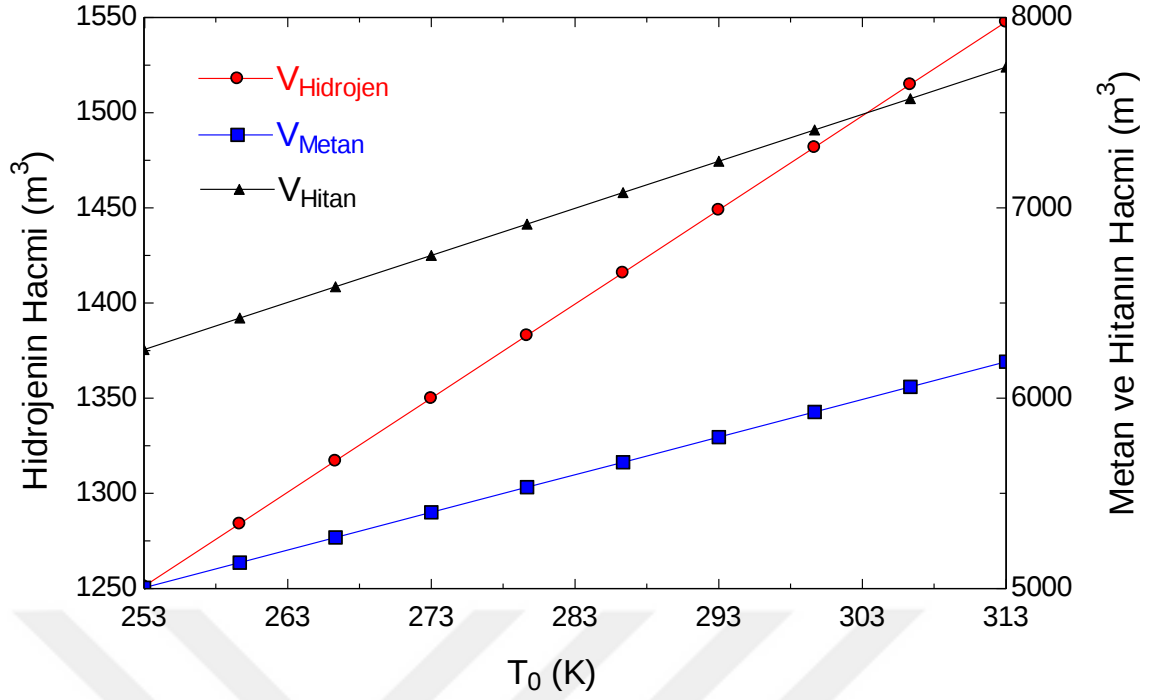


Şekil 5.5 Değişen ortam sıcaklığına göre gazların alt ısı değerleri

EES programı kullanılarak yapılan hesaplarda ortam sıcaklığı (-20'den +40 °C'ye) arttıkça metan, hidrojen ve hitanın alt ısı değerinde yoğunluğa bağlı hafif bir azalma (%1'den az) olduğu Şekil 5.6'da görülmektedir.

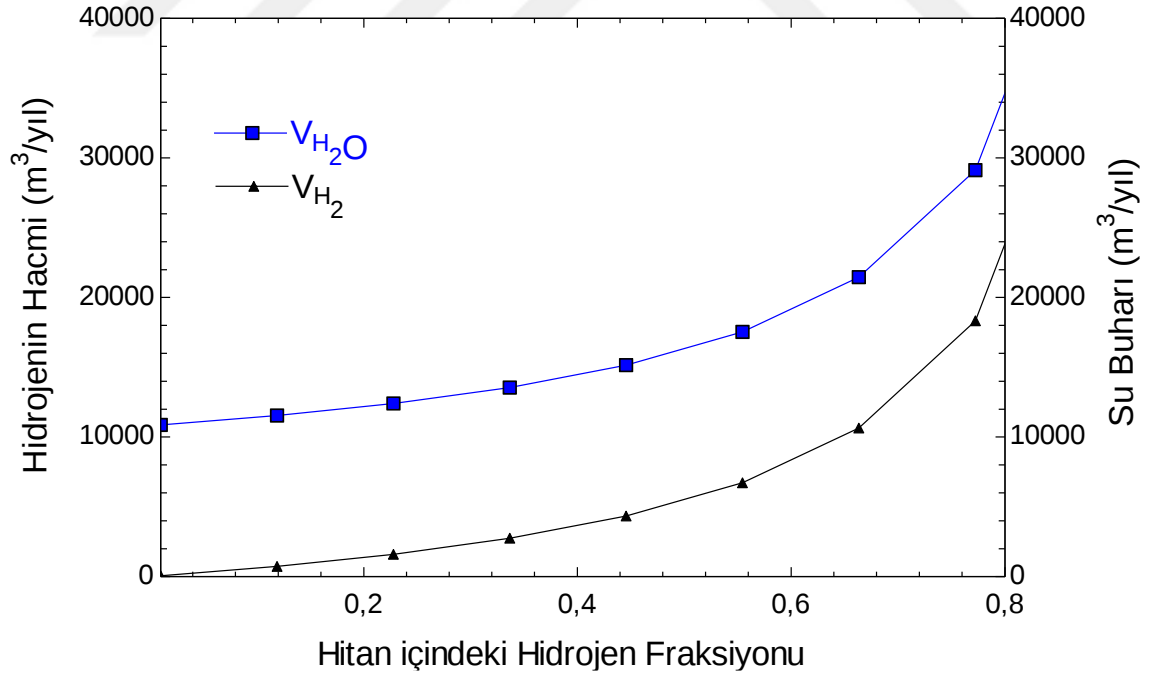


Şekil 5.6 Değişen ortam sıcaklığına göre gazların enerjileri



Şekil 5.7 Değişen ortam sıcaklığına göre gazların hacimleri

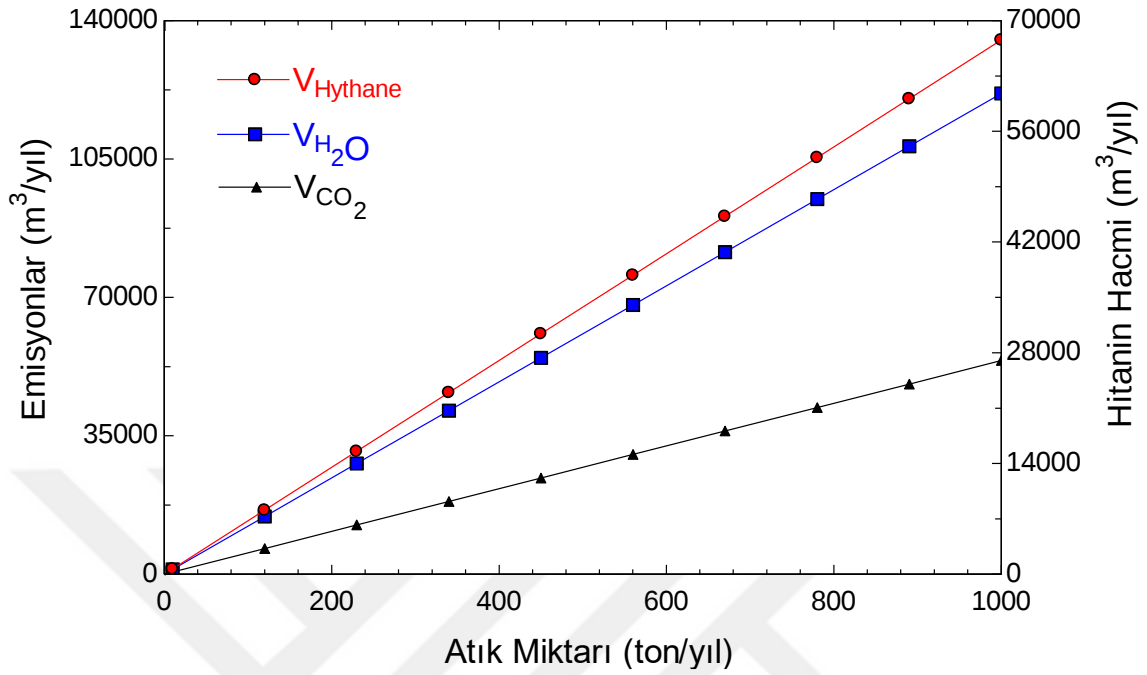
-20 ile 40 °C arasında değişen çevre sıcaklığına göre hidrojen, metan ve hitanın enerjilerindeki azalma Şekil 5.7'de, hacimlerindeki artış Şekil 5.8'de çizilmiştir.



Şekil 5.8 Farklı hidrojen fraksiyonları için hidrojenin hacmindeki ve oluşan su buharı emisyonundaki değişim

Farklı hidrojen oranları için hidrojen gazının hacmindeki ve oluşan su buharı emisyonunda görülen değişimler Şekil 5.8'de gösterilmiştir. Şekil 5.9'da ise; farklı

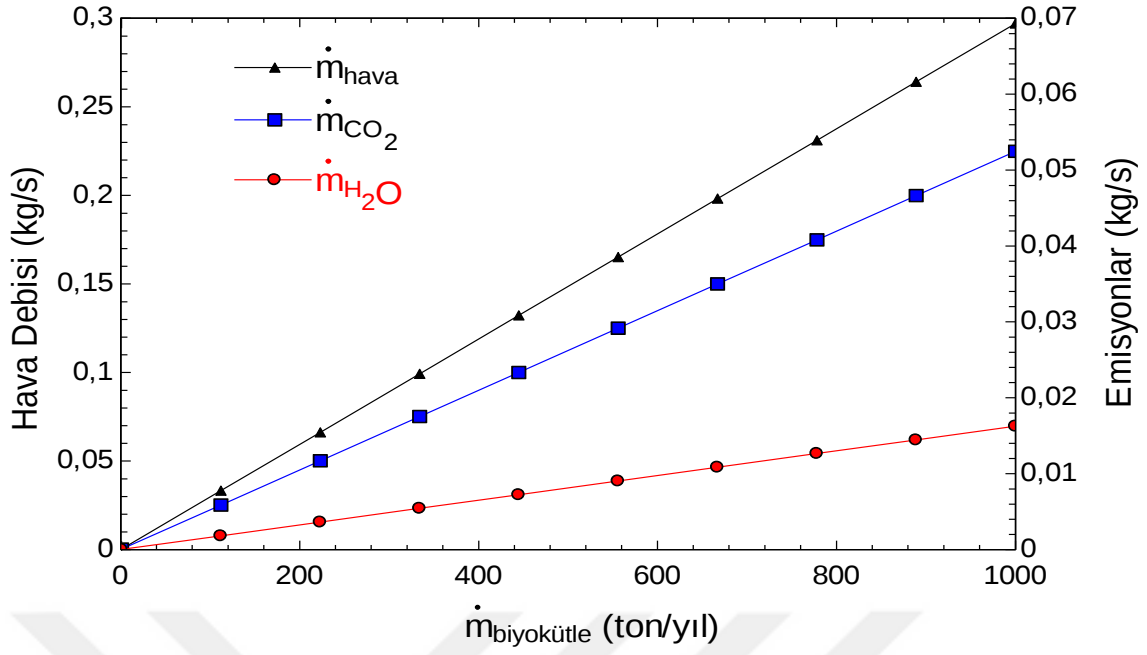
atık miktarları için oluşan hitan gazı hacmi ve hitanın yanması sonucunda açığa çıkan CO₂ ve su buharı emisyonu miktarı görülmektedir.



Şekil 5.9 Farklı miktarlardaki atıktan elde edilen hitanın miktarı ve hitanın yanması sonucu çıkan emisyonlar

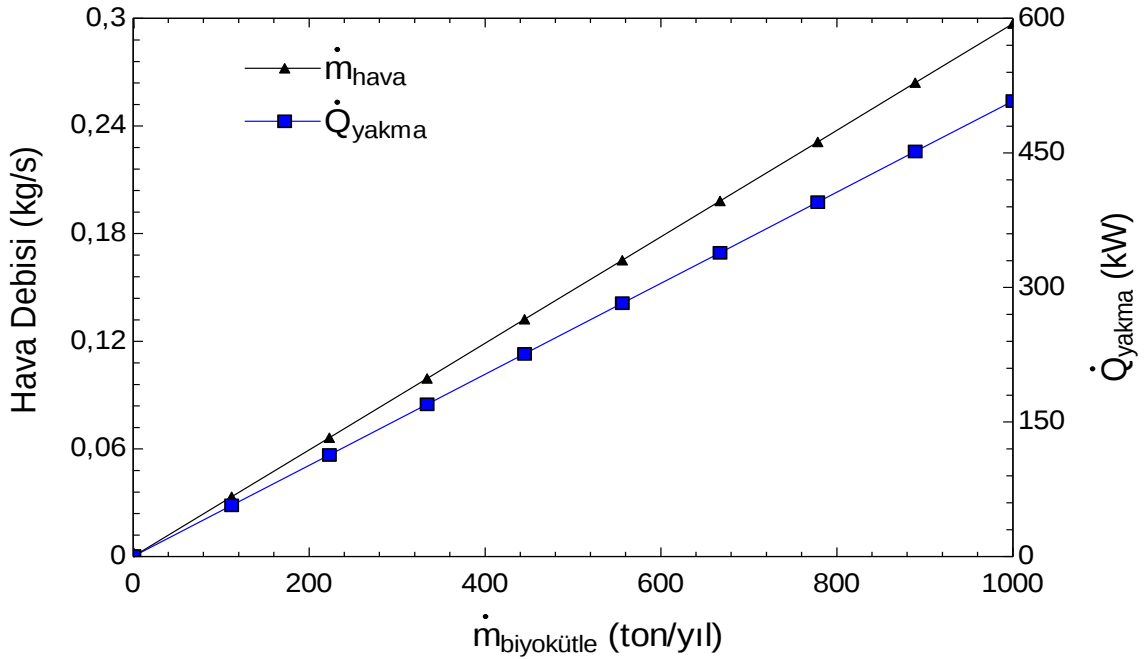
5.3 Atığın Direk Yakılması

Atıktan faydalı gaz eldesi proseslerine alternatif olarak direk yakılması da çalışılmış, yanma sonucu ortaya çıkan kullanılabilir ısı ve yanma sonu gazların emisyonları hesaplanmıştır. Farklı biyokütle miktarlarına göre gerekli hava debisi ve yakma sonrası ortaya çıkan emisyonların miktarları Şekil 5.10'da verilmiştir.



Şekil 5.10 Farklı biyokütle miktarlarına göre gerekli hava debisi ve yakma sonrası ortaya çıkan emisyonlar

Tablo 5.6'da ise farklı biyokütle ve hava miktarlarına göre yakma sonrası ortaya çıkan ısı miktarları verilmiştir. Yapılan hesaplamalara göre seçilen atığın 100 tonunun yakılması sonucu 50.78 kW ısı ortaya çıkmaktadır. 100 ton atığın yakılması için gerekli hava debisi ise 0,0297 kg/s (106,9 kg/h) olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.11 Farklı biyokütle miktarları için gerekli hava miktarı ve yakma sonrası ortaya çıkan ısı değişimi

Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da da görüldüğü gibi atığın direk yakılması ve atıktan hitan elde edilip yakılması arasında emisyonlarda çok ciddi farklılık bulunmaktadır. Atığın direk yakılması yerine anaerobik çürütme ile faydalı gaz elde edilip bu gazların yakılması sonucunda yaklaşık 26,6 kat daha az CO₂ salınımı gerçekleştiği bulunmuştur.

Ayrıca önceki bölümlerde de tartışıldığı üzere hidrojen ve metan gazı ve bunları karışımı olan hitan gazı yaygın bir kullanım alanına sahiptir.



Yapılan tez kapsamında farklı metotlarla atıktan enerji elde etme yöntemleri incelenmiştir. Atıktan metan ve hidrojen gazlarının elde edilmesinin ve elde edilen gazların belirli oranlarla karıştırılarak hitan gazının elde edilmesinin ve direk yakılmasının atık bertarafı için faydaları ortaya koyulmuş, yöntemler çevre ve enerji açısından birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Farklı karakterizasyona sahip atıkların farklı ölçekteki uygulamaları gerçekleştirilerek atıktan enerji eldesi ve atığın bertarafı ile ilgili net sonuçlar elde edilebilir.

Bu tez çalışması kapsamında aynı karakterizasyona sahip atığın farklı miktarı için değişen metan ve hidrojen miktarı ve buna bağlı olarak artan hitan miktarı çalışılmıştır. Doğal gazın da ana bileşeni olan metanın saf halde kullanılması yerine başta atıklar olmak üzere yenilenebilir kaynaklardan elde edilen hidrojen ile karıştırılıp hitan gazı olarak kullanıldığında enerjisinin daha yüksek olduğu yapılan hesaplamalar ile ortaya koyulmuştur. Hitan gazının enerji içeriği metan gazından %6,98 daha fazladır. Hitan gazının enerji sistemlerinde kullanımı ile bir yandan aynı miktarda elektrik üretimi için ihtiyaç duyulan gaz miktarı azalırken bir yandan da bu gazların yanması sonucu ortaya çıkan karbon dioksit, karbon monoksit gibi zararlı gazların ve su buharının miktarı azalacaktır.

Hitan gazı içerisindeki hidrojen oranı arttıkça enerji içeriği daha da yükselse de yapılan literatür taramasında %30 hidrojen oranının limit olarak belirlendiği ve deneysel çalışmalarda çok daha düşük oranların çalışıldığı görülmüştür. Bu durum hatlarda ve yakma sistemlerinde kullanılan malzemelerin hidrojene karşı hassasiyeti ile alakalıdır. Hitan gazı özellikle mevcut doğal gaz hatları ve yakma sistemleri kullanılmak istenmektedir. İletimde mevcut haliyle sadece doğal gaz kullanıldığı için hidrojenin iletim hatlarındaki malzemelere verebileceği zarar, özellikle bağlantı elemanların hidrojen kaçıışı çalışılmalıdır. Bir yandan gaz dağıtım ve iletim hatlarının hidrojene uyumu diğer yandan hidrojenin daha düşük maliyetle üretilmesi mümkün olduğunda hitan gazının kullanımı yaygınlaşacak, doğal gaza

bağımlılık da azalacaktır. Ayrıca hitan gazının enerji içeriğini yükseltmesi avantajının yanı sıra ortaya çıkan çevreye zararlı emisyonları da azaltıyor olması yadsınamaz bir özelliktir. Hidrojen oranını Karışımdaki hidrojen oranının kütlege arttığında emisyonun azaldığı görülmektedir. Tüm dünyada ulaşım ve enerji sektöründe yaygın bir şekilde tartışılan karbon vergisi hayata geçtiğinde bu durum daha da önemli bir hale gelecek, tesisler çevreye daha az karbondioksit gazı salma mücadelesi vereceklerdir. Bu durum doğal gaz yerine hitan gazının kullanımı artıracaktır. Gelecek çalışmalarda hidrojenin doğal gaz hattına ve yakma sistemlerine uyumu, atıklardan metan ve hidrojen gazı elde edilmesi üzerine kapsamlı araştırmalar yapıp, alternatif çözümler geliştirilmelidir.



- [1] Türkiye İstatistik Kurumu. Erişim linki: <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=30666>. (Erişim Tarihi: 10.07.2020).
- [2] Enerji İşleri Genel Müdürlüğü. Biyokütle Enerjisi Potansiyel Atlası. Erişim linki: <https://bepa.enerji.gov.tr> (Erişim Tarihi: 10.05.2020).
- [3] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. Erişim linki: www.enerji.gov.tr. (Erişim Tarihi: 10.05.2020).
- [4] EPIAŞ Şeffaflık Platformu, Gerçek Zamanlı Üretim. Erişim linki: <https://seffaflik.epias.com.tr/transparency/uretim/gerceklesen-uretim/gercek-zamanli-uretim.xhtml> (Erişim Tarihi: 20.05.2020).
- [5] Uluslararası Enerji Ajansı. (2014). *Energy Technology Perspectives*. IEA, Paris.
- [6] F. Suleman, I. Dincer ve M. Agelin-Chaab, Environmental impact assessment and comparison of some hydrogen production options. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, pp. 6976-6987, 2015.
- [7] www.enerjiatlası.com. (Erişim tarihi: 10.06.2020)
- [8] F. Barbir, PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources. *Solar energy*, vol. 78, no: 5, pp. 661-669, 2005.
- [9] D. Bolzonella, F. Battista, C. Cavinato, M. Gottardo, F. Micolucci, G. Lyberatos and P. Pavan, Recent developments in biohythane production from household food wastes: a review. *Bioresource technology*, vol. 257, pp. 311-319, 2018.
- [10] Z. Liu, B. Si, J. Li, J. He, C. Zhang, Y. Lu, Y. Zhang and X.H. Xing, Bioprocess engineering for biohythane production from low-grade waste biomass: technical challenges towards scale up. *Current opinion in biotechnology*, vol. 50, pp. 25-31, 2018.
- [11] R.A.A. Meena, J.R. Banu, R.Y. Kannah, K.N. Yogalakshmi and G. Kumar, Biohythane production from food processing wastes–Challenges and perspectives. *Bioresource technology*, vol. 298, pp. 1224-1249, 2020.
- [12] A. Ghimire, G. Kumar, P. Sivagurunathan, S. Shobana, G.D. Saratale, H.W. Kim and R. Munoz, Bio-hythane production from microalgae biomass: key challenges and potential opportunities for algal bio-refineries. *Bioresource technology*, vol. 241, pp. 525-536, 2017.

- [13] M. Akhlaghi, M.R. Boni, A. Polettini, R. Pomi, A. Rossi, G. De Gioannis and D. Spiga, Fermentative H₂ production from food waste: Parametric analysis of factor effects. *Bioresource Technology*, vol. 276, pp. 349-360, 2019.
- [14] Y. Chen, H. Liu, X. Zheng, X. Wang and J. Wu, New method for enhancement of bioenergy production from municipal organic wastes via regulation of anaerobic fermentation process. *Applied Energy*, vol. 196, pp. 190-198, 2017.
- [15] M. Kraussler, P. Schindler and H. Hofbauer, An experimental approach aiming the production of a gas mixture composed of hydrogen and methane from biomass as natural gas substitute in industrial applications. *Bioresource Technology*, vol. 237, pp. 39-46, 2017.
- [16] M.M. Yeshanew, L. Frunzo, F. Pirozzi, P.N. Lens, and G. Esposito, Production of biohythane from food waste via an integrated system of continuously stirred tank and anaerobic fixed bed reactors. *Bioresource Technology*, vol. 220, pp. 312-322, 2016.
- [17] M. Momirlan and T.N. Veziroglu, The properties of hydrogen as fuel tomorrow in sustainable energy system for a cleaner planet. *International journal of hydrogen energy*, vol. 30, no: 7, pp.795-802, 2005.
- [18] F. Xu, Y. Li, X. Ge, L. Yang and Y. Li, Anaerobic digestion of food waste–Challenges and opportunities. *Bioresource technology*, vol. 247, pp.1047-1058, 2018.
- [19] M.E. Ersahin, H. Ozgun, R.K. Dereli ve I. Ozturk, Anaerobic treatment of industrial effluents: an overview of applications. *Waste water-treatment and reutilization*, pp. 9-13, 2011.
- [20] F.İ. İnan, Hayvansal atıkların ve arıtma çamurlarının stabilizasyonunda kullanılan kompostlama ve anaerobik çürütme proseslerinin verimliliklerinin karşılaştırılması. *Uludağ Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi*, Bursa, 2012.
- [21] C. Fang, I. Angelidaki ve K. Boe, Biogas production from food-processing industrial wastes by anaerobic digestion. *Water Research*. 90343-90344, 2010.
- [22] T. Al Seadi, *Biogas handbook*, Syddansk Universitet, Denmark, 2008.
- [23] Y.Y. Choong, K.W. Chou ve I. Norli, Strategies for improving biogas production of palm oil mill effluent (POME) anaerobic digestion: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 2993-3006, 2018.
- [24] F. Raposo, M.A. De la Rubia, V. Fernández-Cegrí and R. Borja, Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: an overview relating to methane yields and experimental procedures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 861-877, 2012.

- [25] C. Mao, Y. Feng, X. Wang and G. Ren, Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, pp. 540-555, 2015.
- [26] E. Lee, P. Bittencourt, L. Casimir, E. Jimenez, M. Wang, Q. Zhang and S.J. Ergas, Biogas production from high solids anaerobic co-digestion of food waste, yard waste and waste activated sludge. *Waste Management*, vol. 95, pp. 432-439, 2019.
- [27] J. Mata-Alvarez (Ed.). *Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes*. IWA publishing, 2002.
- [28] Jr W Viessman, MJ Hammer, *Water Supply and Pollution Control*. Harper Collins College Publishers. New York, pp. 513-679, 1993.
- [29] P. Steadman, *Energy, environment and building: a report to the Academy of Natural Sciences of Philadelphia*. Cambridge, London: Cambridge University Press: 1975, p. 287.
- [30] S. Jain, S. Jain, I.T. Wolf, J. Lee and Y.W. Tong, A comprehensive review on operating parameters and different pretreatment methodologies for anaerobic digestion of municipal solid waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 52, pp. 142-154, 2015.
- [31] S. Panigrahi and B.K. Dubey, A critical review on operating parameters and strategies to improve the biogas yield from anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. *Renewable Energy*. Vol. 143, pp. 779-797, 2019.
- [32] G.D. Najafpour, A.A.L. Zinatizadeh, A.R. Mohamed, M.H. Isa and H. Nasrollahzadeh, High-rate anaerobic digestion of palm oil mill effluent in an upflow anaerobic sludge-fixed film bioreactor. *Process Biochemistry*. vol. 41, pp. 370-379, 2006.
- [33] D. Dapelo and J. Bridgeman, Euler-Lagrange Computational Fluid Dynamics simulation of a full-scale unconfined anaerobic digester for wastewater sludge treatment. *Advances in Engineering Software*. vol. 117, pp. 153-169, 2018.
- [34] Y. Zhang, G. Yu, L. Yu, M.A.H. Siddhu, M. Gao, A.A. Abdeltawab and X. Chen, Computational fluid dynamics study on mixing mode and power consumption in anaerobic mono-and co-digestion. *Bioresource Technology*. vol. 203, pp. 166-172, 2016.
- [35] EPA: Design Information Report, *Anaerobic Digester Mixing Systems*. Vol. 59, pp. 162-170, 1987.
- [36] I. Dincer. *Green methods for hydrogen Production*. *International Journal of Hydrogen Energy*. vol. 37, pp. 1954-1971, 2012.

- [37] D. Das ve T.N. Veziroğlu, Hydrogen production by biological processes: a survey of literature. *International Journal of Hydrogen Energy*. vol. 26, pp. 13-28, 2001.
- [38] Z. Liu, C. Zhang, Y. Lu, X. Wu, L. Wang, L. Wang, B. Han, X.H. Xing. States and challenges for high-value biohythane production from waste biomass by dark fermentation technology. *Bioresource Technology*. Vol. 135, pp. 292–303, 2013.
- [39] A.S. Nizami, M. Rehan, M. Waqas, M. Naqvi, O.K.M. Ouda, K. Shahzad, R. Miandad, M.Z. Khan, M. Syamsiro, I.M.I. Ismail and D. Pant, Waste biorefineries: enabling circular economies in developing countries. *Bioresource technology*, vol. 241, pp. 1101-1117, 2017.
- [40] A. Behzadi, E. Gholamian, E. Houshfar and A. Habibollahzade, Multi-objective optimization and exergoeconomic analysis of waste heat recovery from Tehran's waste-to-energy plant integrated with an ORC unit. *Energy*, vol. 160, pp.1055-1068, 2018.
- [41] V. Gunarathne, A. Ashiq, S. Ramanayaka, P. Wijekoon and M. Vithanage, Biochar from municipal solid waste for resource recovery and pollution remediation. *Environmental Chemistry Letters*, pp. 1-11, 2019.
- [42] N. Huotari, E. Tillman-Sutela, M. Moilanen and R. Laiho, Recycling of ash–For the good of the environment? *Forest Ecology and Management*, vol. 348, pp.226-240, 2015.
- [43] D. Mohan, Jr C.U. Pittman and P.H. Steele, Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. *Energy & fuels*, vol. 20, no: 3, pp. 848-889, 2006.
- [44] R. French and S. Czernik, Catalytic pyrolysis of biomass for biofuels production. *Fuel Processing Technology*, vol. 91, no: 1, pp.25-32, 2010.
- [45] E. Ranzi, A. Cuoci, T. Faravelli, A. Frassoldati, G. Migliavacca, S. Pierucci, and S. Sommariva, Chemical kinetics of biomass pyrolysis. *Energy & Fuels*, vol. 22, no: 6, pp.4292-4300, 2008.
- [46] L. Sørum, M.G. Grønli and J.E. Hustad, Pyrolysis characteristics and kinetics of municipal solid wastes. *Fuel*, vol. 80, no: 9, pp. 1217-1227, 2001.
- [47] S. Kelkar, C.M. Saffron, L. Chai, J. Bovee, T.R. Stuecken, M. Garedew, Z. Li and R.M. Kriegel, Pyrolysis of spent coffee grounds using a screw-conveyor reactor. *Fuel Processing Technology*, vol. 137, pp. 170-178, 2015.
- [48] E.G. Pereira, J.N. da Silva, J.L. de Oliveira and C.S. Machado, Sustainable energy: a review of gasification technologies. *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 16, no: 7, pp. 4753-4762, 2012.
- [49] G. Lopez, M. Artetxe, M. Amutio, J. Alvarez, J. Bilbao and M. Olazar, Recent advances in the gasification of waste plastics. A critical overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 576-596, 2018.

- [50] S. Kraft, F. Kirnbauer and H. Hofbauer, CPFD simulations of an industrial-sized dual fluidized bed steam gasification system of biomass with 8 MW fuel input. *Applied energy*, vol. 190, pp. 408-420, 2017.
- [51] J.G. Speight, Types of gasifier for synthetic liquid fuel production: design and technology. In *Gasification for Synthetic Fuel Production*. Woodhead Publishing, 2015.
- [52] W.J. Rittman III and E.R. Cosman, ABD Patent Numarası: 6575969. Washington, DC: ABD Patent and Marka Ofisi, 2003.
- [53] A. Midilli and I. Dincer, Hydrogen as a renewable and sustainable solution in reducing global fossil fuel consumption. *International Journal of Hydrogen Energy*. vol. 33, pp. 4209-4222, 2008.
- [54] F. Saltabaş, Y. Soysal, Ş. Yıldız and V. Balahorli, Municipal solid waste thermal disposal methods and its applicability in Istanbul. *Sigma*. Vol. 3, pp. 109-116, 2011.
- [55] EES Engineering Equation Solver Yazılımı. Erişim linki: <http://www.fchartsoftware.com/ees/>. (Erişim Tarihi: 10.06.2020).

Tezden Üretilmiş Yayınlar

İletişim Bilgisi: sorgulukubra@gmail.com

Konferans Bildirileri

1. K. Sorgulu, H. Civelek Yoruklu, E.O. Koroglu, B. Ozkaya, A. Demir, Energy Recovery Analysis during Production of Biohythane and Biomethane from Organic Waste. 8. Global Conference on Global Warming (GCGW-2019), Doha, Katar, 2019.

