

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TAM ÖLÇEKLİ BİR KATI ATIK DEPO SAHASINDA (ODAYERİ) ÇÖP
GAZINDAN H₂S GİDERİMİNİN ARAŞTIRILMASI**

FATİH GÜRELİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. BESTAMİ ÖZKAYA**

İSTANBUL, 2015

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TAM ÖLÇEKLİ BİR KATI ATIK DEPO SAHASINDA (ODAYERİ) ÇÖP
GAZINDAN H₂S GİDERİMİNİN ARAŞTIRILMASI**

Fatih GÜRELİ tarafından hazırlanan tez çalışması 19.01.2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Bestami ÖZKAYA
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Bestami ÖZKAYA
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet DEMİR
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Mahmut ALTINBAŞ
İstanbul Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Katı atık bertarafı alanında yaptığı çalışmalar ile Türkiye’de düzenli depolamanın gelişmesi, 1994 yılında Odayeri Düzenli Depolama Tesisinin kurulumunda ve işletilmesinde emeği olan ve İstanbul’daki düzenli depolama tesislerinin dünya standartlarında işletilmesine öncü olan Prof. Dr. Adem BAŞTÜRK’e,

Türkiye’de katı atıkların bertarafı, düzenli depolanması ve çöp gazı konusunda birçok çalışması olan, tez jürimde yer alan ve aynı zamanda tez danışmanım olan Prof. Dr. Bestami ÖZKAYA’nın Odayeri’nde çalışması konusunda desteği ve emeği olan Prof. Dr. Ahmet DEMİR’e,

Bu çalışmanın başlangıcından bitişine kadar bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemeyen tez danışmanım ve değerli hocam Sayın Prof. Dr. Bestami ÖZKAYA’ya,

Tez jürimde yer alan ve katkılarından dolayı Yrd. Doç. Dr. Mahmut ALTINBAŞ’a

Tecrübelerini paylaşan değerli hocam Prof. Dr. Mehmet ÇAKMAKÇI’ya,

İstanbul’daki düzenli depolama sahalarını dünya standartlarında işleten İSTAÇ A.Ş.’ye ve desteklerinden ötürü İSTAÇ A.Ş. Enerji Üretim Şefi Fırat SARP’a,

Çalışmada kullanılan arıtma çamurunun alınması konusunda destek olan İSKİ Ömerli Tesisinin yönetimine,

Çalışma boyunca tecrübe, bilgi ve yardımlarını esirgemeyen Çevre Yüksek Müh. İlker SEL’e ve Çevre Yüksek Müh. Murat ÇETİNDİR’e,

Pilot ölçekli sistemin Odayeri Santrali’ne kurulumu ve işletilmesindeki yardımları ve desteklerinden dolayı İlker ASLIYÜKSEK, Ali TANYILDIZ’a, Ahmet DAĞ’a ve Ortadoğu Enerji Odayeri Santrali çalışanlarına,

Bu çalışmanın Ortadoğu Enerji’nin Odayeri Elektrik Üretim Santrali’nde yapılmasını sağlayan ve desteklerinden ötürü başta Mehmet GÜR ve Mehmet Ata CEYLAN olmak üzere tüm Ortadoğu Enerji yönetimine ve bu çalışmanın oluşmasına destek veren Ortadoğu Enerji çalışanlarına,

Tüm eğitim hayatım boyunca beni destekleyen aileme sonsuz teşekkür ederim.

Ocak, 2015

Fatih GÜRELİ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT.....	xv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Hipotez	2
BÖLÜM 2	
KATI ATIKLAR.....	3
2.1 Katı Atıkların Miktar ve Özellikleri	4
2.2 Katı Atık Bertaraf Yöntemleri	6
2.2.1 Kaynakta Azaltma ve Geri Kazanma	9
2.2.2 Yakma	9
2.2.3 Piroliz ve Gazifikasyon	10
2.2.4 Kompostlaştırma	10
2.2.5 Düzenli Depolama.....	10
2.3 Düzenli Depolama Sahaları	11
2.3.1 Depolama Tesisleri Sınıfları	12
2.3.2 Yer Seçimi	12
2.3.3 Depo Tabanı Teşkili.....	13
2.3.4 Üst Örtü Teşkili	16
2.3.5 Depolama Yöntemleri.....	17

2.4	Çöp Gazı.....	19
2.4.1	Atıkların Ayrışması ve Gaz Oluşumu.....	23
2.4.2	Çöp Gazı Oluşumunu Etkileyen Faktörler.....	25
2.4.2.1	Atık bileşenleri.....	25
2.4.2.2	Nütrientler.....	26
2.4.2.3	Toksik Bileşikler.....	26
2.4.2.4	Nem Muhtevası.....	26
2.4.2.5	Sıcaklık.....	27
2.4.2.6	pH ve Alkalinite.....	27
2.4.2.7	Oksijen.....	28
2.4.2.8	Hidrojen.....	28
2.4.2.9	Amonyak.....	29
2.4.2.10	Sülfat.....	29
2.4.2.11	Dane boyutu.....	30
2.4.2.12	Meteorolojik Değişkenler.....	30
2.4.2.13	Atık Stabilizasyonu.....	30
2.4.3	Çöp Gazının Toplanması.....	31
2.4.4	Çöp Gazının Çevresel Etkileri.....	35
2.4.5	Depo Sahalarında Oluşan Gaz Miktarını Hesaplama ve Tahmin Yöntemleri.....	37
2.4.5.1	Test Kuyuları Yöntemi.....	38
2.4.5.2	Teorik Gaz Üretimi.....	38
2.4.5.3	Kinetik Modeller.....	39
2.4.5.4	Tahmin Modelleri.....	39

BÖLÜM 3

ÇÖP GAZININ ENERJİYE DÖNÜŞÜMÜ VE İŞLETME PROBLEMLERİ	41
3.1 Çöp Gazının Özellikleri	42
3.1.1 Metan (CH ₄)	42
3.1.2 Karbondioksit (CO ₂)	43
3.1.3 Oksijen ve Azot (O ₂ ve N ₂)	44
3.1.4 Hidrojen (H ₂)	44
3.1.5 Su Buharı.....	44
3.1.6 İz Bileşenler.....	44
3.2 Çöp Gazının Değerlendirilmesi ve Faydaları	45
3.3 Çöp Gazından Elektrik Enerjisi Üretimi	48
3.3.1 Doğrudan Gaz Kullanımı	49
3.3.2 Elektrik Üretim Teknolojileri.....	50
3.3.2.1 İçten Yanmalı Motor	51
3.3.2.2 Gaz Türbini	52
3.3.2.3 Kojenerasyon.....	53
3.3.3 Gelişen Teknolojiler	54
3.3.3.1 Çöp Gazından Yüksek Kalitede Gaz Üretimi.....	54
3.4 Çöp Gazının Ön Arıtımı ve İşletme Problemleri	55
3.4.1 Nem Giderimi	58
3.4.2 Kükürtlü Bileşikler.....	59

3.4.3	Siloksanlar.....	62
3.4.4	Halojenli Bileşikler	64
3.5	Çöp Gazından H ₂ S ve Eser Gazların Giderimi ile İlgili Literatürdeki Çalışmalar.....	64
3.5.1	Çöp Gazından H ₂ S Giderimi ile İlgili Literatürdeki Çalışmalar.....	64
3.5.2	Çöp Gazından Diğer Gazların Giderimi ile İlgili Literatürdeki Çalışmalar.....	70
BÖLÜM 4		
ÇÖP GAZINDAN H ₂ S GİDERİMİ KONUSUNDA YAPILAN ÇALIŞMALAR.....		73
4.1	İstanbul'daki Düzenli Depolama Sahaları	73
4.2	Odayeri Elektrik Üretim Santrali	74
4.3	Pilot Tesis Bilgileri	77
4.4	Analiz Yöntemi	78
4.5	Yapılan Denemeler.....	79
4.5.1	Kuru Gaz ve Aktif Karbon ile Hidrojen Sülfür Giderimi Denemesi.....	79
4.5.2	Nemli Gaz ve Aktif Karbon İle Hidrojen Sülfür Giderimi Denemesi...	81
4.5.3	Demir (III) Hidroksit'in Kolona Geri Devri.....	83
4.5.4	Demir (III) İçeren Arıtma Çamurunun Kolonlara Geri Devri	85
BÖLÜM 5		
DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER.....		89
5.1	Çöp Gazı Özellikleri	89
5.2	Demir (III) İçeren Arıtma Çamuru	90
5.3	Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi	90
BÖLÜM 6		
SONUÇLAR VE ÖNERİLER		99
KAYNAKLAR.....		102
ÖZGEÇMİŞ.....		107

SİMGE LİSTESİ

Ag ₂ S	Gümüş sülfür
Ba	Baryum
Ca	Kalsiyum
CH ₄	Metan
CaCO ₃	Kalsiyum karbonat
CaO	Kalsiyum oksit
Co	Kobalt
CO	Karbon monoksit
CO ₂	Karbon dioksit
CO ₃ ²⁻	Karbonat
CuS	Bakır (II) sülfür
D4	Oktametilsiklotetrasiloksan
D5	Dekametilsiklopentasiloksan
DEA	Dietanolamin
Fe ⁺³	Demir (III)
Fe ₂ O ₃	Demir (III) oksit
Fe(OH) ₃	Demir (III) hidroksit
H ₂	Hidrojen
HCO ₃ ⁻	Bikarbonat
H ₂ CO ₃	Karbonik asit
H ₂ O	Su
H ₂ O ₂	Hidrojen peroksit
H ₂ S	Hidrojen sülfür
K	Geçirgenlik katsayısı
KOİ	Kimyasal oksijen ihtiyacı
L2	Hekzametildisiloksan
MoS ₂	Molibden disülfid
Na	Sodyum
NaOH	Sodyum hidroksit
NaHCO ₃	Sodyum bikarbonat
N ₂	Azot
NH ₃	Amonyak
NH ₄ ⁻ -N	Amonyum azotu
Ni	Nikel
NO ₃ ⁻	Nitrat

NO _x	Azot oksitleri
NTA	Nitrilotriasetik asit
MDEA	Metildietanolamin
MEA	Monoetanolamin
Mg	Magnezyum
Mo	Molibden
O ₂	Oksijen
OH	Hidroksit
PDMS	Polidimetilsiloksan
R ²	Determinasyon katsayısı
Se	Selenyum
Si	Silisyum
S ²⁻	Sülfür
SO ₃ ²⁻	Sülfite
SO ₄ ²⁻	Sülfat
TMSOH	Trimetilsilanol
Tu	Tungsten (Volfram)
WS ₂	Volfram disülfite
VMS	Uçucu metil siloksan (Volatile methylsiloxane)

KISALTMA LİSTESİ

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
CNG	Sıkıştırılmış Doğalgaz (Compressed Natural Gas)
CHP	Bütünleşik Isı ve Güç (Combined Heat and Power)
EPA	Çevre Koruma Ajansı (Environmental Protection Agency)
HDPE	Yüksek Yoğunluklu Polietilen (High Density Polyethylene)
İSKİ	İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi
İSTAÇ	İstanbul Çevre Yönetimi Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi
LEL	En Düşük Patlayıcılık Sınırı (Lower Explosive Limit)
LNG	Sıvılaştırılmış Doğalgaz (Liquified Natural Gas)
MCFC	Eriyik Karbon Yakıt Hücresi (Molten Carbonate Fuel Cell)
ORC	Organik Rankin Döngüsü (Organik Rankine Cycle)
P&ID	Boru ve Ekipman Diyagramı (Pipe & Instrumentation Diagram)
PAFC	Fosforik Asit Yakıt Hücresi (Phosphoric Acid Fuel Cell)
PEM	Proton Değişim Membranı (Proton Exchange Membrane)
ppm	Milyonda bir (part per million)
ppb	Milyarda bir (part per billion)
VOC	Uçucu Organik Bileşikler (Volatile Organic Compounds)
RMSE	Ortalama Karesel Hataların Karekökü (Root Mean Square Error)
SCE	Sterling Çevrim Motoru (Stirling Cycle Engine)
SOFC	Katı Oksit Yakıt Hücresi (Solid Oxide Fuel Cell)
SSE	Hataların Kareler Toplamı (Sum of Squares for Error)
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Atık yönetim hiyerarşisi	6
Şekil 2.2 Depo tabanı sızıntı suyu toplama ve geçirimsizlik sistemi	15
Şekil 2.3 Depo tabanı teşkili	15
Şekil 2.4 Son örtü serilmesi	17
Şekil 2.5 Katı atıkların hücre metodu ile depolanması	19
Şekil 2.6 Katı atık düzenli depolama alanı tabakaları	19
Şekil 2.7 Depo sahalarında madde dönüşümü	20
Şekil 2.8 Katı atık depo sahalarında atıkların ayrışma kademeleri	21
Şekil 2.9 Metan oluşum fazları	23
Şekil 2.10 Dikey kuyu	32
Şekil 2.11 Yatay kuyu	33
Şekil 2.12 Odayeri gaz toplama sistemi şeması	33
Şekil 3.1 Bir depo sahasında enerji eldesinin aşamaları	52
Şekil 3.2 Silindir gömleğinde korozyonun oluşma yeri	59
Şekil 3.3 Anoksik korozyon	60
Şekil 3.4 Kullanılmamış intercooler örneği	61
Şekil 3.5 Kullanılmış intercooler örneği	61
Şekil 3.6 Kullanılmış intercooler örneği	61
Şekil 3.7 Motor parçalarında tortu birikmesi	62
Şekil 3.8 Siloksan birikimi olan motor parçaları	63
Şekil 3.9 Siloksan birikimi olan motor parçaları	64
Şekil 4.1 İstanbul'daki depo sahalarının ve aktarma istasyonlarının konumu	74
Şekil 4.2 Ortadoğu Enerji Odayeri Elektrik Üretim Santrali	75
Şekil 4.3 Odayeri Elektrik Üretim Santrali akış diyagramı	76
Şekil 4.4 Tasarlanan giderim kolonu	77
Şekil 4.5 H ₂ S giderimi deney düzeneği P&ID tasarımı	78
Şekil 4.6 Geotech GEM5000 portatif gaz analiz cihazı	78
Şekil 4.7 Kuru gaz ve aktif karbon ile H ₂ S giderim sisteminin P&ID tasarımı	79
Şekil 4.8 Kuru gaz ve aktif karbon ile H ₂ S giderim sistemi	80
Şekil 4.9 Portatif booster ünitesi	81
Şekil 4.10 Nemli gaz ve aktif karbon ile H ₂ S giderim sisteminin P&ID tasarımı	82
Şekil 4.11 Nemli gaz ve aktif karbon ile H ₂ S giderim sistemi	82
Şekil 4.12 Demir (III) hidroksit ile H ₂ S giderim sisteminin P&ID tasarımı	83
Şekil 4.13 Dolgu malzemesi (ilk tabaka)	84

Şekil 4.14	Dolgu malzemesi (ikinci ve üçüncü tabaka)	84
Şekil 4.15	Kimyasal rejenerasyon tankı	85
Şekil 4.16	Denemelerde kullanılan blower ve pompa.....	85
Şekil 4.17	İki kademeli tank sistemi ve ekipmanlar	86
Şekil 4.18	Kolonların yeni konumu	86
Şekil 4.19	Demir (III) içeren arıtma çamuru ile H ₂ S giderim sisteminin P&ID tasarımı	87
Şekil 4.20	Çalışmada kullanılan diğer blower	87
Şekil 5.1	Odayeri tesisi metan ve hidrojen sülfürün yıl içindeki değişimi	89
Şekil 5.2	Langmuir izoterm modelleri ve deney sonuçları	93
Şekil 5.3	Freundlich izoterm modelleri ve deney sonuçları	94
Şekil 5.4	Demir (III) içeren çözeltilere ait kinetik modeller ve deneysel sonuçları	96
Şekil 5.5	Denemelerin yükleme oranları	97
Şekil 5.6	Denemelerdeki H ₂ S yükleri	98



ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Kişi başı atık üretim değerleri.....	4
Çizelge 2.2 Ülkelere göre katı atık bileşimleri	5
Çizelge 2.3 Kentsel katı atıkların fiziksel özellikleri.....	6
Çizelge 2.4 Belediye atık göstergeleri (2002-2012)	7
Çizelge 2.5 Ülkelerin kentsel katı atık bertaraf yöntemleri	8
Çizelge 2.6 Tipik çöp gazı bileşenleri	21
Çizelge 2.7 Çöp gazındaki eser bileşikler	22
Çizelge 2.8 Metan oluşum evrelerinin yıllara göre dağılımı	23
Çizelge 2.9 Atık stabilizasyonu için yapılan uygulamalar ve amaçları	31
Çizelge 2.10 Dikey ve yatay kuyuların avantaj ve dezavantajları	34
Çizelge 2.11 Çöp gazı tahmin modelleri	40
Çizelge 3.1 Çöp gazı bileşimi	42
Çizelge 3.2 Çöp gazının kullanım alanları.	48
Çizelge 3.3 Biyogaz değerlendirme teknikleri ve gaz şartlandırma gereksinimleri ...	56
Çizelge 3.4 Bazı motor üreticilerinin iz kirletici limit değerleri.....	56
Çizelge 3.5 Bazı motor üreticilerinin iz kirletici limit değerleri.....	57
Çizelge 3.6 Bazı motor üreticilerinin verdiği siloksan limitleri	63
Çizelge 5.1 Demir (III) içeren arıtma çamuruna ait analiz sonuçları.....	90
Çizelge 5.2 Denemelere ait maksimum ve minimum giderim verimleri	90
Çizelge 5.3 Çalışmada kullanılan izotermiler	91
Çizelge 5.4 Langmuir izotermine ait katsayılar ve performans indikatörleri	92
Çizelge 5.5 Freundlich izotermine ait katsayılar ve performans indikatörleri	92
Çizelge 5.6 Absorpsiyon hız sabiti ve performans indikatörlerine ait veriler.....	95

TAM ÖLÇEKLİ BİR KATI ATIK DEPO SAHASINDA (ODAYERİ) ÇÖP GAZINDAN H₂S GİDERİMİNİN ARAŞTIRILMASI

Fatih GÜRELİ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bestami ÖZKAYA

Katı atıkların düzenli depolanması sonucu enerji üretiminde kullanılacak çöp gazı üretilmektedir. Çöp gazı Hidrojen Sülfür (H₂S), Uçucu Organik Bileşikler (VOC) ve Siloksanlar gibi çevresel açıdan zararlı iz bileşenler içermekte ve bu iz bileşenler enerji geri kazanımında sorunlara neden olmaktadır.

Çöp gazı ile işletilen gaz motorlarının performansları çöp gazı içindeki safsızlıklardan etkilenmekte ve enerji geri kazanımının ekonomikliğini düşürmektedir. Çöp gazındaki safsızlıkların türüne ve miktarına bağlı olarak ekipmanlar planlandıktan önce yıpranabilmekte ve değişebilmekte, bakım maliyetleri artmakta ve motor bakımından dolayı üretim kayıpları sebebiyle işletme maliyetleri artmaktadır. Bu zararlı etkilerin önlenmesi amacıyla çöp gazındaki H₂S'ün giderilmesi gerekmektedir. Literatürde içten yanmalı motorlarda müsaade edilen H₂S limit konsantrasyonu 100 ppm olarak verilmektedir.

Çöp gazından hidrojen sülfürün giderimi denemesi için pilot ölçekli sistem tasarlanarak Ortadoğu Enerji Odayeri Tesis'i'ne kurulmuştur. Bu amaçla 225 mm çaplı HDPE boru kullanılarak sistem dizayn edilmiştir. Sistem hidrojen sülfür giderimi yapabilen üç farklı adsorplayıcı malzeme (ticari aktif karbon, demir (III) hidroksit ve demir (III) içeren arıtma çamuru) ile çalıştırılmış ve günde üç kez ölçüm yapılmıştır. Bu malzemelerin hidrojen sülfür giderim verimleri incelenmiş ve ilgili malzemeler için tasarım kriterleri ve performans parametreleri belirlenmiştir. Bu amaçla MATLAB R2013a programı

yardımıyla adsorpsiyon izotermi oluşturulmuş ve lineer olmayan regresyon ile adsorpsiyon katsayıları bulunmuştur.

Buna göre demir (III) içeren arıtma çamurunun en yüksek maksimum doygunluk kapasitesine (874,8 mg/g) sahip olduğu belirlenmiştir. Diğer yandan demir (III) hidroksit çözeltisinin maksimum doygunluk kapasitesi 737,8 mg/g olarak bulunmuştur. Demir (III) oksit çözeltisi denemesinde pH kontrol edilmediğinden dolayı kapasite daha düşük bulunmuştur. Genel olarak demir (III) içeren çözeltilerin kapasitelerinin aktif karbon malzemelere göre daha yüksek bulunmuştur. Aktif karbon malzemelerde ise nemli gaz ile yapılan çalışmaların kuru gaz ile yapılan çalışmalardan daha yüksek kapasitede olduğu belirlenmiştir.

Aktif karbona göre demir (III) içeren çözeltilerin giderim verimi rejenerasyonun yapılması ile sabit tutulabilmektedir. Demir (III) çözeltileriyle ilgili çalışma verilerinin birinci derece kinetiğe uyduğu tespit edilerek kinetik parametreler belirlenmiştir. Buna göre demir (III) hidroksitin adsorpsiyon hız sabiti demir (III) içeren arıtma çamuruna göre daha yüksek bulunmuştur. Yani demir (III) hidroksitin kapasitesi demir (III) içeren çamurdan daha yüksektir. Demir (III) içeren arıtma çamurunun çöp gazından H₂S gideriminde alternatif bir metottur. Ancak demir (III) içeren çamurun H₂S gideriminin yapılacağı tesisin kapasitesine ve içme suyu arıtma tesisinin enerji üretim tesisine yakın olması gibi maliyet etkenlerine göre düşük maliyetli bir yöntem olarak kullanılabileceği düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: hidrojen sülfür, çöp gazı, aktif karbon, demir (III) hidroksit, içme suyu arıtma çamuru, adsorpsiyon, absorpsiyon

**REMOVAL OF HYDROGEN SULFIDE FROM LANDFILL GAS AT FULL SCALE
LANDFILL (ODAYERİ): A RESEARCH STUDY**

Fatih GÜRELİ

Department of Environmental Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Bestami ÖZKAYA

Landfill gas is produced by the landfilling of solid waste and it can be used energy production. Landfill gas contains environmentally harmful trace components such as siloxanes and Hydrogen Sulfide (H_2S), Volatile Organic Compounds (VOCs) and they are caused by problems in the energy recovery.

Gas engines performances are affected by impurities in the landfill gas and these impurities are affect the economic of energy recovery. Gas engines equipments can wear out and can be changed earlier than planned, depending on the type and amount of impurities in the gas. These impurities are increase maintenance costs and production losses due to maintenance of gas engines and all of these increase operating costs. Because of these reasons it is necessary to remove the H_2S in landfill gas in order to prevent harmful effects. In the literature, the permissible limit concentration of H_2S in the internal combustion engine is given as 100 ppm.

A pilot scale H_2S removal system was designed and established at Ortadoğu Energy Odayeri Power Plant. For this purpose, the system is designed by using 225 mm diameter HDPE pipe. Three different hydrogen sulphide adsorptive materials (commercial activated carbon, iron (III) hydroxide and iron (III) containing sludge) was used at pilot scale system and measurement was made three times a day. After that, hydrogen sulfide removal efficiency of these materials were examined and design criterias and performance parameters for the all materials were determined. For this

purpose, adsorption isotherms has been prepared with using MATLAB R2013a program with nonlinear regression and adsorption coefficients were founded.

Accordingly, iron (III) containing sludge has the highest maximum saturation capacity (874.8 mg/g). On the other hand, iron (III) hydroxide solution has maximum adsorption capacity of 737.8 mg/g. Iron (III) oxide solution's capacity lower than iron (III) containing sludge because of the pH parameter was not controlled. In general, iron (III) solutions have higher capacity than activated carbon. The active carbon with working raw gas is determined to be at a higher capacity than dehumidified gas.

At the iron (III) solutions removal efficiency can be fixed by making the regeneration of the removal efficiency of the solution than activated carbon. Iron (III) solution's experimental data was found to comply with the first order kinetics and kinetic parameters are determined. Accordingly, iron (III) hydroxide absorption rate constant is higher than the iron (III) containing sludge. So, iron (III) hydroxide's capacity is greater than iron (III) containing sludge. Iron (III) containing sludge can be used as an alternative method for H₂S removal from landfill gas according to cost factors such as landfill gas to energy plant capacity and proximity between the drinking water treatment plant and landfill gas to energy plant.

Keywords: hydrogen sulfide, landfill gas, activated carbon, iron (III) hydroxide, drinking water treatment sludge, adsorption, absorption

1.1 Literatür Özeti

Katı atıkların düzenli depolanması sonucu bir biyoreaktör oluşturularak enerji üretiminde kullanılabilecek çöp gazı veya diğer adıyla çöp gazı üretilmektedir. Çöp gazı, yüksek oranda metan ve karbondioksit ile birlikte iz bileşenleri içermektedir. Buradaki asıl amaç metanı yakarak enerji üretmektir. Çöp gazının enerji geri kazanımında gaz motorlarında yakıt olarak kullanılmakta ve elektrik üretilmektedir.

Çöp gazı, Hidrojen Sülfür (H_2S), Uçucu Organik Bileşikler (VOC) ve Siloksanlar gibi çevresel açıdan zararlı iz bileşenler içermekte ve bu iz bileşenler enerji geri kazanımında sorunlara neden olmaktadır. Çöp gazındaki iz bileşiklerin türü ve miktarı enerji üretiminde ve çevreye önemli etkiye sahiptir. Araştırmalar iz bileşenlerin kabul edilebilir seviyelerin üstünde olmasının ekipmanlara ve çevreye olumsuz etkilerinin olduğunu göstermiştir.

Çöp gazı ile işletilen gaz motorlarının performansları çöp gazı içindeki safsızlıklardan etkilenmekte ve enerji geri kazanımının ekonomikliğini düşürmektedir. Çöp gazındaki safsızlıkların türüne ve miktarına bağlı olarak ekipmanlar planlanandan önce yıpranabilmekte ve değişebilmekte, bakım maliyetleri artmakta ve motor bakımından dolayı üretim kayıpları sebebiyle işletme maliyetleri artmaktadır. Ayrıca çöp gazındaki H_2S gibi asidik bileşiklerin motor yağında birikimi motor parçalarında korozyona neden olmaktadır. Bu zararlı etkilerin önlenmesi amacıyla çöp gazındaki H_2S 'ün giderilmesi gerekmektedir. Literatürde içten yanmalı motorlarda müsaade edilen H_2S limit konsantrasyonu 100 ppm olarak verilmektedir [1].

1.2 Tezin Amacı

Çöp gazından hidrojen sülfürün giderimi denemesi için Ortadoğu Enerji Odayeri Tesisinde pilot ölçekli sistem kurularak işletilecektir. Bu sistemde farklı adsorbent malzemeler ile çöp gazındaki H_2S 'ün giderimi izlenecektir. Bu tezin amacı işletilmesi kolay, maliyeti düşük ve giderim verimi yüksek malzemenin ve çalışma koşullarının tespitidir. Bu amaçla aktif karbon, demir (III) hidroksit ve demir (III) içeren arıtma çamuru malzemeleri ile H_2S giderimi izlenmiştir. H_2S giderim sisteminin işletmede olan tesise kolayca entegre edilebilmesi için farklı konfigürasyonlar denenmiştir. Çalışmaların yapılıp ölçüm sonuçlarının elde edilmesinden sonra veriler değerlendirilerek adsorpsiyon izotermi oluşturularak ilgili katsayılar bulunmuştur.

1.3 Hipotez

Pilot ölçekli sistem depo sahasından çekilen çöp gazı ve hidrojen sülfür giderimi yapabilen farklı adsorplayıcı malzemelerle çalıştırılarak bu malzemelerin hidrojen sülfür giderimindeki verimi incelenecek ve ilgili malzemeler için tasarım kriterleri ve performans parametreleri belirlenmesi düşünülmektedir. Çöp gazından hidrojen sülfür arıtımına en uygun ve düşük maliyetli malzemenin ve şartların tespit edilmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca yapılan çalışmanın sonuçları ticari olarak satılan sistemlerle karşılaştırılarak yatırım yapılabilecek sistemler belirlenecektir. Çalışmanın çöp gazı ile yapılıyor olması literatürde karşılaşılan yapay gaz karışımlarıyla elde edilen sonuçlara göre daha doğru bir yatırım ve değerlendirme süreci oluşturacağı düşünülmektedir.

BÖLÜM 2

KATI ATIKLAR

Katı atıklar, her türlü insan ve hayvan faaliyeti sonucunda meydana gelen, istenmeyen ve herhangi bir amaçla kullanılamayacak olan katı maddelerdir. Ayrıca üreticisi tarafından atılmak istenen, gerek toplumun huzurunun gerekse de çevrenin korunması bakımından düzenli bir şekilde bertaraf edilmesi gereken katı atıkların ve arıtma çamurlarının tümüne katı atık denir [2].

2010 yılında revize edilen Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği'ne göre [3] “Üreticisi tarafından atılmak istenen ve toplumun huzuru ile özellikle çevrenin korunması bakımından, düzenli bir şekilde bertaraf edilmesi gereken katı maddeleri ve arıtma çamurlarının tümü” katı atık olarak tanımlanır. Katı atıklar çevre ve halk sağlığı açısından birçok sorun ve risk oluşturmaktadır. Bahsi geçen sorun ve oluşabilecek risklerin ortadan kaldırılması için katı atıkların kontrolü ve düzenli bir şekilde bertarafının yapılması gerekmektedir.

Katı atıkların kontrolünün ve bertarafının yapılmasında kolaylık sağlaması amacıyla çeşitli sınıflandırmalar geliştirilmiştir. Katı atıklar, kaynaklarına ve bileşimlerine göre olmak üzere iki ana grupta incelenebilir. Kaynaklarına göre katı atıklar; evsel atıklar, ticari ve kurumsal atıklar, park, bahçe ve pazar yeri atıkları, inşaat yıkım ve hafriyat atıkları, endüstriyel, tarımsal ve tıbbi atıklar ile arıtma çamurlarından oluşur. Bileşimlerine göre ise organikler ve inorganik atıklar şeklinde sınıflandırılır [4].

Evsel faaliyetler sonucu oluşan zararlı ve tehlikeli atık kapsamına girmeyen katı atıklar kentsel katı atıklar olarak adlandırılmaktadır. Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği'ne göre [3] evsel katı atık (çöp), “Konutlardan atılan tehlikeli ve zararlı atık kavramına

girmeyen, bahçe, park ve piknik alanları gibi yerlerden gelen katı atıklar” olarak tanımlanmıştır.

2.1 Katı Atıkların Miktar ve Özellikleri

Katı atıkların miktarları ve özellikleri insanların sosyo-ekonomik yapısına bağlı olarak değişiklik göstermekle beraber gelir seviyesi ve tüketim alışkanlıklarına bağlı olarak değişmektedir. Buna göre ülkeler, şehirler ve hatta aynı şehir içindeki ilçelere göre farklılıklar oluşmaktadır. Ayrıca yerel koşullar, mevsim şartları ve tüketim alışkanlıkları da bu konuda önem arz etmektedir. Ülkemizde 2012 yılında belediyelerde toplanan kişi başi günlük ortalama atık miktarı TÜİK tarafından, yaz mevsimi için 1,14 kg, kış mevsimi için 1,09 kg, yıllık ortalama ise 1,12 kg olarak hesaplanmıştır [5]. D-Waste vd. tarafından 2013 yılında oluşturulan Atık Envanteri’ne göre [6] kişi başına atık üretimi miktarları belirlenerek raporlanmıştır. Bu rapordaki verilere göre bazı ülkelerin kişi başı yıllık atık üretim değerleri izelge 2.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1 Kişi başı atık üretim değerleri [7]

lke	Atık Üretimi (kg/kişi-gün)
Almanya	1,6
Amerika	2,01
Avustralya	5,7
Brezilya	1,05
Çin	0,63
Fransa	1,46
İngiltere	1,43
İspanya	1,47
Kanada	2,45
Rusya	0,93
Türkiye	1,12

Katı atık bileşimleri ülkeden ülkeye yaşam koşulları ve ekonomik gelişmişlik seviyesine göre değişmektedir. Dünya Bankası’nın katı atık yönetimi konusunda hazırladığı rapora

göre [8] Türkiye'nin de dahil olduğu bazı ülkelerin katı atık bileşimleri Çizelge 2.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2 Ülkelere göre katı atık bileşimleri [8]

Ülke	Organik (%)	Kağıt (%)	Plastik (%)	Cam (%)	Metal (%)	Diğer (%)
A.B.D.	25	34	12	5	8	16
Almanya	14	34	22	12	5	12
Avustralya	47	23	4	7	5	13
Avusturya	35	22	11	8	5	19
Brezilya	61	15	15	3	2	5
Çin (Hong Kong)	38	26	19	3	2	12
Danimarka	29	27	1	5	6	32
Filipinler	41	19	14	3	5	18
Finlandiya	33	40	10	5	5	7
Fransa	32	20	9	10	3	26
Güney Kore	28	24	8	5	7	28
Hindistan	35	3	2	1	-	59
Hollanda	35	26	19	4	4	12
İngiltere	-	64	9	17	8	1
İsveç	-	68	2	11	2	17
İsviçre	29	20	15	4	3	29
İspanya	49	21	12	8	4	7
İtalya	29	28	5	13	2	22
Japonya	26	46	9	7	8	12
Kanada	24	47	3	6	13	8
Türkiye	40-65	7-18	5-14	2-6	1-6	7-24

Kentsel katı atıkların bileşimleri kadar fiziksel özellikleri de bir o kadar önemlidir. Genel olarak yoğunluk, su muhtevası, alan kapasitesi, özgül ağırlık ve porozite kentsel katı atıklarda dikkate alınan fiziksel özelliklerdir [9]. Kentsel katı atıkların fiziksel özellikleri Çizelge 2.3'de gösterilmiştir.

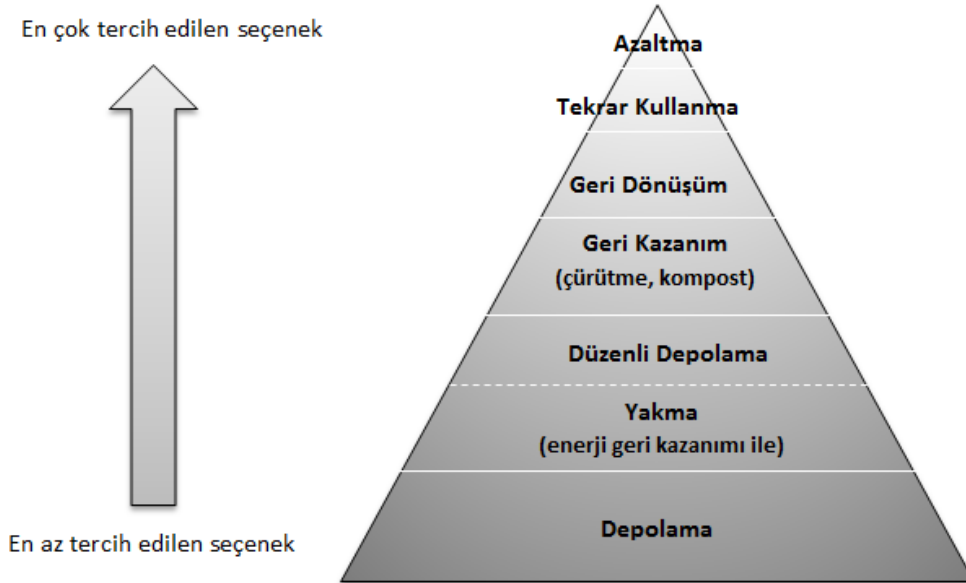
Çizelge 2.3 Kentsel katı atıkların fiziksel özellikleri [9]

Parametre	Aralık
Yoğunluk (kg/m^3)	475-830
Hacimsel su muhtevası (%)	15-50
Arazi kapasitesi (%ağırlık)	50-60 (Sıkıştırılmamış atık)
Özgül ağırlık (t/m^3)	1,7-2,5
Boşluk oranı (%)	40-60

Kentsel katı atıkların kimyasal özellikleri, su muhtevası, uçucu katı madde, inorganik karbon içeriği, atığın kül muhtevası ve atığın kalorifik değeridir. Atıkların biyolojik özellikleri organik madde içeriği ile belirlenir [10].

2.2 Katı Atık Bertaraf Yöntemleri

Katı atık yönetiminin amacı, kaynak israfını önlemek ve kaynak yaratmanın dışında eldeki mevcut kaynaklara göre sistemin daha iyi çalışmasını sağlamak ve atık miktarını azaltılması ve geri kazanılabilecek maddelerin ekonomiye kazandırılmasıdır [8], [11]. Bu nedenle atıkların bertarafı için yapılan çalışmaların çevreyi en az etkileyecek, çağdaş ve en az masrafla yapılması büyük önem taşımaktadır [11]. Ülkelerin kullandığı ortak bir atık yönetim hiyerarşisi Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Atık yönetim hiyerarşisi [8]

TÜİK'nun 2014 yılında açıkladığı verilere göre [5] 2012 yılı içerisinde atık toplama ve taşıma hizmeti verilen belediyelerde toplanan 25,8 milyon ton atığın, %59,9'u düzenli depolama tesislerine, %37,8'i belediye çöplüklerine, %0,6'sı kompost tesislerine gönderildiği, %1,7'sinin ise diğer yöntemler ile bertaraf edildiği belirtilmiştir. 2002-2012 yıllarına ait belediye atık istatistikleri Çizelge 2.4'de gösterilmiştir. Çizelge 2.4'den görüldüğü üzere Türkiye'de düzenli depolamaya gönderilen katı atık miktarı artarken vahşi depolamaya giden katı atık miktarı azalmaktadır. Yasal zorunluluklara uyma ve katı atık teknolojilerinin ülkemizde gelişmesiyle beraber vahşi depolamaların ortadan kalkması muhtemeldir.

Çizelge 2.4 Belediye atık göstergeleri (2002-2012) [5]

Parametre	2002	2004	2006	2008	2010	2012
Toplam belediye sayısı	3227	3225	3225	3225	2950	2950
Atık hizmeti verilen belediye sayısı	2984	3028	3115	3129	2879	2894
Toplanan belediye atık miktarı (bin ton/yıl)	25373	25014	25280	24361	25277	25845
Kişi başı ortalama belediye atık miktarı (kg/kişi-gün)	1,34	1,31	1,21	1,15	1,14	1,12
Atık bertaraf yöntemleri ve miktarı (bin ton/yıl)						
Belediye çöplüğüne atılan	16310	16416	14941	12678	11001	9771
Düzenli depolama tesislerine gönderilen	7047	7002	9428	10947	13747	15484
Kompost tesisine gönderilen	383	351	255	276	194	155
Açıktaki yatarak	221	102	247	239	134	105
Dereye ve göle dökerek	197	155	70	48	44	33
Gömerek	500	426	144	100	34	94
Diğer	716	563	195	73	122	202

Ülkelerin gelişmişlik seviyeleri katı atık bileşimini etkilediği gibi kullanılan bertaraf yöntemlerini de etkilemektedir. Gelişmiş ülkelerde düzenli depolamaya gidecek madde miktarı en az olacak şekilde atık azaltma, tekrar kullanım, geri kazanım ve enerjiye çevrim gibi proseslere önem verilmektedir. Ülkelerin kentsel katı atık bertaraf yöntemleri Çizelge 2.5'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.5 Ülkelerin kentsel katı atık bertaraf yöntemleri [8]

Ülke	Vahşi Depolama	Düzenli Depolama	Kompost	Geri Dönüşüm	Atıktan Enerji	Diğer
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
A.B.D.	-	54	8	24	14	-
Avustralya	-	69,66	-	30,34	-	-
Avusturya	-	6,75	44,72	26,54	21,1	0,9
Çin (Hong Kong)	-	55	-	45	-	-
Danimarka	-	5,09	15,28	25,57	54,04	0,03
Güney Kore	-	36	-	49	14	-
Hollanda	-	2	23	25	32	17
İngiltere	-	64	9	17	8	1
İsveç	-	5	10	34	50	1
İsviçre	-	1	16	34	50	-
İspanya	-	52	33	9	7	-
İtalya	-	54	33	-	12	-
Japonya	-	3	-	17	74	6
Kanada	-	-	12,48	26,78	-	60,74
Portekiz	-	64	6	9	21	-
Türkiye	66	30	1	-	-	3
Yunanistan	-	92	-	8	-	-

Katı atığın bileşimi kaynağında toplanma şekline bağlı olarak değişmektedir. Farklı şekilde toplanan atıkların bileşimleri farklı olmakla birlikte baskın olarak organik kısım diğer bileşenlerden daha fazladır. Katı atığın organik kısmı aerobik veya anaerobik mikroorganizmalar vasıtasıyla daha basit bileşenlere dönüştürülebilir. Bu dönüşüm faaliyetlerinin daha etkin gerçekleşmesi, ürünlerin kontrolünün sağlanması ve en ekonomik prosesin tespiti için farklı bertaraf prosesleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler arasında en yaygın olanları geri kazanma, yakma, kompostlaştırma ve düzenli depolama yöntemleridir. Bu tekniklerin seçiminde, katı atık kompozisyonu, yoğunluğu, nem oranı, karbon/azot oranı ve yakıt değeri göz önünde bulundurulması gereken önemli özelliklerdir.

2.2.1 Kaynakta Azaltma ve Geri Kazanma

Katı atıkların, toplama ve temizleme dışında hiçbir işleme tabi tutulmadan, aynı şekilde ekonomik ömrü doluncaya kadar defalarca kullanılmasına tekrar kullanım denir. Tekrar kullanımın uygulanması durumunda ürünün kullanım süresi uzatılmış olur [12]. Bu nedenle atık içerisindeki geri kazanılabilir madde (cam, plastik, kağıt, metal vb.) miktarı yeterli ise geri kazanım mutlaka yapılmalıdır.

Geri dönüşüm; atıkların özelliklerinden faydalanarak içindeki bileşenlerin fiziksel, kimyasal ve biyokimyasal yöntemlerle başka ürünlere veya enerjiye dönüştürülmesidir [12]. Geri kazanımda en önemli etken geri dönüştürülebilir atıkların diğer atıklardan ayrı toplanması olup bu atıkların kaynakta ayrı toplanması gereklidir [4]. Aksi halde bu malzemelerin ekonomik değeri düşmekte ve ayrıca toplanan katı atığın bir geri kazanım tesisinde işlenmesi gerekmektedir.

2.2.2 Yakma

Yakma, hacim ve ağırlık küçültme oranının yüksek olması nedeniyle depolama sıkıntısının çekildiği durumlarda, hastane atıklarında olduğu gibi son ürünün stabilize edilmesinin gerekli olduğu hallerde kullanılan bir yöntemdir [11]. Geri dönüşümü mümkün maddelerin ayrılmasından sonra, katı atık nem oranı ve kalorifik değerinin uygun olması halinde ve gerekli hava kalitesi standartlarının sağlanması şartıyla bu yöntemin uygulanması ekonomik ve çevresel açıdan faydalı olmaktadır. Söz konusu yöntem uygulanmadan önce katı atıkların yakma işlemi için gerekli şartları sağlayıp sağlamadığı kontrol edilmelidir [4].

Yakma prosesinde karşılaşılan önemli sorunlar baca gazında hava kalitesi standartlarının sağlanması, zemin drenajından kaynaklanan suyun bertarafı, oluşan külün yüksek konsantrasyonlarda ağır metal içermesi ve bu külün depo sahalarında bertaraf edilme zorunluluğudur.

Katı atıkların yakılabilmesi için atığın yakmaya uygun olması ve ikincil bir yakıta ihtiyaç duyulmaması önemlidir. Aksi takdirde yakma ekonomik olmamaktadır. Yakma işlemi sonucu kalan inorganik atıkların bertarafı için nihai bir depolamaya ihtiyaç

bulunmaktadır. Yakma genellikle düzenli depolama için yer sıkıntısı olan ülkelerde, gerekli depo alanı ihtiyacını azaltmak için yaygın olarak kullanılan yöntemdir [13].

2.2.3 Piroliz ve Gazifikasyon

Piroliz, atık yığınları içindeki cam ve metallerin ayrılmasından sonra geriye kalan ve işe yaramaz gibi görünen organik maddelerin hava kullanılmaksızın ısıtılarak gaz, sıvı yakıt ve kömüre dönüştürülmesidir [13]. Piroliz yöntemiyle atıkların bertarafı sonucunda kok, katran, uçucu yağlar, yoğunlaşabilir hidrokarbonlar, su ve piroliz gazları (H_2 , CO, Hidrokarbonlar, H_2O , N_2) açığa çıkar [14].

Katı atığın tamamen oksijensiz ortamda termal bozunması prensibine piroliz denir. Gazifikasyon, karbon içeren biyokütle gibi katıların yüksek sıcaklıkta bozunması ile yanabilir gaz elde etme işlemidir [13]. Bu işlemde ortama bir miktar hava verilmekte; ancak ortamdaki oksijen miktarının stokiometrik oranın altında olması sağlanmaktadır. Gazifikasyon sonucu H_2 , CO, CO_2 , CH_4 , H_2O , N_2 gazları açığa çıkar [14].

2.2.4 Kompostlaştırma

Kompost, katı atık içerisindeki organik maddelerin biyokimyasal süreçten geçirilerek humusa benzer bir malzemeye dönüştürülmesidir. Katı ve sıvı atıklar içindeki organik maddeler çeşitli mikroorganizmalar vasıtasıyla daha basit bileşiklere, bilhassa CO_2 ve H_2O 'ya dönüşür. Kompostlaştırma aerobik ve anaerobik olmak üzere iki yolla yapılabilir. Anaerobik süreçte dönüşüm esnasında yan ürün olarak biyogaz da elde edilmektedir. Atıkların uygun kısımları kompost yapılsa bile, yaklaşık %30'luk bir kısmının nihai olarak başka bir usulle uzaklaştırılması gerekmektedir [15].

2.2.5 Düzenli Depolama

Katı atık bertaraf teknolojilerinden görüldüğü üzere hangi yöntem kullanılırsa kullanılsın sonuçta nihai olarak depolanması gereken bir kısım meydana gelmektedir. Bu nedenle düzenli depolamanın atıkların tamamen ayrışmasına imkan sağlaması ve ekonomikliğı sebebiyle dünya genelinde yaygın olarak tercih edilmesini sağlamıştır.

Atıkların düzenli depo sahalarında depolanmasının ardından atık içerisindeki organik madde mikroorganizmalar tarafından parçalanırlar. Bu ayrışmanın ilk basamağında aerobik bakteriler organik maddeleri organik asitlere ve diğer kimyasal bileşiklere dönüştürürler. Depo sahasının üzerinin örtülmesi ile ortamdaki oksijen miktarı azalır ve anaerobik ortam oluşur. Bu aşamadan sonra anaerobik bakterilerin baskın olması ve organik maddelerin parçalanması ile çöp gazı, yüksek kirletici karakterde sızıntı suyu ve stabilize olmuş atık ürünleri elde edilir. Anaerobik ayrışma yavaş işleyen bir proses olup sıcaklık, nem ve pH gibi birçok faktöre bağlıdır. Bir düzenli depo sahasında ayrışma yaklaşık olarak 20-30 yıl sürmektedir.

2.3 Düzenli Depolama Sahaları

İnsan nüfusunun artışıyla dünya genelinde katı atık miktarı artmaktadır. Buna bağlı olarak katı atıkların yönetiminde teknolojik gelişmeler takip edilerek birçok yöntem geliştirilmektedir. Geçmiş yıllarda vahşi depolamanın yaratmış olduğu tehlike ve sorunlardan kurtulmak amacıyla düzenli depo sahaları kurulmaya başlanmıştır.

Katı atıkların bertarafı konusunda yakma, kompostlaştırma, gazifikasyon, piroliz gibi birçok yöntem mevcut olup bunların en ekonomik olanı düzenli depolamadır. Düzenli depolamada atıkların kontrollü şartlarda daha stabil hale dönüştürülebilmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca katı atıkların bertarafında hangi yöntem kullanılırsa kullanılsın nihai olarak depolanması gereken bir miktar atık oluşmaktadır. Bu nedenle düzenli depolama dünya genelinde çokça kullanılan bir yöntem olmuştur. Günümüzde bazı Avrupa ülkelerinde ve Amerika’da düzenli depolama halen kullanılmaktadır.

Geçirimsizlik tabakası kil ve geomembranla sağlanan, sıkıştırılan, düzenli depolanan, çevre ve insan sağlığını etkilemeyecek şekilde üzeri örtülen ve oluşan gazdan enerji elde edilebilen depolara düzenli depolama alanları denilmektedir [2].

Düzenli depolama alanlarının inşa edilmesi sırasında bir takım hususlara dikkat edilmelidir. Bunlar; yer seçimi, taban teşkili ve üst örtü teşkilidir. Bu konuyla ilgili parametre ve gereksinimler “Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik” [16] ile belirlenmiştir.

2.3.1 Depolama Tesisleri Sınıfları

Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik Madde 16'da depolama tesisleri depolanabilen atık altyapısına göre 3 sınıfa ayrılmıştır [16]:

I. sınıf düzenli depolama tesisi: Tehlikeli atıkların depolanması için gereken altyapıya sahip tesis.

II. sınıf düzenli depolama tesisi: Belediye atıkları ile tehlikesiz atıkların depolanması için gereken altyapıya sahip tesis.

III. sınıf düzenli depolama tesisi: İnert atıkların depolanması için gereken altyapıya sahip tesis.

2.3.2 Yer Seçimi

Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik Madde 15'de katı atık depolama alanının inşası öncesi yer seçimi için belirlenen kriterler şunlardır [16]:

Düzenli depolama tesis sınırlarının yerleşim birimlerine uzaklığı I. sınıf düzenli depolama tesisleri için en az bir kilometre, II. sınıf ve III. sınıf düzenli depolama tesisleri için ise en az iki yüz elli metre olmak zorundadır.

Ayrıca, düzenli depolama tesisinin yer seçiminde;

- a) Düzenli depolama tesisinin hava ulaşım güvenliğini etkileyip etkilemediği,
- b) Orman alanları, ağaçlandırma alanları, yaban hayatı ve bitki örtüsünün korunması gibi özel amaçlarla koruma altına alınmış alanlara uzaklığı,
- c) Bölgede bulunan yeraltı ve yüzeysel su kaynakları ve koruma havzalarının durumu, yeraltı su seviyesi ve yeraltı suyu akış yönleri,
- ç) Sahanın topografik, jeolojik, jeomorfolojik, jeoteknik ve hidrojeolojik durumu,
- d) Taşkın, heyelan, çığ, erozyon ve yüksek deprem riski,
- e) Hâkim rüzgâr yönü ve yağış durumu,
- f) Doğal veya kültürel miras durumu dikkate alınır.

Sahada akaryakıt, gaz ve içme-kullanma suyu naklinde kullanılan boru hatları, yüksek gerilim hatları bulunmaz.

Çevresel etki değerlendirmesi sürecinin tamamlanmasını müteakip seçilen alan, ilgili planlara işlenir.

2.3.3 Depo Tabanı Teşkili

Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik Madde 5’de katı atık depo tabanının teşkili için belirlenen kriterler şunlardır [16]:

Düzenli depolama tesisinin tabanı ve yan yüzeylerinde, sızıntı suyunun yeraltı suyuna karışmasını önleyecek şekilde bir geçirimsizlik tabakası teşkil edilir. Bunun için kil veya eşdeğeri malzemeden oluşturulmuş geçirimsizlik tabakası serilir. Geçirimsizlik tabakasının fiziksel, kimyasal, mekanik ve hidrolik özellikleri depolama tesisinin toprak ve yeraltı suları için oluşturacağı potansiyel riskleri önleyecek nitelikte olmak zorundadır. Geçirimsizlik malzemeleri teknik özellik bakımından Türk Standartları Enstitüsü standartlarına uygun olmalıdır.

Düzenli depolama tesisi sınıflarına göre depo tabanının asgari aşağıda belirtilen geçirgenlik ve kalınlık özelliklerine sahip olması gerekir [16]:

- a) I. sınıf düzenli depolama tesisi: $K \leq 1,0 \times 10^{-9}$ m/sn; kalınlık ≥ 5 m veya eşdeğeri,
- b) II. sınıf düzenli depolama tesisi: $K \leq 1,0 \times 10^{-9}$ m/sn; kalınlık ≥ 1 m veya eşdeğeri,
- c) III. sınıf düzenli depolama tesisi: $K \leq 1,0 \times 10^{-7}$ m/sn; kalınlık ≥ 1 m veya eşdeğeri.

Jeolojik geçirimsizlik tabakasının ikinci fıkrada verilen koşulları doğal olarak sağlayamaması halinde; bu tabaka yapay olarak oluşturulur ve jeomembran kullanılarak güçlendirilir. Geçirimsiz mineral malzeme ile yapay olarak oluşturulacak geçirimsizlik tabakasının toplam kalınlığı 0,5 metreden az olamaz.

Sızıntı sularının toprak ve yeraltı suları için oluşturacağı potansiyel risklerin engellenmesi için düzenli depolama tesislerinde doğal geçirimsizlik tabakasına ilave olarak aşağıda verilen teknik özelliklerde sızıntı suyu toplama ve drenaj sistemi inşa edilir:

a) I. sınıf ve II. sınıf düzenli depolama tesislerinde jeolojik geçirimsizlik tabakası yapay geçirimsizlik malzemesi ile oluşturulur. Yapay geçirimsizlik malzemelerinin yeterli teknik özelliklere haiz olduğunun ve Ek-3'te yer alan standartlara veya bunun mümkün olmaması halinde uluslararası standartlara uygunluğu belgelenir ve Bakanlığa bildirilir.

b) Yapay geçirimsizlik tabakasının korunması amacıyla koruyucu örtü malzemesi kullanılır.

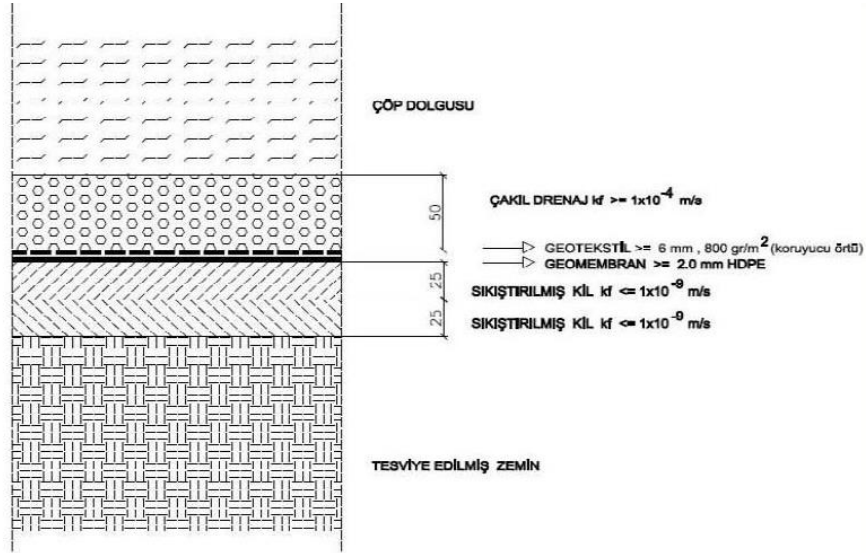
c) I. sınıf ve II. sınıf düzenli depolama tesislerinde yapay geçirimsizlik kaplaması üzerine asgari 0,5 metre kalınlığa ve en az $K \geq 1,0 \times 10^{-4}$ m/s geçirgenliğe sahip drenaj tabakası uygulanır.

ç) Drenaj katmanının içinde drenaj boruları bulunur. Boru çapı, yapılacak kontrol ve temizlemelere imkân verebilecek genişlikte olur. Depo tabanında sızıntı suyuna dayanıklı bir malzemeden imal edilmiş yeterli sayıda drenaj borusu, ana toplayıcılar ve bacalar bulunur. Sızıntı suyu toplama ve drenaj sistemi sızıntı suyu toplama havuzu ile son bulur. Sızıntı suyu toplama havuzu tesisin kurulacağı yerin meteorolojik koşulları ve depolanacak atıkların su içeriği göz önünde bulundurularak herhangi bir olumsuzluğa mahal vermeyecek şekilde tasarlanır ve inşa edilir.

d) Depo tabanının boyuna eğimi %3'ten az olamaz.

III. sınıf düzenli depolama tesislerinde, sahada sel, taşkın gibi yağış sularından ve yüzeysel sulardan kaynaklı olumsuzlukları engelleyecek önlemlerin alınması kaydıyla bu maddenin dördüncü fıkrası uygulanmaz. Ancak Bakanlıkça gerekli görülmesi halinde bu tesislerde, yeraltı suyunun kontrolü ve izlenmesi için gerekli tedbirler alınır ve bu maddenin dördüncü fıkrasına uygun şekilde sistem kurulur.

İSTAÇ II. Sınıf Düzenli Depolama Tesisleri'ne ait Sızıntı suyu toplama ve taban geçirimsizlik sistemine ait çizim Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Depo tabanı sızıntı suyu toplama ve geçirimsizlik sistemi [18]

Depo tabanı teşkiliyle alakalı örnek uygulamalar Şekil 2.3'de gösterilmiştir.



a) Kil serimi

b) Geomembran serimi



c) Geotekstil serimi

d) Drenaj tabakası teşkili

Şekil 2.3 Depo tabanı teşkili [18]

2.3.4 Üst Örtü Teşkili

Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik Madde 17’de depo tesisi üst örtüsünün teşkili için belirlenen kriterler şunlardır [16]:

Atık depolama işlemi tamamen bittikten sonra depolama alanında üst örtü teşkil edilmeden önce, alan normal kazı toprağı örtüsü ile tesviye edilir. Kapatma işlemine başlamadan önce; atıkların veya yapının kayma ve çökme riskine karşı depolanan atık kütlelerinin yeterince oturduğu tespit edilir.

Düzenli depolama tesisi sınıflarına göre, tesisin kurulduğu bölgenin yağış özelliklerinden dolayı kapatma sonrası süreçte sızıntı suyunun oluşumunun engellenmesi ve depoda oluşacak gazların toplanması için depo üst örtüsü asgari aşağıda verilen şartları sağlayacak şekilde teşkil edilir.

a) Yalnızca gaz oluşumu beklenen II. sınıf düzenli depolama tesislerinde; depo gazlarının oluşturacağı potansiyel risklerin engellenmesi amacıyla gaz drenaj katmanı inşa edilir.

b) Yapay geçirimsizlik kaplamasının I. sınıf düzenli depolama tesislerinde uygulanması mecburidir.

c) Mineral geçirimsizlik tabakası en az 25 cm kalınlığında iki tabaka halinde uygulanır. Drenaj tabakasının en az 50 cm kalınlığında olması ve en az $K \geq 1.0 \times 10^{-4}$ m/s geçirgenliğe sahip olması gerekir.

ç) Üst örtü toprağı daha sonradan bitkilerin yetiştirilmesini sağlayabilecek şekilde yetiştirilecek bitki türüne bağılı olarak en az 50 cm kalınlığında olması gerekir.

III. sınıf düzenli depolama tesisleri için bu hükümler uygulanmamakla birlikte bu sahalarda atık depolama işlemi tamamen bittikten sonra sahanın üstünün kapatılması ve yeşillendirilmesi zorunludur.

Üst örtü teşkili, depolama alanlarında çöp gazının toplanmasına etki eden önemli faktörlerden biridir. Üst örtü teşkilinin en üst seviyede yapılması durumunda depoya hava girişi en az seviyede olacak, böylelikle atığın doğal anaerobik bozunum süreci sekteye uğramayacaktır [18].

Depo alanlarında oluşan gazlardan olan metan gazının toplama verimi depo sahasının üzerindeki örtü tabakasının özelliğine göre değişmektedir. Geomembran ile kapatılmış depo sahalarında %90 verimle metan elde edilirken, işletme halindeki bir hücrede ise verim %35 olmaktadır. Kil tabakasıyla örtülmüş sahalarda ise bu verim %85 olarak ölçülürken, geçici olarak kapatılmış hücrede ise %65 verim elde edilmektedir [19].

Son örtü serilmesine ait örnek uygulama Şekil 2.4’de gösterilmiştir.



Şekil 2.4 Son örtü serilmesi [18]

2.3.5 Depolama Yöntemleri

Katı atıkların düzenli depolamasında çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Sahanın topografyasına, yüzey suyu ve yer altı suyu kaynağına bağlı olarak bu yöntemlerden biri seçilir. Yaygın olarak kullanılan yöntemler hendek metodu, alan metodu, vadi metodu ve hücre metodudur.

Hendek metodu, yeterli toprak örtüsünün bulunduğu yerlerde uygulanır. Katı atıklar 40-100 m uzunlukta 1-2 m derinlikte ve 5-8 m genişlikte kazılan hendeklere ince tabakalar halinde yayılır ve sıkıştırılır. Bu işlem, killi, sızdırmaz zeminlerde ve küçük nüfuslu yerleşimlerde uygulanır. Bu metotta çöp dökmeden önce bir dozer yardımı ile birkaç araç genişliğinde belirli bir yükseklikte (23-15 m) ve 30-150 m uzunluğunda çukur açılır. Kazılan zemin, örtü toprağı olarak daha sonra kullanılmak üzere kazılacak hendek kenarından uzakta depolanır. Arazi zemini, şev eğimini sağlayacak uygun bir kohezyon değerine sahiptir. Bu yöntemde atıklar çukur tarafına dozerler vasıtası ile serilir. Sahanın her noktası üzerinden buldozer veya kompaktör ile 2-3 defa geçilerek atıkların parçalanıp sıkışmaları sağlanır [4]. Dolgu alanının uzunluğu, o günkü dökülen

kapasite ile ölçölür yani dolgu yüksekliğine gelen bir günlük kapasitenin üzeri hemen kapatılır.

Arazinin hendek kazılmasına müsait olmadığı veya buna ihtiyaç bulunmadığı hallerde alan metodu uygulanır. Çöpler uzun ve dar şeritler halinde 30-60 cm kalınlıkta araziye serilir ve sıkıştırılarak 2-3 m yüksekliğe kadar depo edilir. Şeritlerin boyları, genelde bu yüksekliğe günün sonunda erişilecek şekilde planlanır. Günün sonunda depolanan sıkıştırılmış çöp yığınının üzerine 20-30 cm kalınlıkta toprak tabakası örtölür. Doldurma operasyonu genellikle daha önce inşa edilen toprak bir seddenin dibinden başlar ve sıkıştırılarak sedde yüksekliğine kadar devam eder. Sıkıştırılan çöpler 6 m genişliğinde şeritler halinde yükselir [4].

Vadi dolgusu metodunda, vadilerde düzenli depolamanın yapımından önce mevcut kuru veya sulu dereler, akarsular depolama alanının memba tarafından başlayıp mansap tarafında biten tünel veya menfezlerle çöplerle teması kesilmelidir. Menfez veya tüneller yeraltı suyu ve çöp sızıntı sularına karşı iyice yalıtılmalıdır. Vadi metoduyla çalışırken bütün çalışma bölgesi yağış ve akış sularına karşı çevresel hendeklerle donatılmalı, yağış sularının çöplerle teması kesilmeli, gerekli hallerde pompalarla sular çalışma dışına aktarılmalıdır [4].

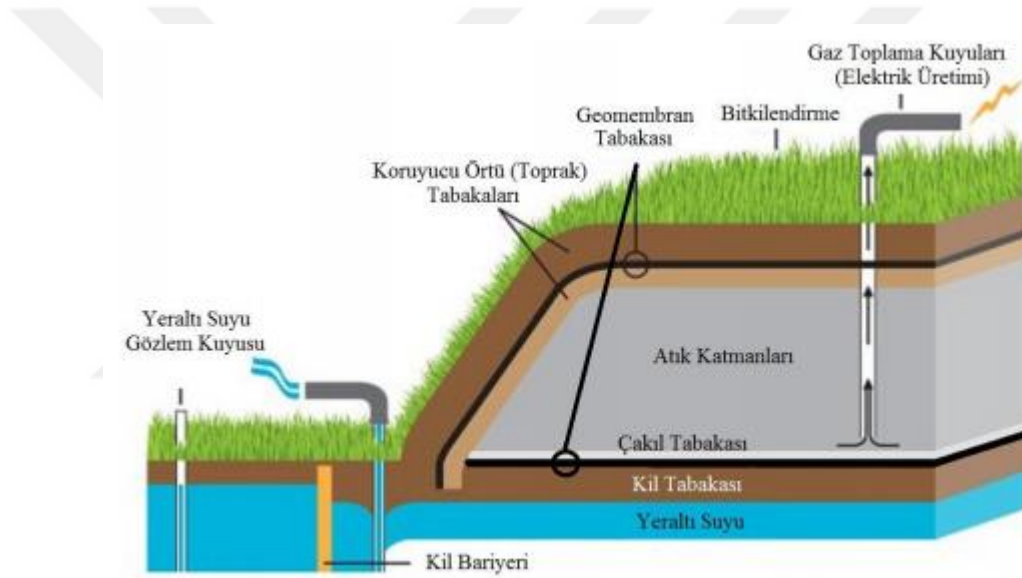
Hücre metodunda katı atıklar daha önceden hazırlanmış alanlara depolanmaktadır. Atıkların hücrelere doldurulması eğimin yukarisından aşağıya doğru olduğundan araçların hücrelere atık boşaltımı depolama alanının üstünden yapılmaktadır. Bu durum sonucunda saha içi yol ve platform yapılmaktadır. Hazırlanan yol ve platform ile araziye gelen araç atığı ilgili alana döker. Kompaktörler vasıtasıyla atıklar yukarıdan aşağıda serilirler. İlgili hücrenin depolaması bitince üzerine 30-40 cm örtü toprağı serilir. Örtü tabakası yıpranmış olan kısımlar varsa buralara da ekstradan örtü toprağı serilir.

İstanbul'daki Odayeri ve Kömürcüoda II.Sınıf Düzenli Depolama Tesis'lerinde katı atıkların sahaya depolanması bu metotla yapılmaktadır. Şekil 2.5'de katı atıkların hücre metodu ile depolanması gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Katı atıkların hücre metodu ile depolanması [18]

Katı atıkların arazide depolanması ve üst örtünün serilmesi sonrası arazinin tabakaları Şekil 2.6’da gösterilmiştir.



Şekil 2.6 Katı atık düzenli depolama alanı tabakaları [20]

2.4 Çöp Gazı

Katı atık düzenli depo sahaları, atıkların sıkışması, iklim, su muhtevası gibi şartlarla kontrol edilen biyolojik, kimyasal ve fiziksel reaksiyonların meydana geldiği, katı, sıvı ve gaz fazının bir arada bulunduğu, temel giriş maddelerinin katı atık ve yağmur suyu, başlıca çıkış elementlerinin ise çöp gazı ve sızıntı suyu olduğu bir çeşit bir reaktör olarak düşünülebilir [10], [20]. Böyle bir reaktörde (Şekil 2.7) katı faz (atık), sıvı faz (sızıntı suyu) ve gaz fazı (çöp gazı) olmak üzere 3 faz mevcuttur.



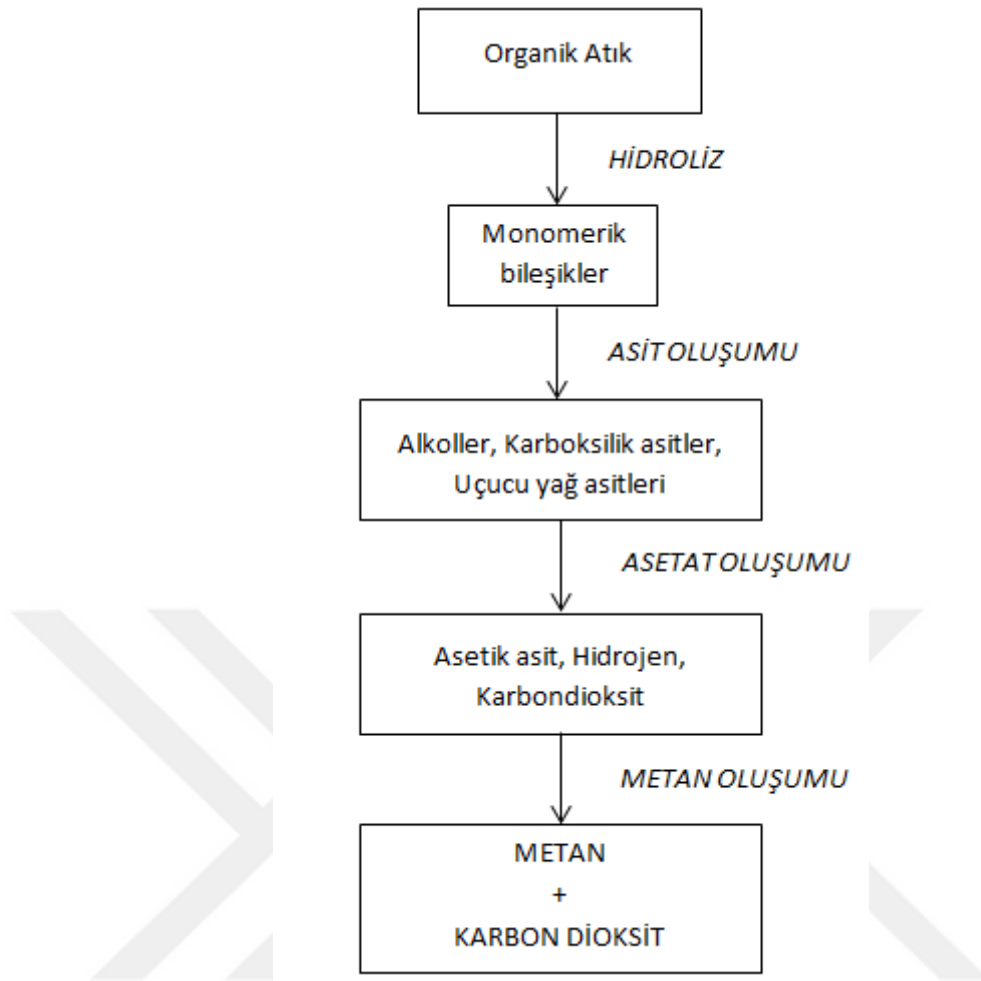
Şekil 2.7 Depo sahalarında madde dönüşümü [10]

Depolanan atıklar, farklı nem muhtevasına sahip organik ve inorganik maddelerin çeşitli oranlardaki karışımlarından meydana gelir. Düzenli depo sahalarında atıkların ayrışması oldukça karmaşık bir süreçtir. Fiziksel ayrışma, farklı materyallerin atıklardan ayrılması ve ayrışma sonunda atığın fiziksel özelliklerinde meydana gelen değişiklikler olarak tanımlanabilir. Kimyasal ayrışma, atık içerisindeki maddelerin sızıntı suyuyla çözünmesiyle gerçekleşir. Çökelme reaksiyonları, adsorpsiyon ve desorpsiyon reaksiyonları da kimyasal ayrışma sırasında meydana gelir. Biyolojik ayrışma ise, depo sahasında atıkların maruz kaldığı en önemli süreçtir. Biyolojik ayrışma, pH ve redoks potansiyelleri gibi değişkenler üzerindeki etkisinden dolayı fiziksel ve kimyasal ayrışmayı da kontrol eden süreçtir [10].

Atıkların fermentasyonu sonucu oluşan başlıca nihai ürünler uçucu yağ asitleri, CO_2 ve CH_4 'dir. Depo sahasında metan oluşumunu etkileyen faktörler; sıcaklık, çöpün su muhtevası, pH/alkalinite, oksijen, hidrojen, sülfat, nütrientler ve inhibitörlerdir. Yüzey alanı/hacim oranı düşük olan büyük partiküller küçük partiküllere göre daha yavaş hidroliz olurlar. Her bileşenin ayrışma hızı farklı olduğundan kompleks ve heterojen atıkların ayrışması birinci mertebe reaksiyon kinetiğine uymaktadır [20].

Depo sahasında mikrobiyal aktivite sonucu gerçekleşen biyokimyasal reaksiyonların hızı atıkların çürüme süresini belirler. Atıkların nem muhtevası, sıcaklığı, yoğunluğu ve kompozisyonu ile alkalinite ve pH bozunma sürecini etkileyen başlıca parametrelerdir [20].

Depo sahalarında, oksijenin açık havadan difüzyonla ve yağmur suyundan temin edildiği üst tabakada meydana gelen aerobik ayrışma ve hidroliz, asit üretimi ve metan üretimi safhalarından oluşan anaerobik ayrışma olmak üzere iki tip ayrışma fazı vardır. Katı atık depo sahalarındaki ayrışmanın temelini anaerobik ayrışma teşkil etmektedir [10]. Şekil 2.8'de atıkların ayrışma kademeleri gösterilmiştir.



Şekil 2.8 Katı atık depo sahalarında atıkların ayrışma kademeleri

Ayrışabilen evsel katı atıkların anaerobik ayrışması neticesinde 170'den fazla gaz oluşmakla birlikte başlıcaları metan (%45-60) ve karbondioksit (%40-60) olmakla birlikte düşük konsantrasyonlarda amonyak (NH_3), karbonmonoksit (CO), hidrojen sülfür (H_2S), azot (N_2) ve oksijen (O_2)'de bulunabilmektedir. Tipik çöp gazı bileşenleri ve çöp gazının karakteri Çizelge 2.6'da, çöp gazındaki eser bileşenler ve miktarları ise Çizelge 2.7'de gösterilmiştir.

Kısa süreli çalışmalar ile birlikte laboratuvar ölçekli çalışmaların depo sahalarına uyarlamaları depo sahasına koyulan 1 kg atıktan 0,05-0,4 m^3 gaz elde edilebildiğini göstermiştir. Geleneksel olarak depolanan atığın %75-80'i katı malzeme, %20-25'i nem muhtevası olarak düşünülmektedir [21]

Çizelge 2.6 Tipik çöp gazı bileşenleri ve çöp gazının karakteri [2]

Bileşen	%Kuru Bazda Hacim
Metan	45-60
Karbondioksit	40-60
Azot	2-5
Oksijen	0,1-1
Amonyak	0,1-1
Sülfitler, disülfitler, merkaptanlar vd.	0-1
Hidrojen	0-0,2
Karbon monoksit	0-0,2
İz bileşenler	0,01-0,6
Karakter	Değer
Nem içeriği	Doygun
Spesifik ağırlık	1,02-1,06
Sıcaklık, °C	38-71
Üst ısıl değer, btu/ft ³	475-550

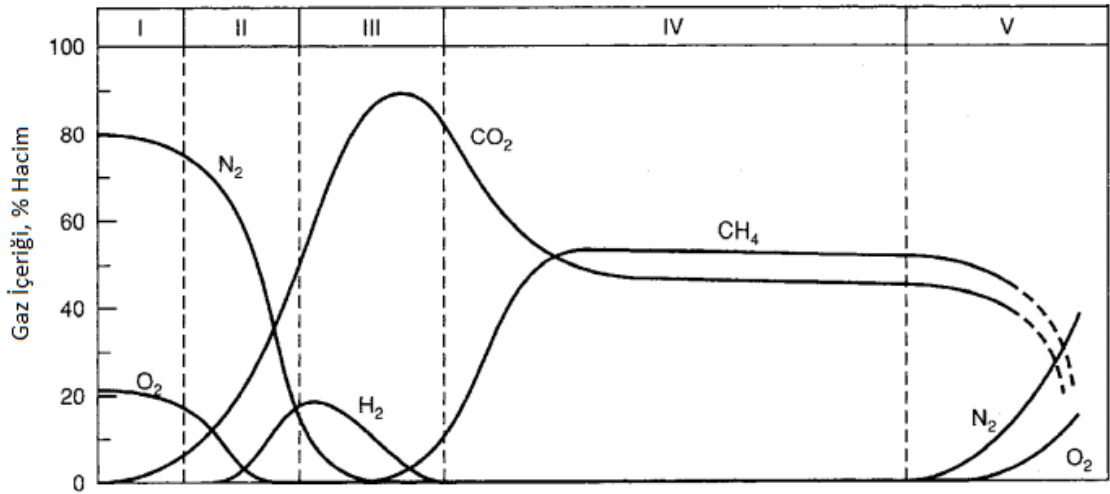
Çizelge 2.7 Çöp gazındaki eser bileşikler [22]

Eser bileşik grubu	Konsantrasyon aralığı (mg/m ³)
Alkoller	2-2500
Organosülfür bileşikleri	3-240
Halojenli hidrokarbonlar	1-2900
Aromatik hidrokarbonlar	30-1900
Aldehitler	0-200
Ketonlar	0-50
Hidrokarbonlar;	
Alkanlar	20-4500
Alkenler	6-1100
Sikloalkanlar	1-1000
Esterler	0-1300
Eterler	0-250

2.4.1 Atıkların Ayrışması ve Gaz Oluşumu

Klasik depolama alanlarında, kendi hallerine bırakıldıklarında mikroorganizma faaliyetleri sonucunda oksijen tükenene kadar aerobik olarak ayrışan organik maddeler, daha sonra anaerobik olarak ayrışır ve önemli miktarda CO_2 ve CH_4 içeren bir gaz oluşur. Fermantasyon tamamlandığında, geriye sadece çok yavaş bir şekilde ayrışabilen artık bir madde kalır. Bu artık organik madde stabilize olmuştur. Optimum şartlar altında atık stabilizasyonu 10-20 yılda tamamlanır [10].

Katı atık depo sahalarında depolanan atıkların ayrışması beş safhada incelenmektedir. Her safhadaki farklı mikrobiyolojik faaliyetlere bağlı olarak sızıntı suyu ve çöp gazı özellikleri değişim göstermektedir. Metan oluşum fazları Şekil 2.9'da ve metan oluşum evrelerinin yıllara göre dağılımı Çizelge 2.8'de ve gösterilmiştir.



Şekil 2.9 Metan oluşum fazları [2]

Çizelge 2.8 Metan oluşum evrelerinin yıllara göre dağılımı [23]

Evre	Durum	Zaman Aralığı
I	Aerobik	1 Gün-1 Hafta
II	Anoksik	1-8 Ay
III	Anaerobik, Metanojenik, Stabil Değil	3 Ay-3 Yıl
IV	Anaerobik, Metanojenik, Stabil	8-40 Yıl
V	Anaerobik, Metanojenik, Düşüş Eğilimi	1-40+ Yıl
Toplam		10-100 Yıl

Atıkların ayrışması esnasında her safhada meydana gelen değişimler aşağıda özetlenmiştir;

I. Evre-Hidroliz: Atık depo sahasındaki yerini aldıktan çok kısa bir süre sonra kentsel katı atıktaki biyolojik olarak parçalanabilen bileşikler oksijenin varlığıyla mikrobiyal bir bozunmanın etkisine girerler [24]. Bu evrede basit şekerler hızla parçalanırken, lignin, tannin gibi doğal polimerlerin biyolojik ayrışması daha yavaş gerçekleşir. Ayrıca önemli miktarda kimyasal ara ürünlerle birlikte büyük çoğunluğu CO₂ ve amonyak (NH₃) olan ve içerisinde önemli miktarda su bulunan bir gaz karışımı oluşur. Atıklar depolandıktan hemen sonra ısı açığa çıkmaya başlar ve sıcaklık hızla artar. Daha sonra, atık içerisindeki O₂ hızla tükenir ve atıkların ayrışması anaerobik şartlar altında devam eder. Organik maddelerin daha küçük, kolayca çözünebilir hale gelmesinden sonra, hidroliz prosesinin depo sahası gövdesinde sınırlayıcı proses olduğu söylenebilir [25].

II. Evre-Fermantasyon (Geçiş Fazı): Oksijen tükenmek üzeredir ve anaerobik şartlar gelişmeye başlamıştır. Oksijen tükendiğinde anaerobik safhanın ara ürünleri oluşmaya başlar. Fermantasyon ve asit üreten bakterilerin faaliyeti sonucu ilk olarak uçucu yağ asitleri, alkoller, CO₂ ve H₂ oluşur. Geçiş fazı boyunca, yüksek konsantrasyonlardaki karbondioksit ve organik asitlerin varlığından dolayı oluşan sızıntı suyunun pH'ı düşmeye başlar (pH=5-6) [24].

Sızıntı suyunun istenmeyen bir kokusu vardır ve 500-2000 mg/L gibi yüksek konsantrasyonlarda NH₄⁺-N içerebilir. Amonyum, özellikle proteinli bileşiklerin fermantasyonu ve hidrolizi sonucu oluşur. Redoks potansiyeli düştükçe, sızıntı suyunun başlangıçtaki yüksek sülfat konsantrasyonu azalır. Üretilen sülfür, bu safhanın başlangıcında çözünmüş olan demir, mangan ve diğer ağır metalleri çöktürür [10].

III. Evre-Asit Oluşum Safhası: Gelişen metan bakterileriyle birlikte ikinci anaerobik safha başlar. Biyogaz içeriğindeki hidrojen ve karbondioksit muhteviyatı düşerken, metan içeriği artar. Uçucu yağ asiti konsantrasyonu azalırken, sülfat indirgenmesi sebebiyle SO₄²⁻ konsantrasyonu düşer. pH ve alkalitedeki artış; kalsiyum, demir, mangan ve ağır metallerin çözünürlüğünün azalmasına sebep olur. Sülfür ise ağır metallerin çökmesini sağlar. Üçüncü safhaya kadar geçen süre 8 ile 16 ay arasında değişir [4].

IV. Evre-Metan Oluşum Safhası: Bu aşamada metan üretim hızı ve gazın kompozisyonu sabittir. Sızıntı suyunun organik içeriği hızla azalır. Burada, biyogazın %50-65'i (hacimce) metandır. Metanojenik aktivite sebebiyle uçucu yağ asiti ve H₂ konsantrasyonu düşüktür. Metan bakterileri zorunlu anaerobiktir ve nötr pH (6.6-7.3) değerlerinde faaliyetleri maksimuma ulaşır. Uçucu yağ asitleri ve diğer organik maddeler karbondioksit ve metana dönüştürülür. Atıkların muhteviyatına (mutfak atıkları, cam ve kağıt gibi) bağlı olarak gaz üretiminde salınımlar gözlenebilir [20].

V. Evre-Olgunlaşma Safhası: Bu safhada, metanojen bakteriler için gerekli besinin azalması nedeniyle bakteriyel bozunma hızı azalır. Bu nedenle, metan üretimi azalır ve atmosferik azotun depo içerisine difüzyonu sonucu gazın N₂ bileşimi artmaya başlar [20].

Bu, sınırları kesin çizgilerle çizilmiş bir süreç değildir. Çürüme safhası homojen bir atık hacmi için geçerlidir. Gerçekte çürüme safhası; çöp yığınlarının yaşının ve içeriğinin değişmesi sebebiyle daha karmaşık davranabilir. Birkaç gün mertebesinde süren ilk aerobik safhadan sonra diğer safhalar sırasıyla, ay, yıl ve on yıl mertebesinde sürebilir [20].

2.4.2 Çöp Gazı Oluşumunu Etkileyen Faktörler

Bir depo sahasında oluşabilecek gaz miktarını depolanan atığın miktarı ve içeriği belirler. Genel olarak atığın içerisindeki organik madde miktarı arttıkça oluşabilecek gaz miktarı artar. Çöp gazı üretimini etkileyen faktörler atık bileşenleri, nütrientler, toksik bileşikler, nem muhtevası, sıcaklık, pH ve alkalinite, oksijen, hidrojen, amonyak, sülfat, dane boyutu, atık stabilizasyonu ve meteorolojik değişkenlere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

2.4.2.1 Atık bileşenleri

Atığın içerisindeki organik madde miktarının yüksek olması gaz oluşma potansiyelini arttırır. Ancak atığın kolay ayrışabilir özellikte olması organik asitlerin fazlaca oluşmasına ve ortamın pH'sının hızla düşmesine sebep olur. Bu da sahanın doğal

tamponlama kapasitesini düşürür. Ortamda yeterli alkalinite yok ise metan oluşumu gecikebilir.

2.4.2.2 Nütrientler

Organik atıkların anaerobik parçalanması ve ayrışmanın optimum düzeyde gerçekleşebilmesi için gerekli olan çok sayıda organik ve inorganik madde bulunmaktadır. Mikrobiyal faaliyetlerin gerçekleşebilmesi için azot, fosfor, sülfür, vitaminler ve bir takım iz elementlere (Fe, Ni, Mg, Ca, Na, Ba, Tu, Mo, Se, Co) ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nütrientlerin ortamda düşük miktarlarda olması anaerobik ayrışma prosesini hızlandırır. Ancak nütrientler eşik seviyesinin üzerinde olduğunda inhibisyona sebep olmaktadır.

Anaerobik sistemler için organik madde (KOİ olarak), azot ve fosfor arasındaki optimum oran 100:0,44:0,08'dir. Bu oranda en düşük değere sahip olan fosfor anaerobik ayrışma prosesinde kısıtlayıcı besi maddesidir.

2.4.2.3 Toksik Bileşikler

Katı atıklar içerisinde bakteriyel büyümeye toksik etki yaratacak maddeler olması ve saha içinde uygun şartların oluşması durumunda anaerobik ayrışmayı yapan bakterilerin aktivitesi azalır. Bu maddelerin sınır değerleri konusunda farklı değerler mevcut olup burada depo sahası içindeki pH, sıcaklık vb ortam şartları öne çıkmaktadır.

Önemli miktarlarda endüstriyel kimyasallar içeren katı atık düzenli depo sahalarında, bazı özel organik maddeler (formaldehit, kloroform, fenol gibi) metan oluşumunu engelleyebilir. Sülfat, uçucu yağ asitleri, ağır metaller, kalsiyum, sodyum, potasyum, amonyak ve klorlu organik bileşenler de yüksek konsantrasyonlarda bulundukları takdirde anaerobik ayrışma için toksik etki yapabilirler.

2.4.2.4 Nem Muhtevası

Depo ortamında ayrışmanın olması ve gaz oluşumu ortamın nemli olmasına bağlıdır. Nem muhtevası, besi maddesi miktarıyla birlikte çöp gazı oluşumunu kontrol eden en önemli faktördür. Anaerobik ortamın gelişmesi, ısı transferi ve substrat difüzyonu için

ortamın nemli olması gerekmektedir. Birim katı atık başına oluşan biyogaz üretimi ile nem oranı arasında logaritmik bir ilişki bulunmaktadır.

Metan üretiminin optimize edilebilmesi için atıkların suya doygun olması gerekir. Katı atıklar depo sahalarına ilk depolandıklarında %30-40 arasında nem muhtevasına sahiptirler. Suya doygun olmayan atıklardan daha çok H₂ üretilirken, suya doygun atıklar daha çok CH₄ ve CO₂ oluştururlar. Depo sahalarında sızıntı suyu geri devri ile depo gövdesinin su muhtevası artırılarak anaerobik aktivite hızlandırılır ve dolayısıyla atık stabilizasyonu sağlanabilir.

2.4.2.5 Sıcaklık

Sıcaklık depo sahasındaki bakteri türlerini, aktivitelerini ve dolayısıyla gazın oluşumunu önemli ölçüde etkileyen parametredir. Depo sahasında mezofilik (30-35 °C) ve termofilik (50-60 °C) olmak üzere iki tip sıcaklık şartlarına rastlanılır. Atığın depolaması yapıp aerobik ayrışmanın başlamasından 45 gün sonra sıcaklık 70 °C'ye ulaştıktan sonra anaerobik ayrışmanın başlamasıyla sıcaklık 30-35 °C'lerde sabit kalır. Sıcaklığın artması kimyasal çözünürlüğü arttırır. Reaksiyon hız sabitleri de sıcaklığa bağlı olarak değişir.

Anaerobik ayrışma işlemi, depo alanlarında sıcaklığa bağlı olarak değişir. Anaerobik ayrışmada mezofilik (yaklaşık 35 °C) ve termofilik (yaklaşık 55 °C) olmak üzere başlıca iki sıcaklık aralığı vardır. Metan üretimi sıcaklık arttıkça artarak 35 °C'de birinci pik değerine ulaşır. Sıcaklık 45 °C ve üzerinde termofilik kademe başlar ve metan üretimi 55 °C'de maksimum değerine ulaşınca kadar artar.

2.4.2.6 pH ve Alkalinite

Atıkların anaerobik parçalanması sırasında bakterilerin optimum faaliyetleri için gerekli olan uygun pH değerlerinin sağlanması gereklidir. Genel olarak pH 6,4-7,2 değerlerinde optimum şartlar sağlanırken anaerobik ayrışma için bu pH aralığı 6,7-7,6 aralığıdır.

Organik maddelerin anaerobik olarak parçalanması prosesi farklı bakteri türlerinin biraraya gelmesi sonucu oluşmaktadır. Bu farklı bakteri türleri içinde pH'a direnci en düşük olan tür metan bakterileridir. Organik asitlerin üretimi arttığında metan

bakterilerinin organik asitleri tüketme hızı düşer ve pH azalır. Metan bakterileri pH 6-8 aralığında faaliyet gösterirler. Optimum metan oluşumu ise pH 7,0-7,2 aralığında görülür. Nötr pH'da atık ayrışma proseslerinin optimum olduğu gözlenmiştir.

Alkalinite, sistemin anaerobik ayrışma için gerekli pH değerinin istenen seviyenin altına düşmesine yol açan uçucu ve diğer asitleri tamponlama kapasitesini gösterir. Düşük alkalinite değerlerinde ortamdaki asitler pH değerinin düşmesine sebep olarak biyolojik aktiviteyi durdurabilirken, yüksek alkalinite değerleri sistemi düzensiz pH değişimlerine karşı korur. Alkalinitenin düşük olması uçucu yağ asitlerinin birikmesine yol açar. Eysel atık su çamurunun anaerobik ayrışması için gerekli toplam alkalinite değeri 2000 mg/L CaCO_3 civarında olduğu belirlenmiştir [26].

2.4.2.7 Oksijen

Anaerobik bakterilerin ayrışma proseslerini gerçekleştirmesi için ortamda serbest oksijenin bulunmaması gereklidir. Kimyasal olarak bağlı oksijenin (NO^{-3} , H_2O_2 , SO_4^{-2} , vb.) varlığı bile anaerobik arıtma sürecini olumsuz yönde etkilemektedir.

Depo sahasında aktif gaz toplama sistemi kullanılıyorsa gazın vakum ile toplanması ile atmosferden depo sahasına oksijen girişi olabilmektedir. Depo sahasına giren bu oksijeni saha yüzeyindeki aerobik bakteriler tüketirler. Metan bakterileri oksijenli ortamda tamamen yok olmamakla birlikte metan üretimi engellenmiş olur.

2.4.2.8 Hidrojen

Hidrojen fermentatif ve asetojenik bakteriler tarafından üretilir ve üretilen H_2 'in basıncı biyokimyasal dönüşümleri etkiler. Fermantasyon bakterileri, hidrojen basıncı düşük olduğunda H_2 , CO_2 ve asetik asit üretirken, yüksek H_2 basınçlarında ise H_2 ve CO_2 üretirler. Etanol, butirik asit ve propiyonik asit gibi organik bileşikler H_2 basıncı çok yüksek değilse asetojenik bakteriler tarafından da oluşturulabilir. Propiyonik asitin oluşabilmesi için H_2 basıncının $9 \cdot 10^{-5}$ atm'in altında olması gerekmektedir. Yani H_2 basıncı yüksek ise propiyonik (ve bütirik) asit oluşacak fakat bu bileşikler daha fazla ayrılmayacaktır. Hidrojen, metanojenik ve sülfat indirgeyen bakteriler tarafından tüketilir. 10^{-5} atm'den düşük basınçlar, H_2 ve CO_2 'den CH_4 oluşumu için uygundur [10].

2.4.2.9 Amonyak

Amonyak protein, üre ve aminoasit içeren organik maddelerin hidrolizi sonucu üretilmektedir ve ortamın pH'sına bağlı olarak amonyum iyonu (NH_4^+) veya amonyak bileşiği (NH_3) halinde bulunabilir. pH'nın artmasıyla serbest hale geçen amonyak bakteriyel faaliyetleri önlemektedir.

Amonyak konsantrasyonu 200-1000 mg/L mertebelerinde anaerobik prosesler için herhangi bir olumsuz etkiye sebep olmazken, yüksek pH'ta 1500-3000 mg/L konsantrasyonlarda anaerobik bakteriler için inhibisyon etkisi vardır. Konsantrasyon 3000 mg/L'yi aştığında toksik etki yapmaktadır.

2.4.2.10 Sülfat

Anaerobik şartlarda sülfat elektron alarak sülfüre dönüşebilmektedir. Sülfat indirgeyen bakteriler ve metan bakterileri asetik asit ve hidrojeni enerji kaynağı olarak kullanırlar. Bu sebeple iki bakteri türü arasında bir rekabet oluşur. Bu rekabet sonucu sülfat indirgeyen bakteriler elektronları metan bakterilerinden uzaklaştırarak kendilerine doğru çekerler ve sonuçta yüksek miktarlarda H_2S ve düşük miktarda CH_4 üretilir. H_2S 'ün metan bakterileri üzerine inhibisyon etkisi vardır. Metan üretimini arttırmak için sülfat konsantrasyonunun azaltılması gereklidir. Eğer ortamda ağır metal var ise metal sülfat ile birleşip çöker ve zararlı etkisi azaltılır. Toplam sülfürün ($\text{H}_2\text{S} + \text{HS}^- + \text{S}^{2-}$) inhibisyona sebep olduğu zararlı konsantrasyon 100 mg/L'dir. Özellikle 6,5'ten düşük pH değerlerinde sülfür inhibisyonu artmaktadır.

Atıksuda SO_4^{2-} ve SO_3^{2-} bulunması durumunda (2.1)'de gösterilen biyokimyasal reaksiyonlar meydana gelir.



Burada; 96 gr SO_4^{2-} 64 gr KOİ'ye eşdeğerdir. Diğer bir deyişle, 1.5 gr SO_4^{2-} indirgenmesi 1 gr KOİ indirgenmesine eşdeğerdir. Sülfatın tam indirgenmesi teorik olarak KOİ/ SO_4^{2-} oranının 0,67'yi geçmesi gereklidir. Bu oran 1 ile 3 arasında olduğunda sülfat indirgenmesinin gerçekleştiği belirlenmiştir [10].

Sülfatların indirgenmesi sonucu oluşan sülfür metan bakterileri için toksik etki yapmaktadır. Pratikte KOI/SO_4^{2-} oranı 7-10'dan düşük olduğunda önemli miktarda inhibisyon gerçekleşmektedir [20]. Nötr pH aralığında çözünmüş sülfürlerin yaklaşık %50'si uçucu halde iken pH 6'da sülfürlerin büyük bölümü H_2S şeklindedir.

2.4.2.11 Dane boyutu

Dane boyutunun küçültülmesi ile atığın yüzey alanı arttırılabilmektedir. Buna bağlı olarak bakterilerin organik maddeye ulaşması kolaylaşacaktır. Bakterilerin organik maddeye daha rahat ulaşabilmesi sonucu metan gazı üretim hızı artacaktır.

Yoğun olarak sıkıştırılmış atıkların dane boyutunun küçük olduğu düşünülürse bakterilerin buradaki organik maddeye ulaşması zor olacaktır. Dolayısı ile bu koşulda metan gazı üretim hızı yavaşlayacaktır.

2.4.2.12 Meteorolojik Değişkenler

Katı atık depolama alanlarında çöp gazı oluşma miktarını, içeriğini ve oluşma hızını etkileyen birçok meteorolojik parametre mevcuttur. Literatürdeki çalışmalarda genel olarak sıcaklık, atmosferik basınç, bağıl nem, toprak sıcaklığı, güneşlenme, bulutluluk, rüzgar hızı ve yağış değişkenlerinin çöp gazı oluşumuna etkisi incelenmiştir.

Uyanık, 2011 [20]'da yaptıkları çalışmada meteorolojik parametrelerin çöp gazı oluşumu üzerine olan etkilerini incelemiştir.

2.4.2.13 Atık Stabilizasyonu

Depo sahalarına gelen atıklarda bazı uygulamalar yapılarak atıkların ayrışması ve stabilizasyonunu hızlandırılabilir. Bu uygulamaların sonucu olarak atık stabilizasyonu sağlanmakta ve oluşan gaz miktarı artırılabilir.

Literatürde bu konuyla alakalı birçok çalışma mevcuttur. Özet olarak bazı atık stabilizasyonuna örnek olarak yapılan uygulamalar ve amaçları Çizelge 2.9'da gösterilmiştir.

Çizelge 2.9 Atık stabilizasyonu için yapılan uygulamalar ve amaçları [22]

Uygulama	Uygulama Amacı
Atıkların kontrolü	Organik atıkların oranının azaltılması
	Sülfat içerikli atıkların alınmaması
Atıkların öğütülmesi	Hacmin azaltılması
	Nem dağılımının homojen hale getirilmesi
	Ayrışmanın hızlandırılması
Atıkların sıkıştırılması	Depolama kapasitesinin arttırılması
	Substrat ile bakteri temasının sağlanması
Evsel çamur ilavesi	Nem dağılımının sağlanması
	Ayrışma için nütrient temini
	Anaerobik mikroorganizmaların gelişimi
Enzim ilavesi	Hidroliz prosesinin hızlandırılması
Tampon ilavesi	Organik asitlerin oluşumunun engellenmesi
Sızıntı suyu geri devri	Organik kirleticiler ile metallerin giderilmesi

2.4.3 Çöp Gazının Toplanması

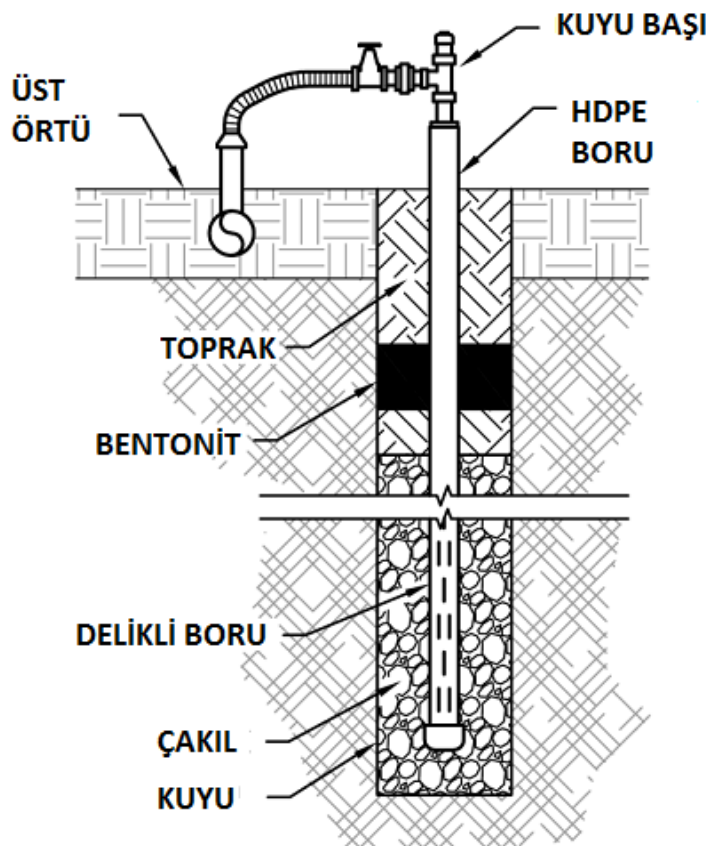
Katı atık depolama alanlarında aktif ve pasif gaz toplama sistemi şeklinde iki tür gaz toplama sistemi vardır. Pasif sistemde sahada üretilen çöp gazının basıncı gazın hareketini sağlayan unsurdur. Pasif sistemlerde harici bir emiş sistemi kurulmadan gaz kendi akışı ile toplanarak bertaraf edilir ve enerji üretilir. Aktif sistemde harici bir emiş sistemi kullanılarak bir gaz kuyusuna doğru basınç farkı oluşturulur ve gaz bu sayede toplanır. Bu vakumun oluşturulmasında blower adı verilen üniteler kullanılmaktadır. Aktif sistemde gazın toplanmasında dikkat edilecek husus gazın toplanmasında sahaya uygulanan vakumun fazla olmamasıyla saha içine oksijen girişinin yapılmamasıdır. Aksi halde sahaya oksijen girmesiyle çöp gazının kalitesi değişecektir [27].

Aktif sistemde her ne kadar vakum uygulanarak çöp gazı çekilse de sistem gazın tamamını çekememektedir. Gaz toplama sistemin verimli çalışmasıyla üretilen gazın %75 ve üstünde gaz toplama verimi elde edilebilmektedir. Burada önemli olan husus sahanın üzerinin kapatıldığı malzemedir. Üzeri membranla kapatılan sahalarda gaz toplama verimi %99'a kadar çıkmaktadır. Sistemin, çöp gazı üretim miktarındaki

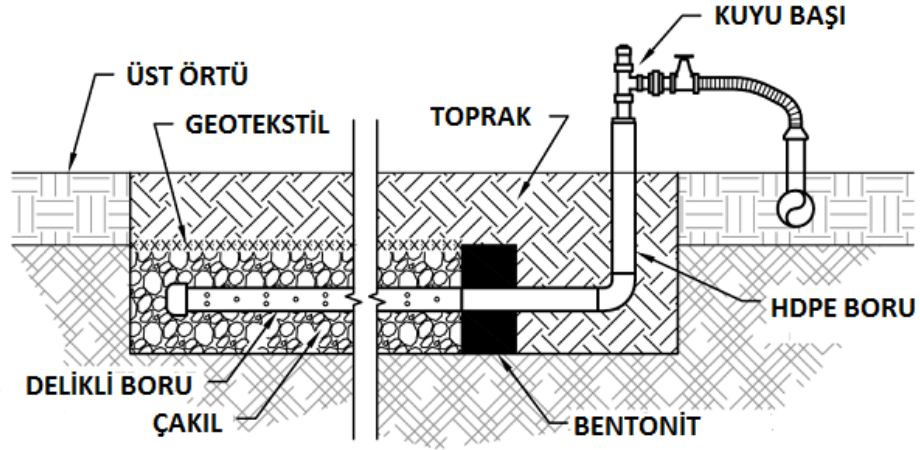
değişimlere uyum sağlayarak optimizasyonunun sağlanması ancak uygun bir inşaa ve verimli bir işletme ile mümkündür [20].

Depo sahalarında oluşan gazın toplanmasında dikey ve yatay olmak üzere iki çeşit kuyu tipi kullanılmaktadır. İsteğe ve ihtiyaca göre ikisi ayrı ayrı veya kombine olarak kullanılabilir. Bu kuyuların oluşturulmasında gazın toplanabilmesi için delikli ve yüksek yoğunluklu polietilen malzemeden üretilen borular kullanılmaktadır.

Dikey kuyuların derinliği toplam depo derinliğinin %50'si ile %90'ı arasında bir yüksekliğe sahip olabilir. Genellikle 5-20 cm arasında değişen çaplarda ve 50-70 m aralıklarla yerleştirilen delikli, üstte kalan 4-5 metresi deliksiz alt kısmı delikli gaz toplama borularıyla verimli bir gaz toplama imkanı sağlanmış olur. Gaz toplama borularının delikli kısmının çakılla, deliksiz kısmı kumla kaplanması gerekir. Boru bağlantılarının ileride oluşabilecek çökme, kayma durumlarında sağlam kalabilmesi için esnek inşa edilmesi gerekmektedir [27]. Şekil 2.10'da bir dikey kuyunun çizimi ve Şekil 2.11'de de bir yatay kuyunun çizimi gösterilmiştir.

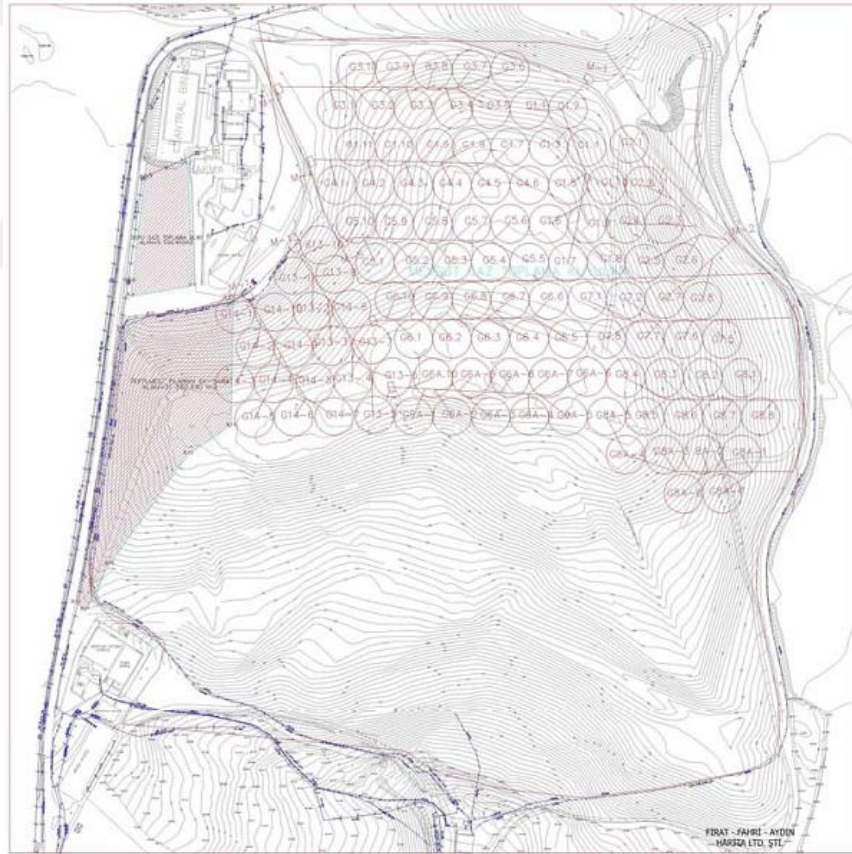


Şekil 2.10 Dikey kuyu [28]



Şekil 2.11 Yatay kuyu [28]

İstanbul'un Avrupa yakasındaki Odayeri düzenli depolama sahasına ait gaz toplama sistemi şeması Şekil 2.12'de gösterilmiştir.



Şekil 2.12 Odayeri gaz toplama sistemi şeması [27]

Bazı projelerde dikey ve yatay kuyular ayrı ayrı kullanılırken bazı projelerde kombine olarak ikisi de kullanılabilmektedir. Dikey ve yatay kuyuların birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları söz konusudur. Bu farklılıklar Çizelge 2.10'da özetlenmiştir.

Çizelge 2.10 Dikey ve yatay kuyuların avantaj ve dezavantajları [28]

Dikey Kuyular		Yatay Kuyular	
Avantajları	Dezavantajları	Avantajları	Dezavantajları
Depo sahasının küçük bir kısmında kurulduğunda depolama faaliyetlerinde aksaklığa sebep olmaz.	Aktif depo sahasına kurulursa işletme ve bakım maliyeti artar.	Çöp gazının önceden toplanmasını kolaylaştırır.	Atığın üzeri yeterince kapatılıncaya kadar saha hava girişi olabilir.
En çok tercih edilen dizayndır.	Uygun ekipmanların bulunabilirliği	Özel inşaat makinelerine ihtiyacı azaltır.	Su birikmesi ve saha çökmesi sebebiyle hataya daha yatkındır.
İnceleme ve pompalama için güvenilir ve erişilebilir bir dizayndır.	Alan veya hücre kapatıldıktan sonra kurulursa gaz toplaması gecikmiş olur.	Sahanın daha derinlerinden gaz çekilmesini sağlar.	

Dikey kuyuların birbirine olan uzaklığı yukarıda da belirtildiği gibi 50 – 70 m arasında olup bu değer düzenli depolama alanlarında sık olarak kullanılan mesafelerdir. Bu mesafeler (kuyu aralıkları) daha fazla olursa gaz toplama işlemi etkin olmaz. Daha kısa tutulursa teknik açıdan emiş sırasında kuyu etkileşimleri olacak ayrıca kuyu miktarı artacak ve sonuç olarak daha yüksek işletme giderleri ile karşılaşılacaktır [27].

Gaz toplama sisteminde toplanan gaz daha sonra deliksiz yatay borular vasıtasıyla manifold adı verilen toplama ünitelerine, oradan da daha büyük borular vasıtasıyla gazın yakılacağı yakma bacalarına (Flare) veya enerji üretimi maksatlı kullanılacağı tesise taşınır. Taşıma boruları çöp gazı içindeki nemin yoğunlaşmasından (kondensat) tıkanırsa boru içindeki gaz hareket edemez hale gelir. Yoğunlaşma sonrası ortaya çıkan suları tasfiye etmek için en alçak noktada bir drenaj sisteminin yapılması gerekmektedir [27].

Oluşan gazdan ısı ve elektrik üretimi ile azami ölçüde faydalanmak için şu hususlara dikkat edilmelidir [27];

- Verimli bir gaz dönüşüm sistemi kullanılmalıdır.
- En az 10 m derinliğinde organik atık depo sahasında bulunmalıdır.
- En azından 500 bin ton atık mevcut olmalıdır.
- Atık yaşı 2-10 yaşında olmalıdır.
- Depo sahası suya doymuş olmamalıdır.

Gaz toplama noktalarında gözlenmesi gerekenler şunlardır [18];

- Vakum,
- Fark basıncı,
- Sıcaklık,
- Çöp gazı bileşenleri,
- Vana pozisyonu.

2.4.4 Çöp Gazının Çevresel Etkileri

Katı atık düzenli depolama sahaları, açık havada yakma, açık sahalarda depolama ve denize depolama gibi alternatif bertaraf yöntemlerinin çevre ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerini ortadan kaldırma ihtiyacından dolayı geliştirilmiştir. Depo sahaları eski uygulamaların bazı dezavantajlarını ortadan kaldırmış olsa da, çöp gazı ve sızıntı suyu oluşumu gibi yeni problemlerle karşılaşmıştır [4]. Önemli çevresel etkileri olan çöp gazının kısa ve uzun vadede kontrolü ve bertarafı (dönüşümü) yapılmalıdır.

Çöp gazının oluşturabileceği sorunlar şu şekildedir;

- *Yangınlar ve patlamalar:* Çöpp gazında yüksek oranda bulunan metan gazı enerji üretiminde ana unsurdur. Metan gazı uçucu olup hava ile olan karışımlarının patlama riski bulunmaktadır. Gaz toplama sistemleri ile toplanamayan bu gaz adveksiyon ve difüzyon yolu ile dağılmadığı durumda patlama riski oluşturur ve ölümcül kazalara sebep olabilir.

- *Hava kirliliği:* Çöp gazı büyük oranda metan ve karbondioksitten oluşmasına rağmen düşük konsantrasyonlarda halojenli hidrokarbonlar ve aromatik hidrokarbonlar gibi “Uçucu Organik Bileşikler” (VOC) de içermektedir. Bu iz kirleticiler birçok düzenli depolama alanında düşük konsantrasyonlarda ölçülmelerine rağmen insan sağlığını olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca bu gazlar, gaz toplama sistemlerinde korozyona sebep olabilirler.
- *Bitki örtüsüne zararları:* Depo sahaları kapatıldıktan sonra park, golf sahası, kültürel alanlar ve ticari alanlar olarak kullanılabilirler. Depo sahasında gaz kontrolü yok ise çöp gazı yukarı doğru hareket ederek atmosfere ulaşarak oksijen ile yer değiştirir. Bu sırada bitki kökleri yüksek konsantrasyonlarda metan ve karbondioksit maruz kalırlar. Bitkinin doğrudan metana maruz kalması bitki büyümesini etkileyebilir. Ancak metanın oksidasyonu ile topraktaki oksijenin azalması ve açığa çıkan ısının toprak sıcaklığını artırması bitkinin havasız kalmasına sebep olur. Ayrıca çöp gazı içerisinde bulunan eser bileşikler (amonyak, karbon monoksit ve hidrojen sülfür) bitki örtüsüne toksik etkiye bulunabilir.
- *Küresel iklim değişimi:* Depo sahalarında çıkan metan ve karbondioksit gazları global ısınmaya katkıda bulunurlar. Karbondioksit ve su buharından sonra infrared ışınlarını tutan üçüncü önemli gaz metan olup global ısınmaya karbon dioksitten 20-25 kat daha fazla etki yapmakta ve diğer gazlara nazaran atmosferde kalma süresi daha uzun olmaktadır. Her bir metan molekülü, bir karbondioksit molekülünün absorblayabileceği infrared fotonlarının 23 kat daha fazlasını absorblayabilir. Ancak, atmosferde 83 kat daha az miktarda metan molekülü bulunduğundan, CH₄’ın sera etkisi CO₂’nin sebep olduğu sera etkisinin ¼’ü kadardır [10].
- *İstenmeyen kokular:* Depo sahası içinde gerçekleşen reaksiyonlar sonucu kokuya sebep olan bileşikler (esterler, hidrojen sülfür, organosülfürler, alkilbenzenler, limonen ve diğer hidrokarbonlar) oluşabilmektedir. Bu bileşiklerin oluşması ve konsantrasyonu depolanan atığın bileşimi, depo yaşı, ayrışma durumu vb. sebeplere bağlıdır. Kokuya sebep olan eser miktardaki bileşenlerin çoğu toksik

olabilir (örneğin hidrojen sülfür). Kokunun hava olayları ile depo sahasının dışına çıkması şikayetlere sebep olabilmektedir.

2.4.5 Depo Sahalarında Oluşan Gaz Miktarını Hesaplama ve Tahmin Yöntemleri

Çöp gazından enerji üretim sistemlerinin dizaynı, planlaması ve projenin fizibilitesinin oluşturulabilmesi amacıyla depo sahasından elde edilebilecek gaz miktarının hesaplanması veya tahmin edilmesi gereklidir. Çöp gazının toplanacağı kuyular ve ilgili alanların tespiti; toplama, arıtma ve enerji kazanım ünitelerinin boyutlandırılmasında depo sahasından elde edilecek gaz miktarı esas alınmaktadır. Yapılacak çöp gazı tahmini projenin başarısını doğrudan etkileyebilmektedir.

Bu amaçla birçok hesaplama ve tahmin yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin birbirinden farkı gaz üretimini farklı yönden ele almaları ve farklı girdi parametreleri kullanmalarıdır. Depo sahasında yıllık olarak depolanan atık miktarı ortak çıkış noktası olan bu modellerde yıllık olarak depolanan atık miktarına bağlı olarak yıllık olarak elde edilebilecek çöp gazı miktarı hesaplanır. Depo sahasından elde edilecek toplam çöp gazı miktarı yıllık olarak elde edilecek çöp gazı miktarlarının toplanmasıyla bulunur.

Birinci dereceden kinetik modeller depo gövdesinde oluşacak çöp gazı miktarını tahmin etmekte en çok kullanılan modellerdir. Bu modeller modelleme yapılacak depo sahası ile ilgili birçok varsayım yapmayı gerektirmektedir. Birinci dereceden ayrışma modeli birçok kurum ve kuruluş tarafından kabul görmüş, endüstride de yaygın olarak kullanılan bir modeldir. Model denklemleri değişikliğe çok uygun olmasa da, giriş parametrelerinin değişkenliği, özellikle metan üretim potansiyeli ve metan üretim sabiti bu modelin diğer birçok modele temel oluşturmasını sağlamıştır [23].

Kullanılan model için anahtar olarak kabul edilecek giriş parametreleri modelleme sonrasında tekrar analiz edilmelidir. Elde edilen gerçek saha verileri ile bu parametrelerin hangi hassasiyette tahmin edildiğinin analiz edilmesi, daha sonra yapılacak çalışmalarda doğru sonuçlar almak adına oldukça önemlidir. Anahtar parametrelerin çöp gazı tahminini doğrudan etkilemesi nedeniyle bu analiz mümkün olduğunca hassas yapılmalıdır [23].

Depo sahasının mevcut potansiyelinin hesaplanmasında, depo sahasının homojen olmayan yapısı, veri toplamının güçlüğü, bu verilerin doğruluğu ve modele girişi yapılacak tüm parametrelerinin sahanın gerçek durumunu yansıtacak şekilde seçilmesi oldukça önemli kısıtlardır. Bu kısıtlar göz önünde bulundurularak alt ve üst limitlerin çıkarılması dizayn ve uygulama açısından oldukça önemlidir [23].

2.4.5.1 Test Kuyuları Yöntemi

Gaz miktarının belirlenmesindeki en güvenilir metot olup açılan bu kuyularda toplanan gazı ölçülmektedir. Çok pahalı bir yöntem olup depo alanında büyük miktarlarda gaz üretilmesi için yeterince atık bulunması halinde bu yönetime başvurulur. Sahanın büyüklüğün ve depo sahasındaki atık homojenliğine bağlı olarak sahayı temsil edici noktalarda ve sayıda gaz kuyusu açılması gerekmektedir. Sahadan ölçülen gaz miktarı saha içinde sıkışan miktar olduğundan dolayı elde edilen değer projelendirmede kullanılır. Bu yöntem ile saha içindeki gaz konsantrasyonu ve bileşimi de öğrenilebilir. Buna göre gerekli projelendirme yapılmasına imkan tanır.

2.4.5.2 Teorik Gaz Üretimi

Teorik gaz üretiminin hesaplanmasında organik maddenin mikroorganizmalar tarafından metan ve karbondioksit gazına dönüşme denklemi kullanılır. Teorik gaz üretimi bozunan organik madde miktarına ya da bozunan karbon (C) miktarına göre hesaplanabilir. Hacimsel metan kütlesi 714 g/m^3 olarak kabul edilip organik maddedeki (glikoz) karbon miktarı 72 g olarak alınır ve hesaplama yapılır.



$$180 \text{ g/mol} \rightarrow 48 \text{ g/mol} + 132 \text{ g/mol} \quad (2.3)$$

$$\text{Oluşan metan gazı} = \frac{48 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{180 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * 714 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}} = 0,373 \frac{\text{m}^3 \text{ metan}}{\text{g bozunan organik}} \quad (2.4)$$

İndirgenen karbon başına metan gazı üretimi ise;

$$\text{Oluşan metan gazı} = \frac{48 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{72 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * 714 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}} = 0,933 \frac{\text{m}^3 \text{ metan}}{\text{g bozunan C}} \quad (2.5)$$

2.4.5.3 Kinetik Modeller

Kinetik modeller derecelerine göre şu şekilde özetlenebilir [20];

- Sıfırıncı derece; EPER France,
- Birinci derece (Monod Kinetiği); TNO, LandGEM, Gassim, Afvalzorg, EPER, IPCC ve LFGEEN,
- İkinci derece; Biyolojik büyümeyi temel alan ikinci dereceden karmaşık yapıdaki Halvadakis modeli

2.4.5.4 Tahmin Modelleri

Literatürde farklı parametreleri kullanarak çöp gazındaki metan miktarını bulan modeller mevcuttur. Bu modellerde yapay sinir ağlarını kullanarak çöp gazının tahmini yapılabilmektedir.

Özkaya vd.'nin [29] Odayeri düzenli depolama sahasında yaptıkları çalışmada 34 ay boyunca sızıntı suyu ve çöp gazı parametreler izlenmiştir. Bu parametreler kullanarak metan yüzdesi %90'dan yüksek oranlarda tahmin edilmiştir.

Özcan vd.'nin [30] Odayeri düzenli depolama sahasında yaptıkları çalışmada çöp gazı parametrelerini (CH_4 , CO_2 , CO ve sıcaklık) giriş verileri, yine çöp gazı parametrelerinden biri olan metanı ise çıkış verisi olarak kullanarak yapay sinir ağıyla çöp gazındaki metan yüzdesini %89'lara varan doğrulukla tahmin etmiştir.

(Eren, 2010)'in [31] yaptığı tahmin çalışmasında İSTAÇ Odayeri çöpten elektrik üretim tesislerine ait 900 adet günlük üretim verileri kullanılmıştır. Veriler yapay sinir ağları ve çoklu regresyon tekniğine uyarlanarak geleceğe üretim tahminlerinde bulunulmuştur. Çalışmada geleceğe yönelik tahminlerde, en iyi sonucu yapay sinir ağlarının vermesi üzerine çalışmalara bu alanda devam edilmesi gerektiği önerilmektedir.

Literatürde bulunan bazı çöp gazı tahmin modelleri ve açıklamaları Çizelge 2.11'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.11 Çöp gazı tahmin modelleri [20], [23]

Model İsmi	Açıklama
Sıfırıncı Dereceden Model	0. derece kinetik, atığın ağırlığına, zamana ve metan üretim potansiyeline bağlı
EPER Almanya	0. derece kinetik, atık miktarına bağlı
SWANA	0. derece kinetik, atığın ağırlığına, zamana ve metan üretim potansiyeline bağlı
IPCC	0. derece kinetik, bozunabilir organik karbon ve depolanan atığa bağlı
TNO	0. derece kinetik, karbon içeriğine bağlı
LandGEM	0. derece kinetik, ABD'nin atık bileşime bağlı, kullanıcı dostu
Scholl Canyon	1. derece kinetik, Bekleme süresini ihmal eder
GasSIM	1. derece, çok aşamalı
Afvalzorg	1. derece, çok aşamalı, Hollanda'nın atık bileşimine bağlı, bozunma hızına göre üç atık türü
EPER Fransa	1. derece, çok aşamalı
Meksika	1. derece, çok aşamalı, bir yıl alıştırma evresi, ABD'nin atık bileşimine bağlı, yağışa bağlı olarak gaz üretimi
LFGGEN	Metanojen safhasını iki aşamada modeller, ABD'nin atık bileşime bağlı
Halvadakis	Karmaşık matematiksel model, düzenlenmesi ve kullanımı zor
Belçika Modeli	1. derece kinetik, atık miktarına, özümseyen DOC ve bozunma hızına bağlı
Palos Verdes Modeli	İki kademeli, 1. derece kinetik model
Sheldon Arleta Modeli	İki kademeli, 1. derece kinetik model
Emcon Modeli	İki kademeli, 1. derece kinetik model, atık miktarı, bileşimi ve nem içeriği, gecikme zamanı ve dönüşüm zamanına bağlı
Pasifik Gaz ve Elektik Modeli	Parabolik ve eksponansiyel model, atık miktarı, atık yüksekliği ve atığın yoğunluğuna bağlı
TNO Modeli	1. derece kinetik, Belçika modelinin değiştirilmiş versiyonu
Nümerik Modeller	Çok etkili, hassas sonuçlar, her depo sahasına uygun

ÇÖP GAZININ ENERJİYE DÖNÜŞÜMÜ VE İŞLETME PROBLEMLERİ

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, Atık Yönetimi Dairesi Başkanlığı'nın yayınladığı “Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik” (26 Mart 2010; 27533 sayılı Resmi Gazete) kapsamında depo gazlarının yönetimi aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir [16]:

“Depolama tesisinde oluşan gazların birikmesini ve toplanmasını kontrol altına almak amacıyla depo üst örtüsünün teşkili ile ilgili maddede belirtilen önlemler alınır. Depolama tesisindeki gazların toplanması, işlenmesi ve kullanılması işlemleri çevre ve insan sağlığına zarar vermeyecek şekilde yapılır.

Biyobozunur atıkları kabul eden tüm düzenli depolama tesislerinde gazlar toplanıp doğrudan veya işlenerek enerji üretiminde kullanılır. Elde edilen depo gazının, enerji üretiminde kullanılmasının ekonomik olmaması halinde depo gazı meşalelerde yakılır.”

Bu kapsamda ilgili yönetmelik çerçevesinde düzenli depolama alanlarında depo gazlarından ekonomik olması halinde enerji üretimi zorunludur.

Evsel katı atıklardan enerji üretimi ile hem doğaya salınan metan gazının yakılması sonucu küresel ısınmanın önüne geçmeye çalışılmakta, hem de üretilen ısı ya da elektrik enerjisi ile gelir elde edilerek ekonomiye katkı sağlanmaktadır. Çöp gazı miktarı ve kalitesi; atık karakteristiğine, deponun tasarımına ve işletilmesine ve meteorolojik faktörlere bağlı olarak değişir. Bu yüzden, depo alanının davranışının bilinmesi önem teşkil eder.

3.1 Çöp Gazının Özellikleri

Çöp gazının genel bileşimi Çizelge 2.6'da gösterilmişti. Farklı bir kaynakta ise çöp gazında bulunan gazlar ve genel bileşimi Çizelge 3.1'deki gibi verilmiştir. Çöp gazı içeriğinin farklılığı atık bileşimi, depolanması ve depo sahasının işletme koşullarına göre farklılık gösterebilmektedir.

Çizelge 3.1 Çöp gazı bileşimi [32]

Bileşen	Oran
Metan (CH ₄)	%40-60
Karbondiyoksit (CO ₂)	%35-45
Oksijen (O ₂)	< %1-5
Hidrojen (H ₂)	< %1-10
Azot (N ₂)	< %1-3
Su Buharı (H ₂ O)	%1-5
İz Bileşenler	< %1-3

3.1.1 Metan (CH₄)

Metan gazı doğal yollarla oluşmakla beraber, insan kaynaklı olarak doğrudan ya da dolaylı olarak üretilebilir. Metan doğal olarak; sulak alanlar, donmuş topraklar, termitler, okyanuslar, temiz su kaynakları, sulak olmayan topraklar ve doğal yangınlarla oluşabilir. ABD'de EPA tarafından insan kaynaklı metan emisyonları 1990'dan 2009'a kadar ölçülmüştür. Depo sahaları depolama alanlarından kaynaklanan metan emisyon oranı %18'e yakındır ve doğalgaz sistemleri ve bağırsak fermantasyonu sonrası en büyük üçüncü emisyon kaynağıdır [20].

Anaerobik ayrışmanın ana ürünlerinden biri olan metan gazı renksiz, kokusuz, tatsız ve suda çözünmeyen bir gazdır [32]. Havadan hafif olup depo sahası sıcaklığında yoğunluğu 0,6-0,7 kg/m³'dür ve atmosferik havanın yoğunluğunun yarısı kadardır. Bu sebeple depo sahası dışına rahatlıkla çıkabilir [20].

Metanın hava ile %5-15 aralığındaki hacimsel karışımı patlayıcıdır. Metan gazının alt patlama sınırı %5'dir. LEL seviyesinde veya üzerindeki konsantrasyonlar depo sahasına yakın yerler için tehlike oluşturur. Metan gazının bu konsantrasyona ulaşması ile depo

sahası içerisindeki oksijen bitmiş olur. Bu sebeple patlama olmaz ancak yangın riski vardır.

Metanın global ısınmaya etkisi de göz önünde bulundurulmalıdır. CO₂ ve su buharından sonra infrared ışınlarını tutan üçüncü önemli gaz CH₄'tür. CH₄'ün daha az ancak yine de önemli bir kısmı, sahanın yakınında toprak örtüsüne doğru hareket eder veya saha içerisindeki veya civardaki boşluklarda birikir.

Depo sahalarında oluşan metan gazının enerji kaynağı olarak kullanılması düşüncesi popüler durumdadır. %50 metan içeriğine sahip çöp gazı 36 MJ/m³ gibi yüksek bir enerji içeriğine sahiptir [33]. Saf metanın kalorifik değeri 9,97 kW_e/m³ olup çöp gazının kombine güç ve ısı (CHP) sistemlerinde kullanılabilmesi için çöp gazındaki metan oranı %40-45 olmalıdır [34]. %50 Metan içeren çöp gazının orta dereceli bir enerji kaynağı olduğu söylenebilir [20].

3.1.2 Karbondioksit (CO₂)

Karbondioksit solunum sisteminde oksijenin yerini alabilmesi nedeniyle, zehirli olmamasına rağmen, hayat için tehlike oluşturabilme özelliği gösterir. Depolama alanlarında yoğunluğu yaklaşık 1,8 kg/m³ civarındadır. Bu değer atmosferik havanın yoğunluğunun 1,5 katı, metan gazınıninkinin ise yaklaşık 2,8 katına eşittir. Bu sebeple CO₂ depo sahasının alt kısımlarında hareket halindedir [20].

Atmosferdeki CO₂ konsantrasyonun son yıllarda büyük ölçülerde artış göstermesi sebebiyle CO₂ emisyonları önem kazanmış ve çevresel açıdan dikkate alınmaya başlanmıştır. Küresel ölçekte 1978'den itibaren atmosferik metan ve karbondioksit konsantrasyonunun arttığı bilinmektedir.

Hidroliz/asit oluşumu fazının yanı sıra metan oluşumu sırasında oluşan karbondioksit suyun içinde çözünebilmektedir. Su ile temas halindeki CO₂'in büyük kısmı sıvı faza geçerek çözülmüş CO₂, bikarbonat (HCO₃⁻) iyonları ve karbonik asit (H₂CO₃) oluşturarak sıvının pH'ını düşürür.

3.1.3 Oksijen ve Azot (O₂ ve N₂)

Oksijen ve azot çöp gazında bulunabilen bileşiklerdir. Çöp gazı içerisindeki oksijen ve azotun toplamı çöp gazına oranı %10'un altındadır ve bunların oranı hava ile aynı olup azot oksijenden daha fazladır. Yüksek oksijen ve azot konsantrasyonları üst örtüden hava girişi olduğunu, çöp gazı toplama veya kontrolü sistemine hava girişi olduğunu veya numune alımında hava girişi olduğunu gösterir [32].

3.1.4 Hidrojen (H₂)

Hidrojen, depo sahalarında aerobik ayrışma ve anaerobik ayrışmanın ilk safhalarında üretilir. Olgun bir sahada iz konsantrasyondan fazla hidrojen konsantrasyonu sahanın olgun olmadığını veya başka bir sorunun olduğunu belirtir [32]. Bu sebeple depo sahalarının olgunluğunu belirlemede bakılabilecek bir parametredir.

3.1.5 Su Buharı

Çöp gazı su buharına doygun haldedir. Çöp gazındaki su buharı gazın depo sahasındaki suyu sürüklemesiyle gelir. Çöp gazındaki su buharı gaz kuyularında ve gaz toplama borularında yoğunlaşır. Çöp gazının yönetiminde yoğunlaşma suyunun taşınması ve bertarafı göz önünde bulundurulmalıdır [32]. Çöp gazı toplama sisteminde başarılı bir şekilde yoğunlaşma suyu tahliyesi yapılmıyorsa etkili bir şekilde çöp gazı çekimi yapılamayacaktır.

3.1.6 İz Bileşenler

Çöp gazında ayrıca miktarı genellikle %1'den az olan uçucu organik bileşikler ve diğer iz bileşikler bulunmaktadır. Çöp gazında iz bileşenlerin varlığı doğrudan depo sahasında bertaraf edilen atıklara bağlıdır. Ancak hidrojen sülfür gibi bazıları depo sahasındaki normal ayrışmadan kaynaklı oluşmaktadır [32].

Çöp gazı içerisinde 150'den fazla ppm ve ppb seviyesinde bileşikler bulunmasına rağmen tüm depo sahalarında bu bileşikler bulunmaz. Bu gazlar zararlı, toksik ve karsinogenik bileşikler olan vinil klorür, benzen, tolüen, ksilen, perkloroetilen, karbonil

sülfid, siloksan ve farklı klorlanmış ve florlanmış hidrokarbonlar içerir. Depo gazlarında bulunan diğer iz bileşikler merkaptanlar olup çöp gazına koku verirler [32].

3.2 Çöp Gazının Değerlendirilmesi ve Faydaları

Çöp gazı insan sağlığı ve güvenliği ve çevreye zararlı olmasına rağmen içerdiği metanın enerji potansiyeli sebebiyle önemli bir yakıttır. Çöp gazından enerji üreten projelerin ekonomik faydaları ile sera gazı emisyonlarına, hava kalitesinin iyileştirilmesine ve çevresel etkilerin minimize edilmesine olan etkileri oldukça önemlidir. Ayrıca, çöp gazı işletmecileri ve depo sahası etrafında yaşayanlar için yaşanabilir bir atmosfer oluşturulması açısından çöp gazının faydalı kullanımı büyük önem teşkil etmektedir [23].

Çöp gazı farklı yöntemlerle değerlendirilmekle beraber yaygın olarak dünyada ve Türkiye’de kullanılan yöntem çöp gazının elektrik enerjisine çevrilerek satılmasıdır. Çalışmanın yapıldığı Ortadoğu Enerji Odayeri Santrali’nde çöp gazı içten yanmalı gaz motorlarında yakılarak üretilen elektrik enerjisi enerji nakil hatları vasıtasıyla şehir şebekesine aktarılmaktadır.

Çöp gazı kullanmanın faydaları şunlardır [23];

- *Ekonomik faydalar:* Çöp gazının enerji dönüşümü olmaksızın yakılması veya doğrudan atmosfere salınması yerine çöp gazından elektrik üretilerek ekonomiye kazandırılmaktadır. Bu sayede karbondioksit göre 23 kat daha fazla sera etkisi yapan metanın enerjiye dönüşümü ile sera etkisi ve hava kirliliği azaltılmaktadır.
- *Sera gazı emisyonları azaltımı:* Elektrik üretim tesisleri işletme süresi boyunca saha gaz toplama verimine göre oluşan gazın %60-90’ını toplayarak enerjiye çevirmektedir. Çöp gazının enerjiye çevriminde çöp gazı, su ve karbondioksit çevrilmekte ve bu esnada elektrik ve ısı üretimi yapılmaktadır. Bu proseslerde yapılan metan giderimi ile depo sahası kaynaklı sera gazı emisyonları azaltılmakta ve emisyonları en aza indirgediği için karbon kredisi ile de maddi geri dönüş sağlanması söz konusudur.

- *Dolaylı sera gazı azaltımı:* Çöp gazı kullanılarak üretilen enerji, petrol türevi ürünler kullanılarak üretilen enerji miktarını azaltacağından, bu ürünlerden kaynaklanan emisyonlarda düşüş beklenebilir.
- *Doğrudan ve Dolaylı Olarak Diğer Kirleticilerin Emisyonlarında Azaltım:* Çöp gazının çeşitli yöntemlerle kullanılması sonucunda, depo sahasında meydana gelen fiziksel, kimyasal ve biyolojik aktiviteye bağlı olarak oluşan bileşikler daha az zararlı olan başka yan ürünlere dönüşürler. Enerji kaynağı olarak çöp gazının kullanılması durumunda, aynı miktarda enerji üretmek için petrol türevlerinin kullanılması durumuna göre daha az kirletici (kükürt dioksit, partikül madde, azot oksit türevleri) salınımı olmaktadır.
- *Diğer Çevresel Faydalar:* Çöp gazının toplanıp herhangi bir yöntem ile kullanılması, depo sahası çevresinde yaşayanların yaşam kalitesini yükseltmektedir. Depo sahası kaynaklı koku ortadan kalkmaktadır. Benzer şekilde depo sahasında oluşan gazın aktif bir şekilde çekilip kullanılması, çöp gazının depo sahası dışına sızmasına ve patlama, yanma vb. gibi etkiler göstermesine engel olur.
- *Depo Sahası İşletmecisi ve Toplum İçin Faydaları:* Depo sahasını işleten kuruluş ya da çöp gazını işletmekten sorumlu kuruluş çöp gazını elektrik motoru veya türbinlerde kullanarak enerji üretimi sağlayabilir. Üretilen elektrik tesis iç ihtiyaçlarında kullanılabilirken aynı zamanda ulusal şebekeye elektrik satışı gerçekleştirebilmektedir. Ülke politikalarına bağlı olarak yenilenebilir enerjinin diğer enerji türlerine göre daha yüksek fiyattan alış garantisinin olduğu durumlarda iç ihtiyaçların karşılanması yerine üretilen elektrik direk olarak son kullanıcıya ulaştırılmaktadır.

Depo sahasının ve elektrik üretim tesislerinin proje ve işletim safhaları uzun soluklu projelerden oluşmaktadır. Devamlı eleman ihtiyacının olması için bölgesel olarak kalkınmayı sağlayabilmektedir. Yerel yönetimler ile yapılan anlaşmalara bağlı olarak belirli sayıda personelin istihdam edilmesi, üretilen elektriğin çevre bölgelere uygun şartlarda satılması gibi imkanlar bulunmaktadır.

Çöp gazının geniş çaplı olarak uygulanmış birincil kullanım alanları şunlardır [32], [20];

- *Elektrik üretimi:* Çöp gazının içten yanmalı motor, gaz türbinlerinde veya buhar türbinlerinde yakıt olarak kullanılması ile yerinde elektrik üretimi yapılabilir. Elektrik enerjisi üretim tesislerinde çöp gazının arıtımı filtrasyon ve mekanik susuzlaştırma sistemlerini içerir. Ancak bazı bölgelerde temiz gazın korozyonu azaltması ve ekipmanların ömrünü uzatması sebebiyle bakım masrafını düşürmesi sonucu H₂S ve/veya siloksan arıtım sistemleri yaygınlaşmaktadır.
- *Doğrudan Kullanım:* Çöp gazı oluştuktan sonra doğrudan son tüketiciye ulaştırılarak yakılmasıyla ısınma amaçlı, buhar kazanında, sanayide yakma amacıyla ya da farklı amaçlarla kullanılabilir. Bu uygulamada çöp gazına çok fazla işlem yapılmadan yakındaki son tüketiciye boru hattıyla ulaştırılır. Bu işlemler gazın ham hali ile neminin alınıp siloksan ve H₂S giderimi ve/veya metanojenik olmayan organik bileşenlerin giderilmesine kadar farklılık gösterebilir. Bu aşamalar çöp gazının doğalgaza dönüşümünde uygulanan ön arıtma prosesleridir.
- *Isı ve Güç Amaçlı Kullanım:* Çöp gazı bazı durumlarda kombine şekilde yakıt kaynağı olarak kullanılabilir. Bu, ayrı ayrı ısı ya da güç amaçlı kullanımdan daha verimlidir. Özellikle çöp gazına yakın olan alanlarda ya da son kullanıcının hem elektrik hem de atık ısı ürettiği durumlar için oldukça verimli kullanılmaktadır.
- *Doğalgaz Kalitesinde Gaz:* Çöp gazının doğalgaz kalitesine dönüşümü tüm nemin, iz organik bileşiklerin, karbondioksitin ve havanın giderildiği kapsamlı bir süreçtir. Bunun sonucunda saf metan ile iyi bir kalorifik değer elde edilir.

Çöp gazından doğalgaz üretimi iki aşamada yapılır. İlk aşama bir ön arıtma olup nem ve iz bileşenler soğutma, kurutma, filtrasyon, adsorpsiyon ve diğer prosesler ile giderilir. İkinci aşama ise petrol endüstrisinde kullanılan birçok prosesler ile karbondioksitin ayrılmasıdır.
- *Diğer Potansiyel Uygulamalar:* Saflaştırılan çöpp gazı 3000 psi basınç ile sıkıştırılmış doğalgaza (CNG) dönüştürülebilir. Saflaştırılan çöp gazı ayrıca soğutularak (yaklaşık -260 °F) ve sıkıştırılarak sıvı doğalgaza (LNG) dönüştürülebilir. Ayrıca çöp gazı

metanole çevrilebileceği gibi çöp gazından ayrılan CO₂ kimyasal hammadde olarak kullanılabilir.

Çöp gazının kullanım alanları Çizelge 3.2’de özetlenmiştir.

Çizelge 3.2 Çöp gazının kullanım alanları [20]

Kullanım Alanı	Uygulama Örneği
Doğrudan ısınma amaçlı kullanım	Sanayide buhar kazanında
	Isıtma ve soğutma amaçlı
	Sanayide ısıtma/yakma amaçlı
Elektrik üretim amaçlı kullanım	İçten yanmalı motorlarla
	Gaz/buhar türbinlerinde işlenerek
	Yakıt pillerinde işlenerek
Kimya sektöründe hammadde olarak kullanımı	Metanole çevrilerek
	Dizel yakıtı çevrilerek (araçlarda)
Doğalgaza çevirerek kullanımı	Araçlarda
	Doğalgaz şebekesine aktarma
Çevrenin korunmasında	Sızıntı suyunun buharlaştırılmasında
Yakma bacasında ısı elde edilmesi	ORC ile, propan türbini
	SCE ile, yüksek verimli enerji

3.3 Çöp Gazından Elektrik Enerjisi Üretimi

Çöp gazından enerji üretim projesinin amacı çöp gazını yakıt olarak kullanarak yararlı enerji formlarına dönüştürmektir. Enerji piyasasının varlığı, proje maliyetleri, potansiyel gelir kaynakları ve diğer teknik hususlar gibi faktörler çöp gazından enerji üretim projelerinden en uygun olanının belirlenmesine karar verilmesini sağlar [35]. Çöp gazından enerji elde edilebilen teknolojiler şu sıralamada incelenebilir;

1. Doğrudan gaz kullanımı,
2. Elektrik üretimi,
3. Gelişmekte olan teknolojiler.

3.3.1 Doğrudan Gaz Kullanımı

Çöp gazının en sık ve en maliyet-etkili kullanımı doğrudan gaz kullanımıdır. Böyle bir projede çöp gazı boyler veya endüstriyel proseste (Kurutma işlemleri, fırın işlemleri, çimento, sera ısıtılması ve asfalt üretimi) kullanılır. Bu projelerde çöp gazı toplandıktan sonra boru hatlarıyla doğrudan müşteriye pompalanır. Bu projelerde çöp gazının iyileştirilmesi hususunda sadece nem ve partikül giderimi yeterlidir.

Amerika’da çöp gazından enerji üretim projelerinin %30’u doğrudan gaz kullanımı şeklinde işletilmektedir [35]. Bu projelerde gaz hattı uzunluğu 8 km’e kadar olan boru hatları ekonomik olarak uygun olup daha uzun olan mesafelerde çöp gazı miktarı, müşterinin gaz ihtiyacı ve çöp gazının fiyatı önem kazanmaktadır [28].

Doğrudan gaz kullanımına olanak sağlayan sistemler şunlardır [28];

- *Boiler:* Çöp gazını yakıt olarak kullanarak buhar veya sıcak su üretilir. Boylerde üretilen buhar yerden ısıtma, proses ısıtması veya buhar türbini ile elektrik üretimi için kullanılabilir. Geleneksel boilerde çöp gazı kullanımına revize edilmesi gerekmektedir. Çöp gazı miktarı ve gerekli buhar ihtiyacı boyler kapasitesinin belirlenmesi için gereklidir.
- *Fırınlar ve Kurutucular:* Çöp gazı bu sistemlerde yakıt veya ek yakıt olarak çimento, tuğla, seramik, demir ve çelik, ağaç ürünleri üretimi ve diğer sektörlerde kullanılabilir. Küçük kapasiteli uygulamalarda çöp gazı yeterli gelirken büyük kapasiteli uygulamalarda tek başına çöp gazı yeterli gelmeyeceği için ek yakıt olarak kullanılmaktadır. Çöp gazının ek yakıt olarak kullanımı ile ekonomik kazanç sağlanmaktadır. Çöp gazından nem ve partikül giderimi yeterli bu işlem için yeterlidir. Ancak çöp gazındaki iz bileşenlerin çevresel açıdan zararlı olmaması ve parçalanması için çöp gazını yakan ekipmanın uygun bekletme süresine ve sıcaklığa sahip olması gerekmektedir. Bazı belediyeler atık su arıtma tesislerinde çamur bertarafı için çöp gazı kullanabilmektedir.
- *Infrared Isıtıcılar:* Yurtdışındaki bazı depo sahalarında tesis içinin ısıtılmasında kullanılmaktadır. Yüksek yoğunluklu ısı enerjisi üreten bu sistemler büyük alanların

ısıtılmasında %93'e varan verimlere ulaşmıştır. Küçük kapasiteli olduğundan gaz arıtımına ihtiyaç duymamaktadır.

- *Sızıntı Suyu Evaporasyonu:* Çöp gazı sızıntı suyunun evaporasyonunda doğrudan kullanılabilir. Sızıntı suyu bu sayede daha konsantre ve küçük hacime düşürülerek bertarafı kolaylaştırılır. Sızıntı suyu bertarafının olmadığı veya pahalı olduğu veya yüksek hacimlerde sızıntı suyu oluşumu olan tesislerde iyi bir opsiyondur. Ancak sızıntı suyunun evaporasyonunda oluşan yan ürünler (konsantre sıvı veya tuzlar) güvenli bir şekilde bertaraf edilmelidir. Doğrudan sızıntı suyu deşarjlı evaporatörler düşük miktarda çöp gazı (330 m³/saat çöp gazı ile 1670 L sızıntı suyu evaporasyonu) kullanırlar. Ticari olarak sprey tipi kurutucular, doğrudan enjeksiyonlu cihazlar ve en çok kullanılan evaporasyon tankları olmak üzere üç farklı sızıntı suyu evaporasyon sistemi vardır. En çok rastlanılan ticari sistem doğrudan temaslı evaporasyon teknolojisi olup sıcak yanma gazı ile sızıntı suyu direk temas ederek ısı alışverişi yaparlar.

3.3.2 Elektrik Üretim Teknolojileri

Çöp gazının içten yanmalı motorlarda, gaz türbininde veya mikrotürbinlerde yakılması ile elektrik üretilir. Bu uygulama çöp gazının en yaygın kullanımı olup üretilen elektrik enerjisi bir kuruma ve/veya yakındaki bir güç müşterisine satılır. Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere birçok zararı bulunan çöp gazı faydalı bir son ürüne dönüştürülmüş olur.

Elektrik üretmek için bir diğer alternatif ise kojenerasyon sistemleridir. Kojenerasyon sistemleri çöp gazından elektrik üretirken aynı zamanda oluşan atık ısıyı kullanarak (buhar ve sıcak su üretimi) verimliliği arttırmaktadır. Çöp gazından enerji üretim projelerinde kojenerasyon sistemleri kullanılmasıyla oluşan termal enerji ısıtma, soğutma ve proses ihtiyaçları için kullanılabilir veya ikinci bir gelir sağlanması amacıyla en yakın işletmeye veya endüstriye verilebilir.

3.3.2.1 İçten Yanmalı Motor

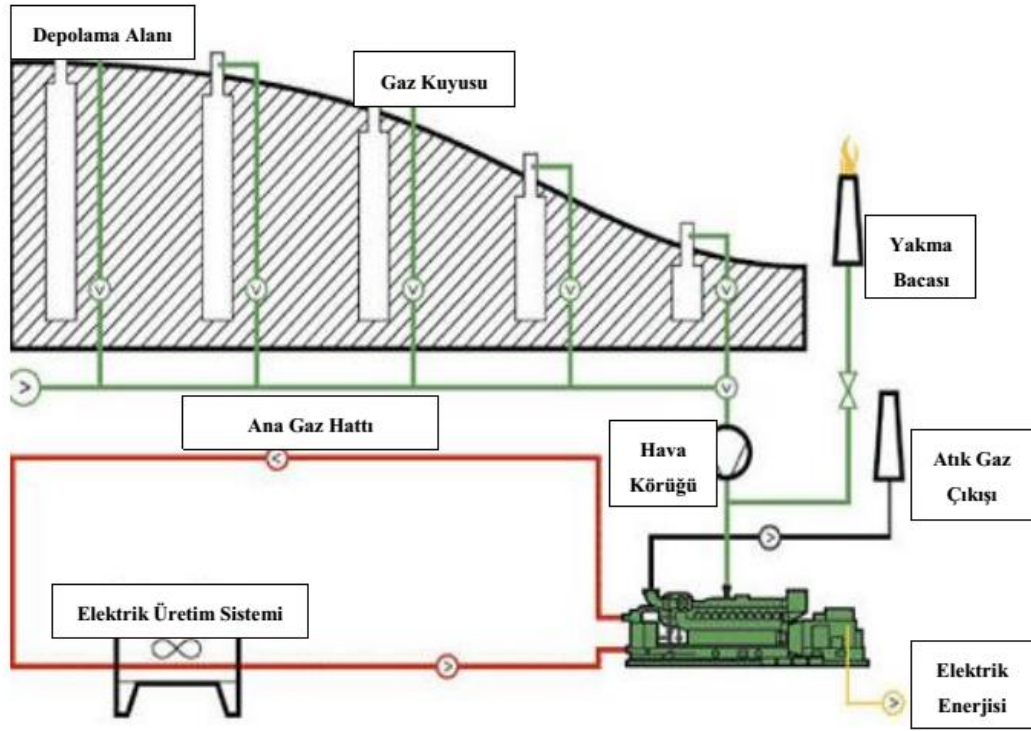
İçten yanmalı motorlar küçük büyük birçok çöp gazından enerji üretim projesinde en yaygın olarak kullanılan teknolojidir. Diğer teknolojilere nazaran daha düşük maliyetli oluşu, yüksek verimi ve birçok depolama alanının gaz çıkışıyla boyut olarak iyi uyumu en çok kullanılan teknoloji olmasını sağlamıştır [31]. 0,2-3 MW aralığında değişken elektrik çıkış güçlerinde içten yanmalı motorlar bulunmaktadır. 1 MW elektrik üretmek için %50 metan konsantrasyonunda 500-540 m³/saat çöp gazı gereklidir [28].

öp gazını yakıt olarak kullanan içten yanmalı motorlar ticari olarak bulunabilir ve modüler üniteler veya komple paralel jeneratör sistemi şeklinde elde edilebilir. Sıklıkla konteyner sistemleri bir seri halinde kurularak gaz debisinde değişme olmasına göre motor eklemesi veya çıkarılması yapılabilir. Birçok üretici motorlarını çöp gazı ve diğer biyogazlara uyum olarak dizayn etmiştir ve bunun örnekleri mevcuttur [28].

İçten yanmalı motorların tipik olarak diğer çevrim teknolojilerinden daha yüksek oranlarda NO_x emisyonları vardır. Bu nedenle bazı yerlerde, çeşitli içten yanmalı motorlar kullanan bir proje için izin almak güç olabilir. Bu probleme işaret etmek için, motor imalatçıları, gelişmiş yakma ve diğer hava emisyon kontrol özelliklerini kullanarak daha az NO_x üreten motorlar geliştirmektedirler. Bu gelişmeler, tesis tasarımcılarına büyük projelerde içten yanmalı motorlarını kullanmak için daha fazla esneklik sağlayacaklardır [31].

İçten yanmalı motorlar kullanan çöp gazı enerji projeleri için başlangıç montaj maliyetinin 1100-1300 \$/net kW çıkış arasında değiştii tahmin edilmektedir. Bu maliyetler 1-10 milyon ton atık hacmine sahip depolama alanlarındaki güç projelerinin göstergeleridir, maliyetler motoru, ilave ekipmanı, iç bağlantıları, gaz kompresörünü, inşaatını ve mühendisliği de içermektedir [31].

Depo sahasında üretilen gaz, dikey ve/veya yatay gaz toplama kuyuları ile toplanarak hava körüğü (blower) yardımıyla elektrik üretim sistemine ve/veya yakma bacasına gönderilir. Üretilen elektrik, elektrik dağıtım hattına verilir ve atık gaz atmosfere salınır. Şekil 3.1’de bir depo sahasında çöp gazından enerji eldesi aşamaları görselleştirilmiştir.



Şekil 3.1 Bir depo sahasında enerji eldesinin aşamaları [20]

3.3.2.2 Gaz Türbini

Büyük bir çöp gazından enerji üretim teknolojisi örneği gaz türbinidir. Çöp gazının kullanıldığı gaz türbinleri yakıt ayar vanaları ve enjektörler haricinde doğalgaz ile çalışanlarla aynıdır. Depo sahalarında kullanılan gaz türbinlerinin çoğunluğu basit çevrim ve tek şaftlı makinelerdir. Gaz türbinleri genel olarak içten yanmalı motorlardan daha büyüktür ve 1-10 MW aralığında değişen boyutlarda bulunmaktadır. Küçük gaz türbinleri veya mikrotürbinler (1 MW) depo sahalarında kullanılmasına rağmen normalde birincil üretim birimleri değildir. Amerika’da çöp gazından enerji projelerinde en çok kullanılan türbinler 3-5 MW aralığındaki kapasitede olup 2000 m³/saat’in üzerinde çöp gazına ihtiyaç duyarlar. Gaz türbinleri modüler ve paketlenmiş sistemler olarak mevcuttur. Modüler sistemler çöp gazındaki kalite ve debi değişimlerine esneklik sağlar [28].

Gaz türbinleri yüksek basınçta (165-200 psig) yakıt beslemesi gerektirir. Bu basıncın sağlanması için harcanacak enerji üretilen enerjinin önemli kısmını tüketmektedir. Bu durumda düşük enerji dönüşüm verimliliğine neden olur [28].

Gaz türbinlerinde üretim kapasitesinin kW başına maliyeti yanma türbini boyutu arttıkça düşer ve aynı zamanda elektrik üretim verimi genellikle artmaktadır. Çöp gazı projelerine uygulanabilen basit-döngü yanma türbinleri, tam yüklemde %20–28 verime ulaşırlar. İlave elektrik üretmek için yanma türbini egzozundaki atık ısıyı geri kazanan kombine döngü konfigürasyonları, sistem verimini %40 oranında artırabilir [31].

Gaz türbinlerinin emisyonları içten yanmalı motorlara göre düşük olup pistonlu gaz motoruna göre hem daha yüksek yatırım masrafı ister hem de daha düşük enerji dönüşüm verimi sağlar. Gaz türbinleri, içten yanmalı motorlarla kıyaslandığında daha iç içe geçmiş yapıda, düşük işletim ve bakım maliyetine sahiptir [31]. Gaz türbinleri ileri derecede çöp gaz arıtımı gerektirir ve bu da proje maliyetini arttırır.

Basit döngü yanma türbinleri kullanan çöp gazı enerji kazanım projelerinin başlangıç montaj maliyetlerinin, 1-10 milyon ton atık hacmine sahip depolama alanlarındaki güç projeleri için sırayla 1200-1700 \$/kW çıkış olduğu, tahmin edilmektedir. Maliyetlere, yanma türbinleri, yedek ekipman, iç bağlantılar, gaz kompresörü, inşaat, mühendislik harcamaları da dahil çöp gazı toplama sistemi hariçtir [31].

5-10 milyon ton atık hacmine sahip depolama alanlarına inşa edilmiş kombine-döngü sistemleri için, başlangıç montaj maliyetleri 1400-1700 \$/kW çıkış aralığında değişmektedir. 5 milyon ton atıktan az atık içeren depolama alanlarında, kombine döngü sistemleri ekonomik olarak rekabet edebilir nitelikte değildir [31].

3.3.2.3 Kojenerasyon

Bütünleşik ısı ve güç sistemleri (CHP) elektrik üretmek için hem gaz türbini, hem de buhar türbini kullanır ve verimli bir enerji dönüşüm sistemi elde eder. Gaz türbini ile buhar kazanı ısıtılırken, atık ısı, buhar kazanına buhar türbinini çalıştırması için geri devrettirilir. Atık ısının kullanılmasıyla gereken çöp gazı ihtiyacı azalır ve verimli bir enerji dönüşümü sağlanır. Gerekli çöp gazı bakımından oldukça verimli olan CHP sistemleri dikkatli işletme gerektirir [20].

Çöp gazından elektrik üretim projelerinde üretilen termal enerji yerinde ısıtma, soğutma veya proses ihtiyaçları için veya yakındaki endüstriyel veya ticari kullanıcılara

ikinci bir gelir elde etmek amacıyla pompalanabilir. CHP sistemleri depo sahasına yakın kullanıcılar veya kullanıcıların hem elektrik hem de atık ısıya ihtiyaç duyduğu durumlarda genellikle daha iyi bir ekonomik opsiyondur [28].

Birim faydalı enerji üretimine düşen yanma ürünü emisyon miktarı, diğer yöntemlerin emisyon miktarına göre oldukça düşüktür. Dünya çapında düşünüldüğünde global kirlenmeye karşı en etkin yöntemlerden biridir [31].

3.3.3 Gelişen Teknolojiler

Çöp gazından enerji geri kazanımında doğrudan kullanım ve elektrik üretim teknolojileri dışında gelişen teknolojiler de bulunmaktadır. Bu teknolojiler geniş çaplı kullanılmamasına rağmen belirli koşullar altında teknik ve ekonomik olarak uygulanabilir. Bu uygulamalar çöp gazının doğalgaza dönüşümü (doğalgaz CNG, LNG), metanol üretimi ve karbon dioksit üretimi gibi uygulamalardır. Uygulamalar sınırlı olup proje bazında değerlendirilmelidir.

3.3.3.1 Çöp Gazından Yüksek Kalitede Gaz Üretimi

Çöp gazı saflaştırılarak boru hattı kalitesinde gaz (doğalgaz), sıkıştırılmış doğal gaz (CNG) veya sıvılaştırılmış doğalgaz (LNG) üretilir. Boru hattı kalitesinde gaz doğalgaz hatlarına basılabilir ve endüstriyel amaçlarla kullanılabilir. CNG ve LNG depo sahasındaki araçlarda veya bu yakıtla çalışan araçlarda yakıt olarak kullanılabilir [28].

Çöp gazından üretilen gaz yakıtlarda belirli standartların sağlanması gereklidir. Bu standartların sağlanması için metan içeriğinin artırıldığı, karbondioksit, azot, oksijen ve nem içeriğinin azaltıldığı ileri seviyede çöp gazı arıtımı gereklidir. Güncel gaz arıtma teknolojileri pahalı olup bu teknolojiler ekstra gaz kompresörlerinin kurulumunu gerektirmekte ve bu sistemlerin işletme ve bakımı karmaşıktır. Bu projeler genelde yüksek miktarda CNG veya LNG talebi olan büyük depo sahalarında uygulanmaktadır. Amerika'da diğer ülkelere göre daha fazla uygulanan sistemde çöp gazı toplama sisteminin iyi bir şekilde yönetilip gaz toplama sistemine oksijen ve azot girişi kuyuların vakumları veya arazideki çatlakların onarılmasıyla minimize edilmektedir [28].

3.4 Çöp Gazının Ön Arıtımı ve İşletme Problemleri

Ham çöp gazı kullanılmadan önce gazın kullanılacağı sisteme göre bazı işlemlerden geçmesi gerekmektedir. Ön arıtım gerektiren çöp gazı bileşenleri şunlardır [36];

- Serbest nem/su buharı,
- Partiküller,
- Hidrojen sülfür,
- Siloksanlar,
- Halojenlenmiş organik karbonlar,
- Karbondioksit.

Çöp gazının arıtımı gazın bileşenlerine, iz bileşenlerin seviyelerine, kullanılan sistemin türüne göre ve bu bileşenlerin işletme ve bakım masraflarına etkisine göre belirlenir. Bu amaçla gazın içerisindeki bileşenlerin belirlenmesi ve enerji dönüşüm sisteminin hassasiyeti ile karşılaştırılması gereklidir.

Çöp gazının kullanıldığı enerj dönüşüm sistemlerinin gazı kullanma şekillerinin farklılığına göre istemiş olduğu gaz karakteri de farklıdır. Bu nedenle herbir enerji çevrim sistemi (gaz motorları, türbin vb.) için gaz içinde müsaade edilebilir kirletici sınır değerleri farklı olup bu değerler üretici firmalar tarafından verilmektedir.

Biyogaz veya çöp gazının değerlendirildiği sistemlerin türlerine göre gaz şartlandırma sistemlerin istediği gaz karakteri gereksinimleri Çizelge 3.3.'de gösterilmiştir.

Biyogaz ve çöp gazından enerji üretiminde önemli yere sahip olan Caterpillar, Waukesha, Jenbacher ve Deutz firmalarından satın alınan motorların garanti kapsamında tarafından verilen müsaade edilebilir iz kirletici konsantrasyonları bilgileri Çizelge 3.4 ve 3.5'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.3 Biyogaz değerlendirme teknikleri ve gaz şartlandırma gereksinimleri [1]

Teknoloji	Önerilen Gaz Şartlandırma Gereksinimleri
Isıtma (Boiler)	H ₂ S < 1000 ppm, 0,8-2,5 kPa basınç, kondensat giderimi (mutfak ocakları: H ₂ S < 10 ppm)
İçten Yanmalı Motorlar	H ₂ S < 100 ppm, 0,8-2,5 kPa basınç, kondensat giderimi, siloksan giderimi (Otto cycle motorlar H ₂ S'e dizel motordan daha duyarlıdır)
Mikrotürbinler	70000 ppm'e varan H ₂ S toleransı, > 350 BTU/scf, 520 kPa basınç, nem giderimi, siloksan giderimi
Yakıt Hücreleri	PEM (Proton değişim membranı); CO < 10 ppm, H ₂ S giderimi
	PAFC (Fosforik asit yakıt hücresi); H ₂ S < 20 ppm, CO < 10 ppm, halojenler < 4 ppm
	MCFC (Eriyik karbon yakıt hücresi); H ₂ S < 10 ppm, halojen < 1 ppm
	SOFC (Katı oksit yakıt hücresi); H ₂ S < 1 ppm, halojenler < 1 ppm
Stirling Motorları	Boiler ile aynı H ₂ S, 1-14 kPa basınç
Doğal Gaza Yükseltme	H ₂ S < 4 ppm, CH ₄ > %95, CO ₂ < %2, H ₂ O < 1*10 ⁻⁴ kg/MMscf, siloksan ve partikül giderimi, > 3000 kPa basınç

Çizelge 3.4 Bazı motor üreticilerinin iz kirletici limit değerleri [37]

Bileşen	Üretici Firma	
	Caterpillar	Waukesha
Toplam S içeriği	< 2140 mg H ₂ S/Nm ³ CH ₄ ¹	< 715 mg/Nm ³ CH ₄ (Toplam S)
H ₂ S içeriği	-	-
Toplam Cl içeriği	Cl ve F toplamına bakınız	Cl ve F toplamına bakınız
Toplam F içeriği	Cl ve F toplamına bakınız	Cl ve F toplamına bakınız
Cl ve F toplamı	< 713 mg Cl/Nm ³ CH ₄ ¹	< 300 mg Cl/Nm ³ CH ₄
Silisyum (Si)	< 21 mg/Nm ³ CH ₄ ¹	< 50 mg/Nm ³ CH ₄ (Toplam siloksan)
Toz	< 30 mg/Nm ³ CH ₄ (partikül < 1 µm) ¹	> 0,3 µm partiküller giderilmeli

1 Üretici değerleri mg/MJ olarak vermiş olup çöp gazının kalorifik değeri 37,5 MJ/Nm³ alınarak mg/Nm³ cinsinden hesaplanmıştır.

Çizelge 3.5 Bazı motor üreticilerinin iz kirletici limit değerleri [37]

Bileşen	Üretici Firma	
	Jenbacher	Deutz
Toplam S içeriği	Katalizli; 2000 mg/Nm ³ CH ₄ Katalizsiz; 1150 mg/Nm ³ CH ₄ Toplam S H ₂ S cinsindendir	<2200 mg/Nm ³ CH ₄
H ₂ S içeriği	-	< %0,15 (v/v)
Toplam Cl içeriği	Cl ve F toplamına bakınız	<100 mg/Nm ³ CH ₄
Toplam F içeriği	Cl ve F toplamına bakınız	<50 mg/Nm ³ CH ₄
Cl ve F toplamı	Katalizsiz: <100 mg/Nm ³ CH ₄ (Garanti kapsamı dışında bir parça Cl iki parça F'un ağırlığından oluşur); Garanti kapsamında; 100-400 mg/Nm ³ CH ₄ Garantisiz; >400 mg/Nm ³ CH ₄ Kataliz ile: 0 mg/Nm ³ CH ₄	<100 mg/Nm ³ CH ₄
Silisyum (Si)	Eski Standart Katalizsiz: Garanti kapsamı dışında; <20 mg/Nm ³ CH ₄ Garanti kapsamında; >20 mg/Nm ³ CH ₄ Yeni standart: Katalizsiz ¹ Kataliz ile (eski ve yeni standart) 0 mg/Nm ³ CH ₄	<10 mg/Nm ³ CH ₄
Toz	<50 mg/Nm ³ CH ₄ (partikül <3 µm)	<10 mg/Nm ³ CH ₄ (partikül <3-10 µm)

¹ Rölatif limit değer<0,02 olmalıdır ve şu şekilde hesaplanır (katalizsiz);

Rölatif limit değer= [(motor yağındaki Si, mg/kg)* (Toplam yağ hacmi, L)]/[(motor gücü, kW)*(Yağın kullanım süresi)]

Ön arıtma prosesleri iki gruba ayrılabilir;

Birincil ön arıtma: Bu ön arıtma türünde susuzlaştırma ve partikül giderimi amaçlanmaktadır. Çoğu çöp gazından enerji üretim projesinde minimum nem ve

partikül giderimi yapılmaktadır. Birincil çöp gazı arıtma teknolojileri nem ve partikül giderimi yapan fiziksel proseslere dayalıdır [36].

İkincil ön arıtma: Çöp gazından hidrojen sülfür, siloksanlar, halojenlenmiş hidrokarbonlar ve karbondioksit ayrımı daha ileri arıtma teknolojileri gerektirir. Çöp gazının ikincil arıtmasında hidrojen sülfür, siloksanlar, halojenlenmiş organik bileşikler ve karbon dioksitin gideriminin yapılması zorunlu olabilir [36].

Bazı durumlarda depolanan atığın kompozisyonu çöp gazının bileşimine etki etmektedir. Bunlara örnek olarak şunlar verilebilir [36];

- Kireç içeren atıkların depolanması sonrasında depo gövdesinin de ıslak olması sebebiyle yüksek seviyelerde hidrojen sülfür üretebilir.
- Depo sahasında depolanan kompost içerdiği yüksek organik yük sebebiyle 10000 ppm'e varan yüksek miktarda hidrojen sülfür üretilmesine sebep olabilir.
- Çöp gazındaki siloksanlar kozmetik malzemelerin kalıntıları ve atık su arıtma çamurlarından kaynaklanmaktadır. Çöp gazındaki siloksan konsantrasyonları 0,5-15 mg/m³ arasında değişebilmektedir.
- Halojenli organik bileşikler genelde sorun oluşturmaz konsantrasyonlarda olmazlar ve genelde 100 mg/m³'ün altında bulunurlar.

Depo sahasında depolanan atığın bileşiminin farklı olması sebebiyle enerji çevrim yöntemine göre uygun ön arıtmanın seçimi çöp gazındaki iz bileşenlerin belirlenmesine ve seviyelerine bağlıdır. Literatürde bulunan veriler potansiyel iz kirleticilerin belirlenmesinde faydalı olup enerji çevrim sistemi göz önünde bulundurularak projeye özel testler ile kirleticilerin seviyeleri belirlenmelidir [36].

3.4.1 Nem Giderimi

Çöp gazındaki nem gazın kalorifik değerini düşürerek enerji çevrim sisteminin performansının düşmesine ve çöp gazındaki iz bileşiklerle tepkimeye girerek korozyon etki gösteren formların oluşmasına sebep olmaktadır. Nem birikimi ortam sıcaklığına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Gaz borularında biriken nem, boruların kısmen veya tamamen kapanmasına neden olabilir.

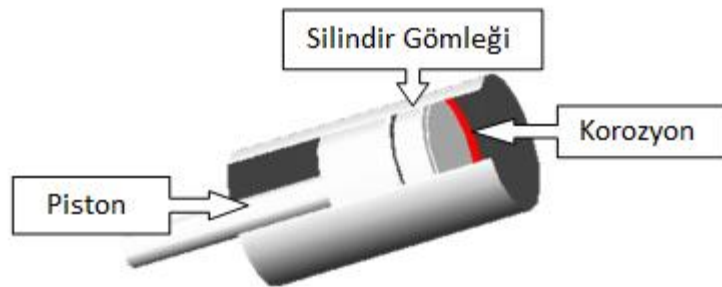
Gaz borularında biriken nem hatta uygun bir eğim verilerek ve hattın en düşük kotuna su toplama tankı konularak gaz-su ayrımı yapılabilir. Bunun dışında çöp gazı eşanjör veya soğutma sistemleri ile soğutularak nemin giderimi yapılabilir.

Toz ve partikül madde de sistem performansını etkileyebilir. Partiküllerin aşındırıcı etkisiyle boru ve ekipmanlarda yıpranma meydana gelebilir. Nem arıtma ünitesinden sonra basit bir filtre ile bu sorunun da üstesinden gelinir [20].

3.4.2 Kükürtlü Bileşikler

Çöp gazında bulunan su buharı ile bir araya geldiğinde aşırı korozyon olan sülfürik asit oluşur. Oluşan bu asit çöp gazının değerlendirildiği enerji çevrim ünitelerinde, enerji çevrim ünitelerinin öncesinde ve sonrasında bulunan yapı parçalarına (borular, arıtma ünitesi vd.) zarar verirler.

Sülfürik asit motor parçalarında hasara ve pistonlar halkalarında ve silindir gömleklerinde aşırı aşınmaya yol açmaktadır (Şekil 3.2). Ayrıca sülfürik asidin motor yağını oksitlemesine sebep olarak yağ değişimlerinin sıklaşmasına ve bakım maliyetlerinin artmasına sebep olmaktadır [36].



Şekil 3.2 Silindir gömleğinde korozyonun oluşma yeri [38]

Tüm ekipmanların zarar görmesine sebep olan sülfürik asit enerji çevrim ünitesinin hassasiyetine göre belirli bir miktara kadar tolere edilebilmektedir. Örneğin içten yanmalı motorlar 100 ppm'in altındaki hidrojen sülfür konsantrasyonlarında iyi çalışırken boilerde bu değer 1000 ppm'e kadar çıkabilmektedir. İçten yanmalı motorlarda hidrojen sülfürün etkisi motor yağının sık değiştirilmesi ile minimize edilebilir. Hidrojen sülfürden kaynaklı korozyon enerji çevrim sisteminin pahalı ekipmanlarında normal ömründen kısa sürede tahrip olmasına sebep olmaktadır [34].

Hidrojen sülfür ve oksijen metallerle birlikte stabil korozyon bileşikleri oluştururlar. Metallerin yüzeyinde oluşan damlacıkların reaksiyonları şu şekildedir [36];



Korozyon metanın yakılması sırasında oluşmaktadır. Standart koşullarda 1 L metanın yakılması sonucu 1,4 mL su ve 0,9 L karbondioksit oluşmaktadır [38].



Yanma sonucu oluşan su bir elektrolit olup oksijen korozyondaki oksitleyicidir. Karbondioksit ise elektrolit çözeltisini asitleştirerek metalin çözünmesini arttırmakta ve korozyonun artmasına sebep olmaktadır [38].

Ortamda oksijen olmasa bile biyogaz metali oksitler. Hidrojen sülfürün kendisi elektrolit olarak davranır ve metal yüzeye absorbe olarak korozyonu oluşturur. Hidrojen sülfür konsantrasyonu düşük olursa korozyon yavaş olur ancak karbondioksitin varlığından dolayı oluşmaya devam eder [38].

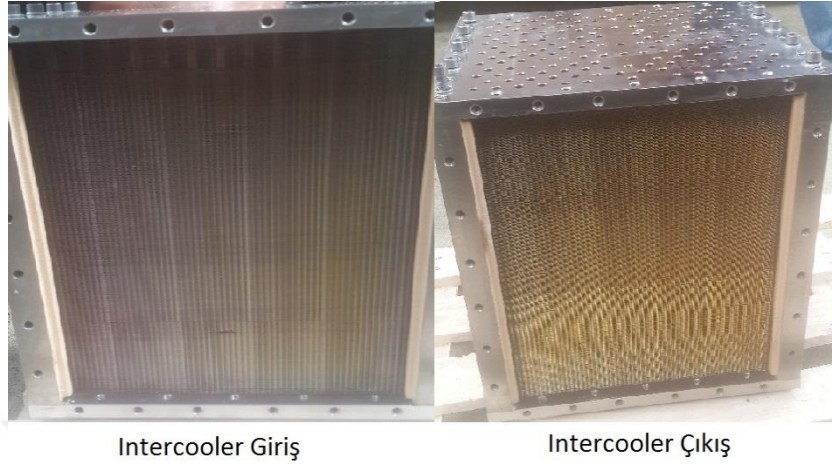


Eğer H_2S konsantrasyonu 100 ppm'in üzerinde olursa Şekil 3.3'de gösterilen çukurlu korozyon ile tanınan korozyon oluşmaktadır.

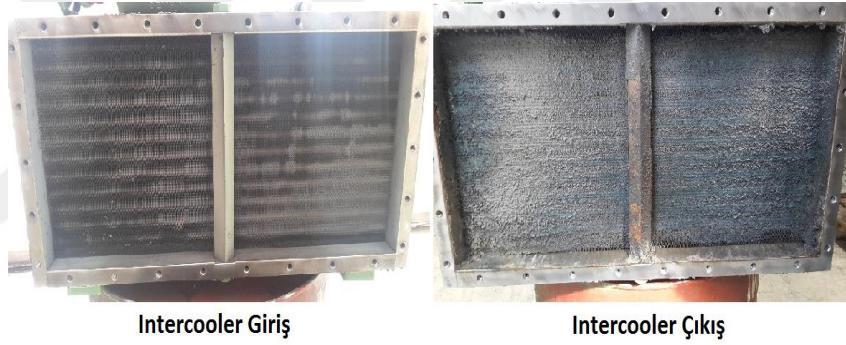


Şekil 3.3 Anoksik korozyon [38]

Şekil 3.4, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da Odayeri santralinde içten yanmalı gaz motorlarında kullanılan intercoolerların durumu gösterilmiştir. Intercooler motorda gaz ve hava karışımının soğutulduğu kısımdır.



Şekil 3.4 Kullanılmamış intercooler örneği



Şekil 3.5 Kullanılmış intercooler örneği

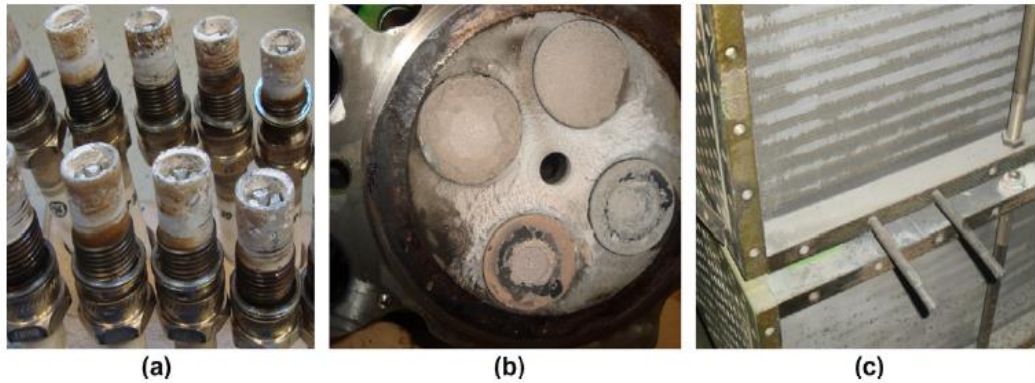


Şekil 3.6 Kullanılmış intercooler örneği

Gazdaki hidrojen sülfür sülfürik aside dönüşerek intercoolerlarda tıkanmaya ve peteklerin korozyona uğramasına sebep olmaktadır. İlgili parçalar temizlenmek için çıkarıldığında petekler temizleme sırasında deformasyona uğramakta ve mukavemetini kaybetmektedir. Aşırı yıpranmış olan intercooler petekleri kırılabilmektedir. Ayrıca intercooler petekleri metalle kaplanmış olup hidrojen sülfürün etkisiyle beraber bu kaplama erimekte, yakıt karışımının (gaz ve hava) motor içinde dolaşması sonucu dolaştığı yerlerde bu metallere rastlanabilmekte ve bu metaller motor yağında birikebilmektedir. Motor yağında biriken bu metaller motor yağının özelliğini yitirmesine sebep olmaktadır.

3.4.3 Siloksanlar

Depo sahasındaki kozmetik atıkların kalıntılarından ve atık su arıtma çamurundan kaynaklanan siloksanların çöp gazındaki siloksan konsantrasyonları $0,5-15 \text{ mg/m}^3$ arasında değişmektedir. Çöp gazının enerji çevrim sisteminde yakılması ile siloksanlar aşındırıcı özellikte olan silikon dioksitlere dönüşmektedir [20]. Kristal yapıdaki silikon dioksitler cam ile benzer fiziksel özelliklere sahiptir. Silikon dioksitler motorun iç yüzeylerine (eşanjör, piston, türbin vd.) yapışarak motorun ömrünü kısaltır ve motor yağında birikir. Birikintiler aşınmayı artırır ve enerji çevrim sisteminin ömrünü kısaltır. Ayrıca siloksan birikimi termal izolatör görevi görerek hassas motor parçalarının aşırı ısınmasına katkıda bulunur. Motor iç yüzeylerinde birikintiler olması sonucu motor parçaları sökölür ve piston, silindir kafaları ve valfler gibi motor parçalarındaki temizlenir [36]. Şekil 3.7’de motor parçalarında tortu birikmesi gösterilmiştir.



Şekil 3.7 Motor parçalarında tortu birikmesi (a) buji, (b) motor kapağı, (c) intercooler radyatörü [39]

Birçok durumda siloksan ile ilgili birikintiler artan bakım ve motor içi yönetim stratejileri ile ekonomik olarak yönetilebilir. Siloksanın motor içi yüzeylerde birikmeden arıtılması bakım maliyetlerini düşürebilir. Ancak çoğu durumda siloksan arıtımı maliyetli bir yöntemdir [36].

Motor üretici şirketler siloksanla alakalı ekipman arızalarına karşı siloksan limitlerini belirlemişlerdir. Bazı motor üreticilerinin verdiği siloksan limitleri Çizelge 3.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.6 Bazı motor üreticilerinin verdiği siloksan limitleri [40]

Motor Üreticisi	Çöp Gazındaki Siloksan (mg/m ³)
Caterpillar	28
Jenbacher	10
Waukesha	25
Deutz	5
Solar Turbines	0,1
IR Microturbines	0,06
Capstone Microturbines	0,03

Odayeri Tesisi'nde kullanılmakta olan içten yanmalı gaz motorlarındaki parçalardaki siloksan birikimleri Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.8 Siloksan birikimi olan motor parçaları



Şekil 3.9 Siloksan birikimi olan motor parçaları

3.4.4 Halojenli Bileşikler

Halojenli bileşikler çöp gazındaki nem ile birleşerek tıpkı kükürtlü bileşikler gibi asit oluşturarak korozyon etki yapar. Buna bağlı olarak çöp gazındaki halojenlerden hidroflorik ve hidroklorik asit oluşumu gözlenir.

Halojen giderimi genellikle CO₂ giderimi ile birlikte yapılır ve çöp gazının doğalgaza dönüştürüldüğü durumlarda gereklidir. Karbon dioksit giderimi yapan sistemlerin aynı zamanda halojenli organikleri gidermesi ise bir avantajdır [36].

3.5 Çöp Gazından H₂S ve Eser Gazların Giderimi ile İlgili Literatürdeki Çalışmalar

Çöp gazındaki iz bileşenlerin giderimi konusunda literatürde birçok çalışma mevcuttur. Genel olarak çöp gazındaki eser bileşenler adsorpsiyon veya absorpsiyon sistemleri ve farklı malzemeler ile giderilmektedir. Bu çalışma kapsamında ilgili çalışmalar H₂S giderimi ve diğer iz bileşenler olarak iki kısımda incelenmiştir.

3.5.1 Çöp Gazından H₂S Giderimi ile İlgili Literatürdeki Çalışmalar

Üresin vd. [41] tarafından yapılan çalışmada sentetik gaz kullanılarak tek kolonlu kostik scrubber sistemi ile H₂S ve CO₂ giderimi ters akışlı ve paralel akışlı olarak denenmiş ve ters akışlı modda paralel akışlı moda göre daha iyi H₂S giderim verimi elde edilmiştir. Gaz içerisinde CO₂ ve H₂S'ün birlikte bulunması sodyum hidroksit sarfiyatını arttırdığı ve yüksek H₂S yüklerinde H₂S giderim veriminin düştüğü belirlenmiştir. Gaz akış hızına bağlı olarak değişen gaz bekletme süresinin asidik gaz giderim verimi üzerine etkisinin

akışkan hızından daha etkili olduğu belirlenmiştir. Optimum H₂S gideriminin 3 saniye ve üzerindeki gaz bekletme süresinde olduğu belirlenmiştir.

Arespacochaga vd. [42] tarafından yapılan çalışmada İspanya’da atıksu arıtma tesisinde biyogaz arıtma tesisi kurulmuştur. Üç kademeli adsorpsiyon sistemi ile biyogazdaki iz kirleticiler giderilmiştir. Bunlar; H₂S giderimi için demir bazlı rejeneratif adsorbent, nem giderimi için biyogaz kurutma ünitesi ve diğer iz bileşenlerin (siloksan, lineer ve aromatik hidrokarbonlar) giderimi için aktif karbon sistemidir. Demir bazlı H₂S giderim sistemi %99 verimde ve ağırlıkça %21 giderim kapasitesinde çalışmıştır. Diğer iz kirleticilerde başarılı bir şekilde giderilerek 0,1 mg/Nm³ seviyelerine çekilmiştir. Yukarı akışlı kaskat H₂S giderim sistemlerinin devamında aşağı akışlı adsorpsiyon teknolojisiyle devam etmesinin tek H₂S giderim sistemine göre 1/3 oranında maliyeti azalttığı belirlenmiştir.

Ortiz ve Ollero [43] tarafından yapılan çalışmada İspanya’da üç farklı bölgeden alınan arıtma çamuru aktifleştirilerek adsorpsiyon kapasitesi arttırılmıştır. Bu amaçla arıtma çamurları piroliz ve kalsinasyon işlemi ile üç farklı sıcaklıkta işlenmiştir. Hazırlanan malzemelerle doygunluk kapasitesi ve adsorpsiyon kapasiteleri belirlenmiştir. Aktif karbon öncesi malzeme olarak kullanılarak aktif karbon sisteminin işletme maliyetinin düşürülmesi amaçlanmıştır. Adsorbent karakterinin ortaya çıkarılması için yüzey özellikleri ve kimyasal özellikleri analiz edilmiştir. Ayrıca farklı prosedürler ile oksijen içeriğinin etkisi, bağıl nem ve kimyasal özelliklerin etkisi incelenmiştir. Buna göre 700 °C’de kalsinasyon işleminden geçirilen üç farklı karakterdeki çamur impegrene edilmemiş ticari aktif karbonun iki katı kapasiteye ulaştığı ama yine de NaOH impegrene edilmiş aktif karbondan düşük kapasitede olduğu tespit edilmiştir.

Xu vd. [44] yaptıkları çalışmada domuz gübresi ve atıksu arıtma çamurlarından üretilmiş biyokömür ile gaz fazından H₂S giderimi incelenmiştir. Domuz gübresinden üretilen biyokömürün atıksu arıtma çamurundan üretilen biyokömüre kıyasla daha yüksek miktarda H₂S tutma kapasitesine sahip olduğu ve domuz gübresinden ve atıksu arıtma çamurundan üretilen biyokömürdeki nemin artmasıyla H₂S tutma oranlarının arttığı belirlenmiştir.

Mostbauer vd. [45] yaptıkları çalışmada evsel katı atık yakma külü kullanılarak biyogaz veya çöp gazından H_2S ve CO_2 'nin tutularak yüksek metan içeriğine sahip kaliteli gaz elde edilmesini araştırmışlardır. Laboratuvar testlerini (65-90 kg taban külü) doğrulamak amacıyla pilot ölçekli (500-1000 kg taban külü ve 9,2 Nm^3 /saat gerçek çöp gazı) çalışma İtalya'nın Tuscany bölgesinde tamamlanmıştır. En iyi proses performansı 3,7 Nm^3 /saat giriş gaz debisinde ve bu debide H_2S giderim verimi %99,5-99 olarak tespit edilmiştir.

Kalapala [46] yaptığı çalışmada amaç H_2S 'ü sulu malzeme ile tutmak ve onu adsorbent olarak kullanmaktır. Daha sonrasında adsorbent güneş ışığı kullanarak fotokatalitik reaksiyon ile rejenere edilmiştir. Adsorbentler CuS , MoS_2 , WS_2 ve Ag_2S gibi metal sülfürlerdir. Beklenen reaksiyon H_2S 'ün elementel kükürte oksidasyonu ve suyun hidrojen gazına indirgenmesidir. Birçok sülfid incelenmiştir ve bunların içerisinde platin katalizörlü MoS_2 toksisite, stabilite ve fotokatalitik aktivite açısından optimum olanı olarak tespit edilmiştir. Aydınlatma kaynağı Xenon ark lamba ve yüzey aktif madde eklenmesi ya da düşük yüzey enerjisine sahip Teflon benzeri malzeme eklenerek kabarcık oluşumu teşvik edilmiş ve 5 mL/g.saat değerine ulaşılmıştır.

Sarperi vd. [47] yaptıkları çalışmada çelik endüstrisinden kaynaklanan kalsiyum ve demir oksitleri içeren çamur kullanılarak CaO ile CO_2 ve Fe_2O_3 ile H_2S giderimi yapılmıştır. Giderim kapasiteleri 63 g CO_2 / kg çamur ve 140 g H_2S / kg çamur olarak belirlenmiştir. Optimum sıvı/katı oranı 0,05-0,2 L su/kg çamur olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara dayanılarak arazi ölçekli kolon deneyi ile yapılmış olup 73 g CO_2 /kg çamur sonucu elde edilmiştir.

Bergersen ve Haarstad [48] yaptıkları çalışmada mineral yün atıkları kullanılarak çöp gazı filtre edilerek H_2S giderimi yapılmıştır. Sistemden geçen gaz debisi 0,3 ila 3 L/dakika arasında değişmiş olup ortalama H_2S konsantrasyonu 4500 ppm'dir. Sonuçlar mineral yün atıkları ile çöp gazından H_2S arıtımının mümkün olduğunu göstermiştir. Değirmen atıkları ve mineral yün atıkları karıştırılarak H_2S giderimi denenmiş ve en uygun oranın 19:1 olduğu bulunmuştur. Bu iki malzemenin karışımından oluşan filtre içine dikey delikli boru yerleştirilerek aşağı akışlı şekilde 80 gün boyunca çöp gazı verilmiş ve H_2S 'ün %98 oranında giderimi sağlanmıştır. Aşağı akışın filtre malzemesi ile

temasında daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Mineral yün atıkları ve değirmen atıklarının H_2S giderim potansiyelleri 4500 ppm H_2S konsantrasyonunda 14 g/kg ve 261 g/kg olarak bulunmuştur. Çalışmada kullanılan debi miktarı gerçek tesisin gaz miktarından 100 kat daha az olup belirtilen sistemin ölçeğinin büyütülmesi ile bu gazı arıtabileceği düşünülmektedir.

Rasi vd. [49] yaptıkları çalışmada pilot ölçekli yüksek basınçlı su absorpsiyon sistemi (absorpsiyon, desorpsiyon, kurutma) ile çöp gazı saflaştırılmıştır. Giriş basıncı 8 ve 10 bar olan ve 180 bar'da çalışan iki fazlı ve iki absorpsiyon kolonu ile çöp gazı saflaştırılmıştır. Saflaştırılan gazdaki CH_4 oranı %83-91,2, arasında değişmiştir ve bu sistemde çöp gazındaki H_2S %99 oranında giderilmiştir.

Moreno vd. [50] yaptıkları çalışmada laboratuvar ölçekli biyogaz saflaştırıcısı kullanılmış ve enzim ile H_2S giderimi incelenmiştir. nzymSys adlı şirketten alınan doğal enzim biyogaz desülfürizasyonunda kullanılmıştır. Enzim, farklı organizmalardan alınan selüloz, amilaz, proteaz ve lipaz enzimlerini içermektedir. Çalışmada 3000 ppm civarında H_2S giriş konsantrasyonu ile çalışılmış olup bazı işletme parametrelerinin etkileri incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda bir miktar seyreltilmiş enzim ile CH_4 ve CO_2 miktarında herhangi bir olumsuzluğa yol açmadan H_2S 'ün %100 giderimi sağlanmıştır.

Li vd. [51] yaptıkları çalışmada depo sahasında tam ölçekli biyofiltre kullanarak H_2S giderimi yapmışlardır. Bu amaçla poliüretan köpüklerden yapılmış küplerden oluşan tam ölçekli biyofiltre 7 ay boyunca işletilmiştir. Biyofiltre yatağı boyunca numune alma noktaları oluşturulmuştur. Filtrede H_2S giderimi ve mikrobiyal karakteristiği incelenmiştir. Giderim verimi biyofiltrenin alt ve üst kısımlarda farklı bulunmuştur. Etkatif olarak %90 oranında H_2S giderimi yapılmıştır. Ortalama H_2S giderim kapasitesi biyofiltrenin alt kısımlarında $2,21 \text{ g/m}^3 \cdot \text{saat}$ ve üst kısımlarında $0,41 \text{ g/m}^3 \cdot \text{saat}$ olarak bulunmuştur. Biyofiltre yatağı boyunca H_2S giderimi yapan farklı karakterde mikroorganizmalar tespit edilmiştir.

Cherosky ve Li [52] yaptıkları çalışmada sünger demir teknolojisi kullanılarak biyoparçalanabilir atıklar destek malzemesi olarak kullanılarak esnek ve düşük maliyetli bir sistem ile biyogazdan H_2S giderimi denenmiştir. Bu çalışmada bahçe atıkları,

çürütülmüş bahçe atıkları ve harcanmış tütün destek malzemesi olarak kullanılmıştır. Bu çalışma sonucunda partikül boyutu ve nem içeriğinin H₂S gideriminde önemli etkisi olduğu kanıtlanmıştır. Çalışmada optimum nem oranı bahçe atıkları için %15, çürütülmüş bahçe atıkları için %25 olarak belirlenmiştir. Sünger demir bahçe atıkları ve çürütülmüş bahçe atıklarında ticari ürüne (SulfaMaster) göre benzer sonuçlar verdiği ve bu malzemelerin sünger demir sisteminde alternatif destek malzemesi olabileceği belirlenmiştir.

Lin vd. [53] yaptıkları çalışmada pilot ölçekli kimyasal-biyolojik H₂S giderim sistemi inşa edilerek 356 gün boyunca hayvan gübresinden üretilen biyogaz farklı H₂S yüklerinde arıtılarak 30 kW'lık biyogaz jeneratörüne beslenmiştir. Giriş H₂S konsantrasyonu Ortalama 3542 ppm H₂S konsantrasyonunda ve 288 saniyelik bekletme süresinde %95 oranında H₂S giderimi yapılmıştır. Sistem düzgün bir şekilde çalışarak biyogaz arıtımı için fizibil olduğunu göstermiştir.

Krischan ve Harasek [54] yaptıkları çalışmada alkali oksidatif gaz yıkayıcı ile desülfürizasyon yapılmıştır. Karıştırmalı tank ve sürekli gaz yıkayıcı kolon ile laboratuvar ortamında yapılan çalışmada sodyum hidroksit (NaOH), sodyum bikarbonat (NaHCO₃) ve hidrojen peroksit (H₂O₂) içeren kimyasal karışımı ile yüksek miktarda CO₂ içeren gaz akımından H₂S giderimi yapılmıştır. pH'nın etkisi, redoks potansiyeli ve kimyasal karıştırılmasının absorpsiyon üzerine etkisi ve kimyasal sarfına etkisi incelenmiştir. Endüstriyel ölçekli pilot gaz yıkayıcı inşa edilerek 180 m³/saat'lik biyogaz ile ortalama %97 giderim verimine ulaşmıştır.

Deshmukh vd. [55] yaptıkları çalışmada demir şelatı kullanılarak oksidatif absorpsiyon ile H₂S giderimi incelenmiştir. 40 °C'de, pH 6'da, demir konsantrasyonu 10000 ppm ve demir/şelat oranı 1:2 olacak şekilde çalışma yapılmıştır. Demir-Nitrilotriasetik asit (NTA) çözeltisinin H₂S giderimi diğerlerinden daha iyi olarak bulunmuştur. Bu nedenle bir sonraki denemeler %10, %50 ve %100'lük H₂S konsantrasyonlarında yapılmıştır. Bu prosesin yüksek konsantrasyonda H₂S'ü düşük konsantrasyonlarda giderilmesi için uygun olduğu tespit edilmiştir. NTA'nın oksidasyonunu minimize etmek için sodyum tiyosülfat kullanılmıştır. Kinetik parametreler belirlenmiştir ve reaksiyonun 1.

dereceden olduğu belirlenmiştir. Buna göre %100, %50 ve %10 H₂S konsantrasyonlarında 0,035 saat⁻¹, 0,013 saat⁻¹ ve 0,019 saat⁻¹ olarak bulunmuştur.

Vakili vd. [56] yaptıkları çalışmada sulu ortamda demir sülfat çözeltisi ile H₂S giderimi yapılarak sülfür geri kazanımını denemişlerdir. Sülfür dışında bu proses sonucunda su oluşmaktadır ve herhangi bir atık arıtma tesisine ihtiyaç duyulmayacağı belirtilmiştir. Prosesin farklı bir avantajı ise H₂S ile olan reaksiyonu hızlı olup herhangi bir toksik gaz çıkışı bulunmamaksıdır. Proseste etkili işletme parametreleri göz önünde bulundurulmuştur. Sonuçlar yüksek sıcaklık ve düşük basıncın absorpsiyon reaksiyonu için uygun olduğunu göstermektedir. Sonuçlara göre H₂S ve demir sülfat arasındaki reaksiyonun 1. derece kinetiğe uyduğunu göstermektedir. Düşük demir sülfat konsantrasyonlarında H₂S'ün absorpsiyon hızı demir sülfat konsantrasyonunun artmasıyla artar. Yüksek konsantrasyonlarda absorpsiyon hızının düştüğü görülmüştür. Demir sülfatın yüksek konsantrasyonlarında çözeltinin iyonik güç ve viskozitesi arttıkça çözeltinin çözünürlüğü, diffüzyonu ve absorpsiyon hızı azalmakta olduğu belirlenmiştir.

Başpınar vd. [57] yaptıkları çalışmada 5 m³'lük biyogaz yıkama kulesinde aerobik olarak arıtılmış atıksu ile biyolojik desülfürizasyon yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan atıksu aktif çamur, nitrat ve nitrit içeren bir karışım olup bunlar uygun şartlarda elektron alıcısı olarak davranırlar. Biyogaz debisi 5 ila 25 m³/saat, atıksu debisi 2,5 ila 15 m³/saat şeklinde değişiklik göstermiştir. Hacimsel sülfür yükü 2 ila 22 kg S/m³.gün olarak değişmiştir. Maksimum H₂S giderim oranının elde edildiği optimum atıksu/biyogaz oranı 2-3 m³/m³ ve minimum boş yatak bekletme süresi 10 dakika olarak belirlenmiştir. Nitrat ve nitrit formundaki azot gideriminin sülfür giderimiyle orantılı olduğu tespit edilmiştir. Çıkış suyunun redoks potansiyeli takip edilmiştir ve atıksu/biyogaz oranıyla uyumludur. Bu çalışmada biyogazdaki H₂S'ün %95'den fazlası 2 ila 4 kg S/m³.gün hacimsel sülfür yükünde giderilmiştir. Bu çalışma sülfür gideriminin endüstriyel atıksu arıtma sistemlerinde biyolojik azot giderimine başarılı bir şekilde entegre edilebileceğini göstermiştir.

Huertas vd. [58] yaptıkları çalışmada amin absorpsiyonu ile biyogazdan H₂S ve CO₂ giderimini araştırmışlardır. Bu amaçla 7,6 m³/saat gaz debisine uygun giriş H₂S konsantrasyonu 5000 ppm'den fazla ve çıkış H₂S konsantrasyonu 100 ppm'in altında

olacak şekilde tasarım yapılmıştır. Sistemde absorpsiyon kimyasalı olarak monoetanolamin (MEA), dietanolamin (DEA) ve metildietanolamin (MDEA) kimyasalları farklı oranlarda su ile seyreltilerek kullanılmıştır. Tüm aminlerin debiye bağlı olarak giderim verimleri tespit edilmiştir. Buna bağlı olarak tüm amin türlerinin benzer şekilde %98 H₂S giderimi ve çıkış H₂S konsantrasyonu 100 ppm'e ulaşabildikleri görülmüştür. Bu sebeple en ucuz amin türü olan MEA çalışma kimyasalı olarak seçilmiştir. Ortalama olarak MEA veya DEA'nın %7,5'luk sulu çözeltilerinin kg MEA veya DEA başına 5,37 g H₂S ve 410,1 g CO₂ giderebildikleri tespit edilmiştir. Ayrıca aminlerin rejenerasyonu için bir sistemde dizayn edilerek, imal edilmiş ve test edilmiştir. Motorların egzoz gazlarının ısısı kullanılarak aminlerin 95 °C'ye ısıtılması sağlanmıştır. Bu testler H₂S giderim veriminin %98 ile 95 ve CO₂ giderim veriminin için %87 ile 50 aralığında değiştiği tespit edilmiştir. Sonuçlar kısmi bir çalışmanın sonucu olsa da ilerleyen çalışmalarda bunun geliştirilebileceği düşünülmektedir.

3.5.2 Çöp Gazından Diğer Gazların Giderimi ile İlgili Literatürdeki Çalışmalar

Sigot vd. [59] yaptıkları çalışmada üç farklı adsorbent kullanarak oktametilsiklotetrasiloksan (D4)'ün giderimi denenmiştir ve en etkili adsorbentin silika jel olduğu belirlenmiştir. Silika jelin adsorpsiyon kapasitesi 250 mg D4/g silika jel olduğu ve yatak yüksekliğinin adsorpsiyon kapasitesi üzerine bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Ortamda su varlığında (%70 bağıl nem) giderim veriminin %90 seviyelerine düştüğü gözlenmiştir. Bunun sebebinin suyun tercihli adsorpsiyonu olduğu belirtilmiştir. Ayrıca 20 °C'lik sıcaklık artışının giderim veriminde %15'lik düşüşe yol açtığı, ısıtma yoluyla rejenerasyonun kısmi olduğu ve sıcaklığın silika jel üzerinde siloksan polimerizasyonuna yol açtığı belirlenmiştir.

Gislon vd [60] yaptıkları çalışmada tek pratik ve ekonomik bir yolla H₂S ve siloksanları aynı ölçüde ve aynı anda 1 ppm'in altına düşürülmesini hedeflemişlerdir. Bu amaçla bazı ticari aktif karbonlar seçilerek H₂S gideriminde adsorpsiyon ölçümü aparatında test edilmiştir. Bunu en uçucu siloksan (Hekzametildisiloksan veya L2) ile azot akımında tipik olarak 100-200 ppm L2 olacak şekilde toz aktif karbon yatağında adsorpsiyon prosesi bazı deneysel parametreler (konsantrasyon, dane büyüklüğü,

yatak yüksekliği) için analiz edilmiştir. En iyi aktif karbonun adsorpsiyon kapasitesi 0,1 g L2/g aktif karbon olarak bulunmuştur.

Sevimoğlu ve Tansel [39] yaptıkları çalışmada İstanbul’da bulunan Odayeri depo sahasında çöp gazındaki iz bileşenlerin gaz motorlarına etkisini görmek amacıyla yapılmıştır. Kompozit numuneler 3 yıl boyunca toplanarak ve analiz edilerek iz bileşenler (Hidrokarbonlar, siloksanlar ve uçucu halojenlenmiş hidrokarbonlar) takip edilmiştir. İz bileşenlerin gaz motorlarına girmesi ile gaz motorlarının performansına etkileri incelenmiştir. Yakma odasında, turboda ve intercoolerda birikinti oluşumu şeklindeki başlıca işletme problemleri bakımların planlanandan yapılmasına sebep olduğu görülmüştür. Ayrıca yüksek seviyede H₂S ve klorlanmış ve florlanmış bileşiklerin motor parçalarında korozyonuna ve motor yağının ömrünün kısılmasına sebep olduğu tespit edilmiştir. Buna göre sonuç olarak motorların korunması amacıyla çöp gazının n arıtımının yapılması gerektiği belirlenmiştir.

Sevimoğlu ve Tansel [61] yaptıkları çalışmada depo gaz ile işletilen gaz motorlarının parçalarında birikinti oluşumunu analiz etmişlerdir. Birikinti oluşumu aktif karbon sisteminin öncesinde ve sonrasında takip edilmiştir. Birikinti oluşumunun bujilerde yüksek seviyelerde kalsiyum, krom ve nikel şeklinde olduğu görülmüştür. öp gazının içerisindeki siloksan bileşenleri oktametilsiklotetrasiloksan (D4) (5 mg/m³), dekametilsiklopentasiloksan (D5) (2,9 mg/m³) ve hekzametildisiloksan (L2) (1,6 mg/m³) olmak üzere toplamda 9,5 mg/m³ siloksan içerdiği tespit edilmiştir. Aktif karbon arıtımı sonrası silikon seviyelerinin önemli ölçüde düştüğü görülmüştür. Yapılan analizlere göre çinko ve kalsiyumun motor yağı katkılarından, alüminyum, bakır, nikel, demir ve kromun motor aşınmasından kaynaklandığı tespit edilmiştir.

Ajhar vd. [62] yaptıkları çalışmada çöp gazından uçucu metilsiloksanların (VMS) arıtımında alternatif bir metot olarak membranların kullanımını araştırmıştır. Bu amaçla PDMS membranlardan oluşan sistemde silikon içeren sentetik biyogaz karışımı 3 ve 4 çıkışlı konfigürasyondan geçirilerek arıtılmıştır. Sonuçlar boyutsuz sayılarla gösterilerek ölçek büyütme işlemi kolaylaştırılmıştır. Genel olarak PDMS membranların siloksan gideriminde kullanılabileceği ve özellikle ortam havasını taşıyıcı gaz olarak kullanan 4 çıkışlı konfigürasyonun 3 çıkışlı konfigürasyondan daha az enerji ihtiyaının

olduğu belirtilmiştir. Ancak sistemde istenilen derecede saflaştırmaya bağlı olarak %7 oranında CH₄ kaybı yaşanmaktadır. Bu kaybı önlemek adına CO₂/CH₄ seçiciliği yüksek olan membran kullanılması önerilmektedir.

Piechota vd. [63] yaptıkları çalışmada çöp gazından trimetilsilanol (TMSOH) giderim ve ölçümü özel E3000-ITC sisteminde yapılmıştır. Sistem sıcaklık salınımı prensibi ile çalışmaktadır. TMSOH ve nem giderim performansı sırasıyla %20 ve %90'dan fazladır. Polonya'da altı farklı aktif karbon ve impinger metodu tam ölçekli depo sahasında TMSOH ve siloksanların belirlenmesi için kullanılmıştır. Ekstraksiyon metodu ve absorpsiyon için aseton kullanılmıştır. TMSOH ve siloksan konsantrasyonları sırasıyla 23,6 ila 29,2 mg/m³ ve 18 ila 38,9 mg/m³ şeklinde değişmektedir. Biyogazdaki TMSOH içeriği toplam siloksanların %41'ini oluşturduğu ve kullanılan sistemin hali hazırdaki teknolojilere alternatif olduğu belirlenmiştir.

Läntelä vd. [64] yaptıkları çalışmada evsel katı atıklardan oluşan çöp gazından motorlu taşıt yakıtı üretmek için absorpsiyon, desorpsiyon ve kurutma ünitelerinden geçirerek ve absorbent olarak su kullanarak saflaştırmak amaçlanmıştır. Su sistemde sürekli geri devrettirilerek sisteme yeni su verilmemiştir. Basıncın (20-25 bar) etkisi, sıcaklık (10-25 °C) ve su akış hızının (5,5-11 L/dakika) saflaştırmaya etkisi, iz bileşenler (siloksan, halojenli bileşikler) ve su kalitesi izlenmiştir. Ham çöp gazı debisi 7,41 Nm³/saat'te sabit tutulmuştur. Çalışılan basınç ve sıcaklık değerlerinde saflaştırma sonrası gazın kalitesi %86-90 CH₄ ve %4,5-8 CO₂ ve %1-7 N₂ şeklinde belirlenmiştir. Siloksan giderimi %16,6 ve halojen bileşiklerin giderimi %90,1 olarak belirlenmiştir. Çalışılan parametrelerden sadece su akış hızı siloksan ve halojenli bileşiklerin giderimini etkilemiştir. Saflaştırılmış gazın kurutulmasıyla ham gaza göre siloksan konsantrasyonu %99,1 ve halojenli bileşiklerin konsantrasyonu %99,9 oranında azaltılmıştır. Sonuç olarak pilot ölçekli gaz saflaştırma sistemi kapalı su sirkülasyon sistemiyle yüksek enerji içeriğine sahip gaz (%86-90 CH₄) üretilebilmesini sağlamıştır. Standart gaz kurutma sistemlerine göre tüm iz bileşenler ham gaza göre %99'un üzerinde giderilmiştir.

ÇÖP GAZINDAN H₂S GİDERİMİ KONUSUNDA YAPILAN ÇALIŞMALAR

4.1 İstanbul'daki Düzenli Depolama Sahaları

İstanbul'da Kentsel Katı Atıkların bertaraf edildiği biri Avrupa yakasında (Odayeri) diğeri Anadolu yakasında (Kömürcüoda) olmak üzere iki adet II. Sınıf Düzenli Depolama Tesisleri bulunmaktadır. Odayeri ve Kömürcüoda II. Sınıf Düzenli Depolama Tesisleri yüzey yapısı tahrip edilmiş, kısmen veya tamamen terk edilmiş eski maden ocağı alanlarından seçilmiştir ve 1995 yılında inşaat çalışmaları tamamlanarak işletmeye alınmıştır.

İstanbul'daki II. Sınıf Düzenli Depolama Tesisleri'ne Avrupa yakasında bulunan 4 adet ve Anadolu yakasında bulunan 3 adet aktarma istasyonlarından gelen kentsel katı atıklar bertaraf edilmektedir. İstanbul'da günde yaklaşık 14000 ton kentsel katı atık toplanmaktadır. Avrupa yakasında 9000 ton ve Anadolu yakasında 5000 ton kentsel katı atık toplanarak II. sınıf düzenli depolama alanlarına getirilmekte ve bertaraf edilmektedir.

Avrupa Yakasında bulunan Odayeri II. Sınıf Düzenli Depolama Tesisleri Eyüp ilçesinin Göktürk Odayeri Köyü Mevkiinde Göktürk beldesinin kuzeybatısında, Göktürk beldesine yaklaşık 5 km mesafede 114 Ha'lık alanda yer almaktadır.

Anadolu Yakasında yer alan Kömürcüoda II. Sınıf Katı Atık Düzenli Depolama Tesisleri Şile ilçesinin Karakiraz Köyü Kömürcüoda mevkiinde toplam 233 Ha'lık alan üzerine kuruludur.

II. Sınıf Düzenli Depolama Tesislerinde aşağıda verilen üniteler bulunmaktadır;

- Çöp Sızıntı Suyu Arıtma Tesisleri, Çöp Sızıntı Suyu Toplama Havuzları,

- Kantar, İdari Bina,
- Tıbbi Atık Yakma Tesisi (Odayeri),
- Tıbbi Atık Sterilizasyon (Odayeri),
- I. Sınıf Düzenli Depolama Sahası (Kömürcüoda),
- Endüstriyel Atık Ara Depolama Tesisi (Kömürcüoda),
- Çöp Gazından (LFG) Enerji Üretim Tesisi,
- Araç Bakım Atölyesi.

İstanbul'daki Odayeri ve Kömürcüoda Düzenli Depolama Sahaları ve Katı Atık Aktarma İstasyonları'nın konumları Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 İstanbul'daki Depo Sahalarının ve Aktarma İstasyonlarının Konumu

4.2 Odayeri Elektrik Üretim Santrali

İstanbul'un Avrupa yakasının evsel katı atığı 1995 yılından itibaren Odayeri düzenli depolama sahasında depolanmaktadır. 1995-2008 yılları arasında 50 hektarlık alana 40 milyon ton atık depolanmıştır. Eski bir maden alanı olan depo sahasının tabanı kil ve geomembran ile geçirimsiz hale getirilmiştir. Geomembran üzerine serilen geotekstil ve çakıl tabakası ile drenaj sistemi oluşturulmuştur. Depo sahası tabanında biriken su 50 metre aralıklar ile döşenen delikli borular ile toplanmaktadır. Depo sahasında döküm devam ederken pasif tahliye bacaları kurulmakta ve oluşan gazın tahliyesi bu

bacalardan sağlanmaktadır. Çöp gazını sahadan çekerek elektrik üretimi yapan Ortadoğu Enerji'ye ait tesis Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Ortadoğu Enerji Odayeri Elektrik Üretim Santrali

Sahada oluşan gaz depolama bittikten sonra her biri 50 metre aralıkla eşkenar üçgen yöntemine göre yerleştirilmiş ortalama derinlikleri 30 metre olan dikey gaz kuyuları ile toplanmaktadır. Bu kuyuların 8-12 adedi manifold odalarına getirilerek vanalar vasıtasıyla optimizasyon ve regülasyon yapılabilmektedir. Sistemin çıkış vakumu -60 mbar seviyelerindedir. Depo sahalarının farklı yerlerinde 29 adet manifold odası bulunmaktadır. Kuyularda biriken suyun tahliyesi için basınçlı hava ile çalışan pompalar kullanılmaktadır. Bu pompaların çalışması için gerekli basınçlı hava ve kuyudan çıkarılan suyun atıksu arıtma tesisine aktarımı için basınçlı hava ve atık su hatları da yapılmaktadır. Projede atık su, basınçlı hava ve gaz hatları için toplam 125 km boru kullanılmıştır.

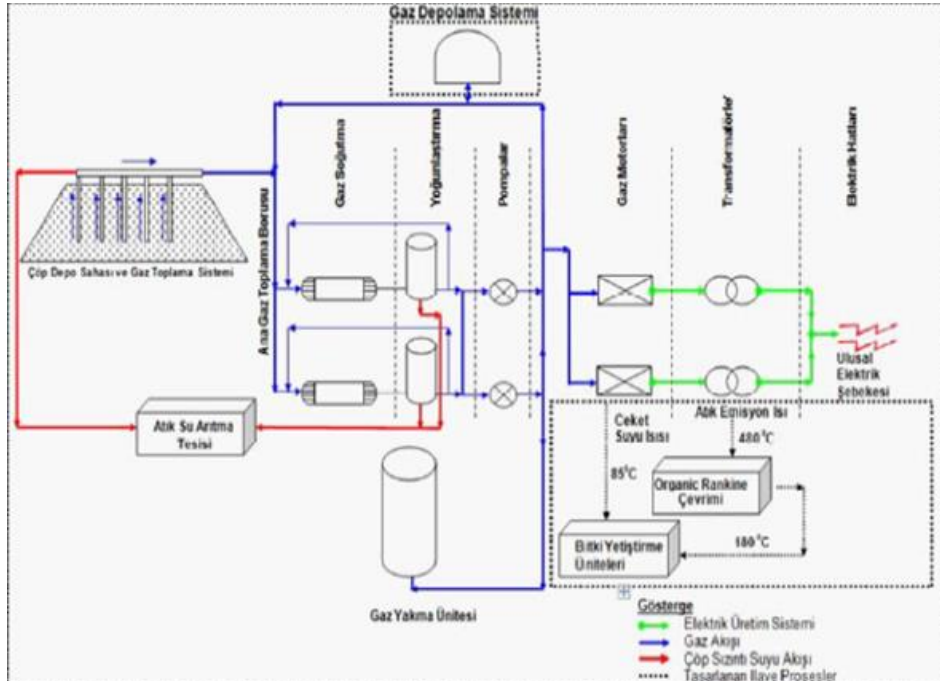
Depo sahasında oluşan gazın tesise getirilmesi amacıyla 7 adet vakum pompası (booster) kullanılmaktadır. Boosterlardan geçen gaz eşanjör sisteminde soğutulmakta ve nemi demistör ünitesinde giderilmektedir. Boosterlardan geçen gaz basınçlandırılarak gaz motorlarına gönderilmektedir. Sistemde herhangi bir sebepten dolayı elektrik üretilmez ise her biri 16000 m³'lük iki adet gaz depolama balonu

kullanılmayan gazı daha sonra kullanmak amacıyla depolamaya başlamaktadır. Gaz depolarının dolması durumunda her biri 2500 m³/saat kapasiteye sahip iki adet yakma bacası devreye girmekte ve sahada oluşan gazı sabit vakumla çekerek gazın atmosfere yakılarak verilmesine devam edilmektedir. Yakma için alt sınır değeri 900 °C olarak belirlenmiştir.

Enerji üretim tesisinde her biri 1415 kW elektrik enerjisi üreten 21 adet GE-Jenbacher marka ve her biri 1364 kW elektrik enerjisi üreten MWM marka gaz motorları bulunmaktadır. Toplam kapasitesi 33,8 MW'dır. Elektrik üretiminde kullanılan gaz motorları 4 zamanlı 20 silindirli içten yanmalı jeneratörler olup elektriksel verimleri %40 civarındadır. Üretilen elektrik 20 km boyunca havai ve yer altı hatlar vasıtasıyla Habibler Trafo merkezine iletilmektedir.

Odayeri Elektrik Üretim Tesisi *YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ ELEKTRİK ENERJİSİ ÜRETİMİ AMAÇLI KULLANIMINA İLİŞKİN KANUN*'a [65] tabi bir biyokütleyle dayalı üretim tesisidir. Bu kanun kapsamında tesisin ürettiği enerji ilgili dağıtım şirketi tarafından 10 yıl boyunca 13,3 ABD Doları cent/kWh tarifesinden satın alma zorunluluğu bulunmaktadır.

Şekil 4.3'de Odayeri Elektrik Üretim Santrali akış diyagramı gösterilmiştir.

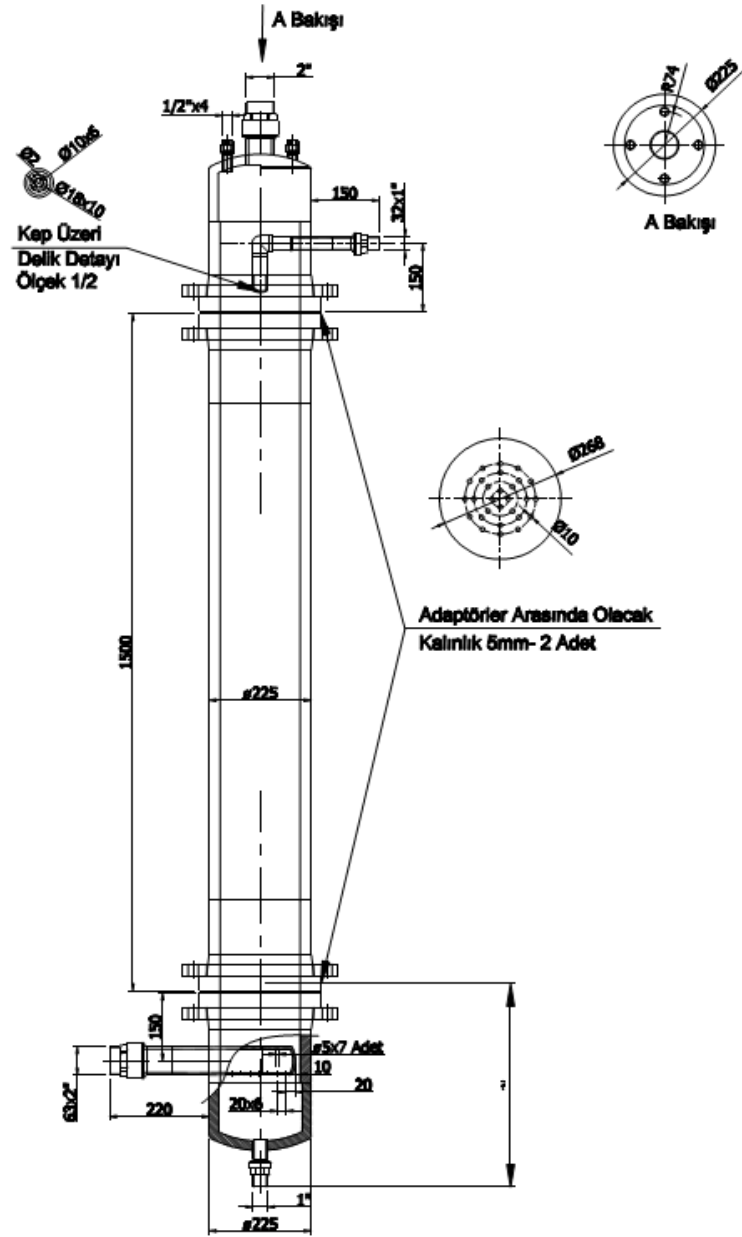


Şekil 4.3 Odayeri Elektrik Üretim Santrali akış diyagramı

4.3 Pilot Tesis Bilgileri

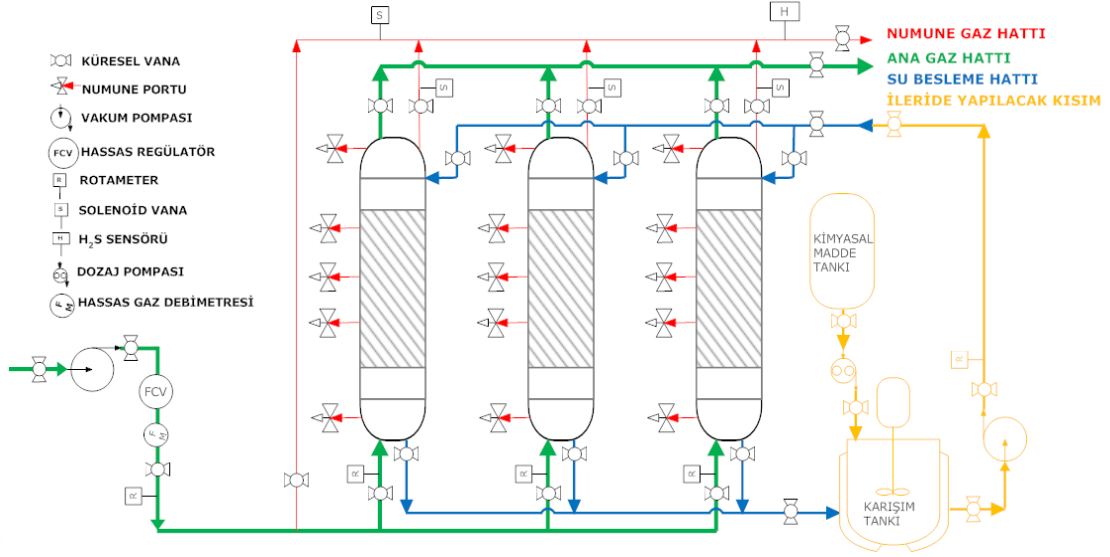
Çalışmada kullanılan sistemin dizaynında farklı malzemelerle kullanılabilmesine ve farklı çalışma şartlarına uyumlu bir tasarım yapılmaya özen gösterilmiştir. Bu amaçla kolonun bağlantılarında buna uygun çıkışlar yapılmıştır.

Tasarlanan ve imal ettirilen iki adet kolon dış çapı 225 mm ve iç çapı 200 mm olan HDPE borudan yapılmıştır ve yüksekliği 1,5 m'dir. Tasarımı yapılan kolona ait teknik çizim Şekil 4.4'de gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Tasarlanan giderim kolonu

Pilot ölçekli sistemin P&ID tasarımı Şekil 4.5’de gösterilmiştir.



Şekil 4.5 H₂S giderimi deney düzeneği P&ID tasarımı

4.4 Analiz Yöntemi

Kurulan pilot ölçekli sistemde H₂S giderim veriminin izlenebilmesi amacıyla gaz ölçümleri yapılmıştır. Bu amaçla ana gaz hattında ve her bir kolonun çıkışında numune alma noktaları oluşturulmuştur. Odayeri Elektrik Üretim Tesisi’nde gaz kuyularının optimizasyon ve regülasyonunda kullanılan ve Şekil 4.6’da gösterilen Geotech GEM5000 portatif gaz analiz cihazı ile sabah, öğle ve akşam olmak üzere günde üç kez ölçüm yapılmıştır.



Şekil 4.6 Geotech GEM5000 portatif gaz analiz cihazı

GEM5000 portatif gaz analiz cihazında standart olarak CH₄, CO₂ ve O₂ ölçümü yapan hücreler bulunmaktadır. Ayrıca cihaza opsiyonel olarak takılabilen hücrelerde bulunmaktadır. Bu amaçla cihaza 0-1000 ppm aralığında ölçüm yapan H₂S dedektörü ilave edilerek satın alınmıştır.

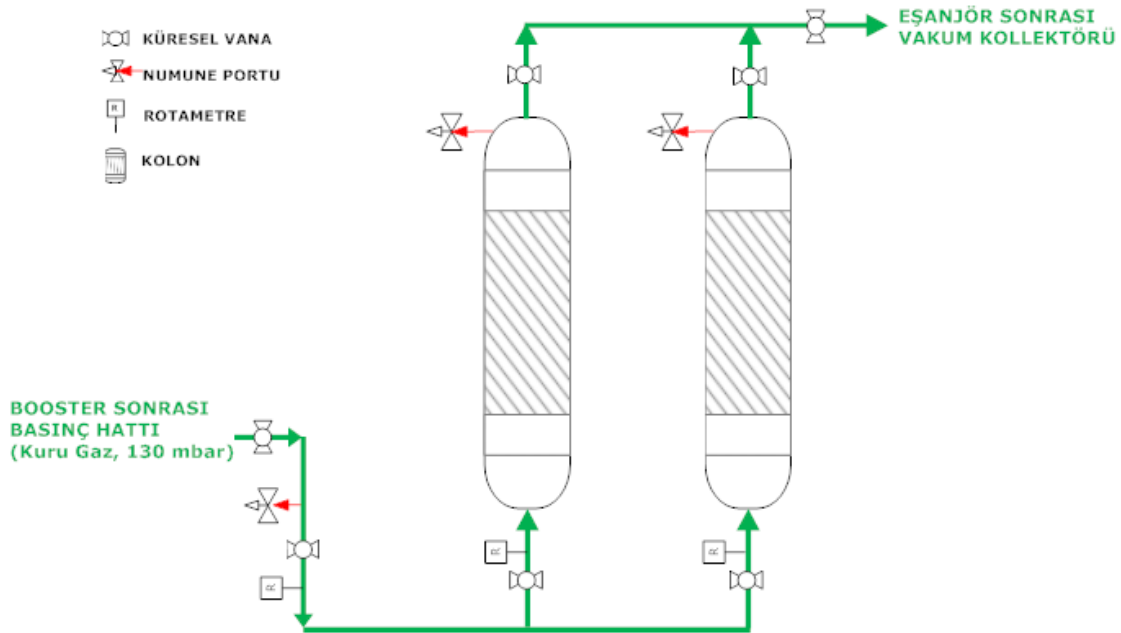
Yapılan çalışmada H₂S (ppm) ve CH₄ (%) değerleri ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Çalışmanın ilerleyişine bağlı olarak Oksijen (O₂) değerleri de takip edilmiştir.

4.5 Yapılan Denemeler

4.5.1 Kuru Gaz ve Aktif Karbon ile Hidrojen Sülfür Giderimi Denemesi

Bu çalışmada yoğunluğu 600 kg/m³, partikül boyutu 1-1,5 mm, yüzey alanı 1200 m²/g olan ticari aktif karbon kullanılmıştır. İki kolona 80 cm yüksekliğinde aktif karbon konulmuştur. Bu amaçla kolonlar ile aynı çapta bir boru ölçü kabı olarak kullanılmıştır. Ölçeğe 80 cm yüksekliğinde konulan aktif karbon poşetlerle konularak daha sonra kolonlara aktarılmıştır.

Şekil 4.7’de kurulan sistemin P&ID tasarımı gösterilmiştir.



Şekil 4.7 Kuru gaz ve aktif karbon ile H₂S giderim sisteminin P&ID tasarımı

Bu denemede booster sonrası basınç hattından çıkış alınarak nemi alınmış gaz ile kolonlar işletilmiştir. Kolonlardan çıkan arıtılmış gaz ise eşanjör sonrasında oluşturulan çıkışa (vakum tarafı) verilmiştir.

Kolon 1'in debisi 5 m³/saat ve Kolon 2'nin debisi 10 m³/saat olacak şekilde sistem toplamda 31 gün işletilmiştir. Debi ayarı herbir kolonun girişinde bulunan rotametreler ile yapılmıştır.

17.02.2014 tarihinde sistem işletmeye alınmış olup 21.03.2014 tarihinde bir sonraki çalışmanın hazırlıklarının yapılabilmesi için durdurulmuştur. Sahadan çekilen gazın kalitesi gün içerisinde atmosferik olaylara göre değiştiği için giderim verimi de gün içinde değişiklik göstermiştir.

Şekil 4.8'de kurulan pilot ölçekli sistem gösterilmiştir.



Şekil 4.8 Kuru gaz ve aktif karbon ile H₂S giderim sistemi

4.5.2 Nemli Gaz ve Aktif Karbon İle Hidrojen Sülfür Giderimi Denemesi

Bu denemede eşanjör öncesinden çekilen hat (nemli gaz temini) ve 400 m³/saat kapasiteli portatif booster (Şekil 4.9) ile giderim denemesi yapılmıştır.

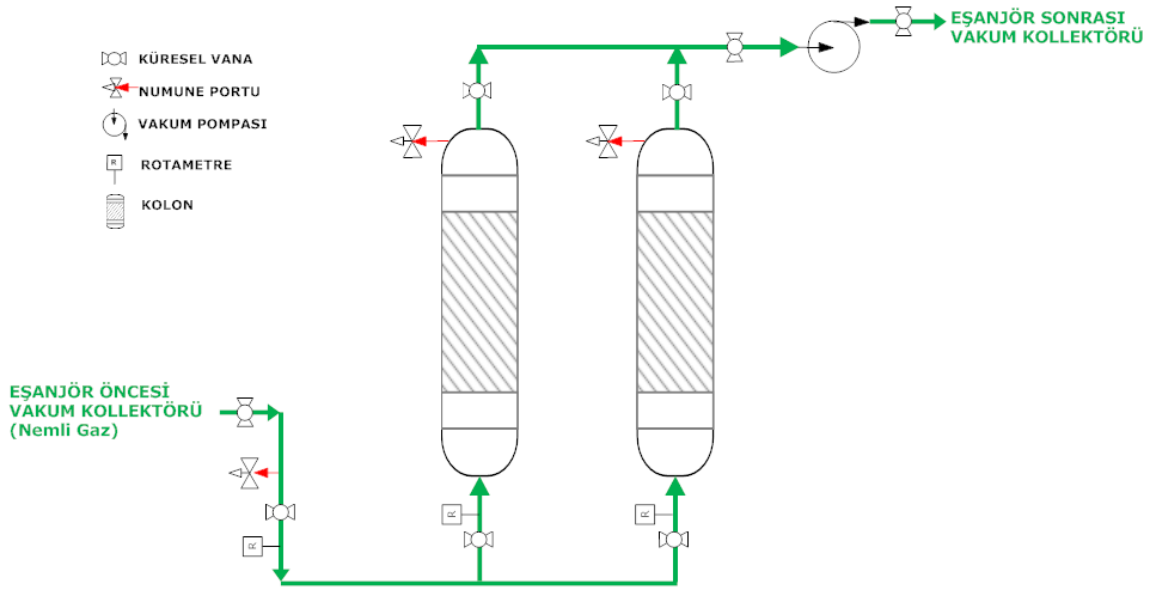


Şekil 4.9 Portatif booster ünitesi

Bu amaçla eşanjör öncesinde bulunan çıkışlardan sisteme yeni bir hat çekilmiştir. Sisteme ilave edilen booster ile gazın çekilip basınç ile kolonlara verilmesi düşünülmüştür. Ancak yapılan denemede gazın çok ısındığı ve gaz debisinde salınım olduğu tespit edildikten sonra sistemde değişikliğe gidilmiştir.

Yeni kurulan sistemde kolonların çıkışına vakum uygulanarak gazın eşanjör öncesindeki noktadan çekilip kolonlardan geçirilmesi sağlanmıştır. Böylece kolonlardan sıcaklığı düşük bir gazın geçmesi sağlanarak sistem 25.03.2014 tarihinde devreye alınmıştır. Ancak nemli gaz ile çalışılmasından dolayı eşanjör öncesinden çekilen hatta yoğuşma suyunun tahliyesi için konulan U borusunun yeterli olmadığı belirlenerek ilk önce daha büyük kapasiteli U borusu yapılmıştır. Büyük kapasiteli U borusunun da yeterli gelmediği tespit edilince U borusunun gaz hattına bağlı kısmı kesilerek su dolu kabın içine daldırılmış ve sorun giderilmiştir.

Sistemin P&ID tasarımı Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.10 Nemli gaz ve aktif karbon ile H₂S giderim sisteminin P&ID tasarımı

Bu denemenin yapıldığı çalışma düzeneği Şekil 4.11’de gösterilmiştir



Şekil 4.11 Nemli gaz ve aktif karbon ile H₂S giderim sistemi

Sistem yukarıda bahsi geçen son konfigürasyon ile işletilmiştir. Kolonlarda ve gaz hatlarının bazı noktalarında yoğunlaşmadan dolayı biriken sular belirli sürelerde tahliye edilerek sistem çalıştırılmıştır. Kolon 2’de (10 m³/saat debi) biriken nem Kolon 1’e (5 m³/saat debi) göre daha fazla olmuştur. Kolonlardaki nemli ortamda sülfür oksitleyen

bakterilerin olup olmadığı ve bunların giderim yapıp yapmadığını belirlemek için 18.04.2014 tarihinden itibaren oksijen içerikleri de ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Ancak yapılan ölçümler sonucu oksijen miktarlarında bir farklılık görülmemiştir.

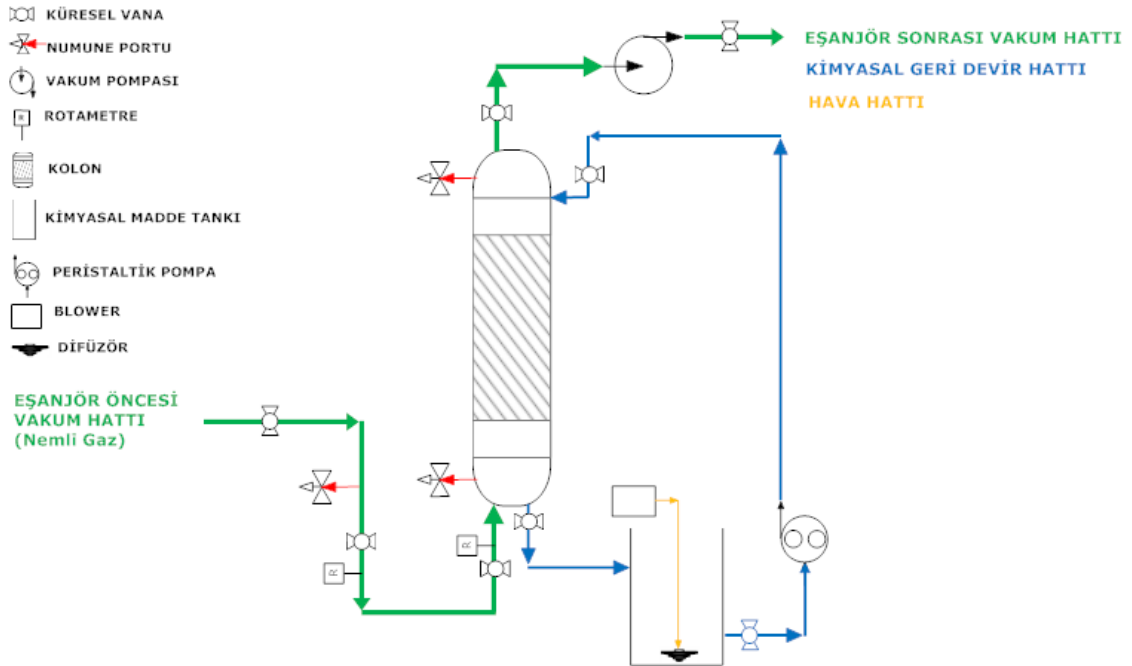
4.5.3 Demir (III) Hidroksit'in Kolona Geri Devri

Demir (III) içeren sıvıların gaz yıkama ile gaz içindeki H_2S 'ün gideriminde uzun süreli kullanılabileceği bilinmektedir. Bu çalışma tamamen bunun üzerine kurgulanmış olup demir içeren kimyasallar kolonlara geri devrettirilerek H_2S giderimi izlenmiştir.

Piyasadan temin edilen 10 L demir (III) klorür su ile 100 L'ye seyreltilerek denemede 50 L hacminde kimyasal kullanılmıştır.

Kurulan bu sistemde demir (III) içeren kimyasal tankta tutulmakta ve rejenerasyonu için havalandırılmaktadır. Tanktaki çıkış vasıtasıyla da peristaltik pompa kimyasalı kolonun üst kısmına göndererek spreyleneceği ve kimyasal gaz ile ters yönde hareket ederek temas etmesi düşünülmüştür. Kurulan bu sistemde $3,2 \text{ m}^3/\text{saat}$ debide (bekletme süresi 1 dk) çalışılmıştır.

Kurulan sisteme ait P&ID tasarımı Şekil 4.12'de gösterilmiştir.



Şekil 4.12 Demir (III) hidroksit kimyasalı ile H_2S giderim sisteminin P&ID tasarımı

Kolonun içine üç farklı tabaka oluşturacak şekilde sırasıyla Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’de gösterilen malzemeler yerleştirilmiştir.



Şekil 4.13 Dolgu malzemesi (ilk tabaka)



Şekil 4.14 Dolgu malzemesi (ikinci ve üçüncü tabaka)

Kimyasalın geri devrinin iyi yapılabilmesi ve kolon içindeki kimyasalın tanka akışını sağlamak amacıyla kimyasal tankı kolondan daha düşük kota konulmuştur. Kimyasal tankı ve konumu Şekil 4.15’de gösterilmiştir.



Şekil 4.15 Kimyasal rejenerasyon tankı

Denemede kullanılan blower (Superfish Airflow 4) ve peristaltik pompa (Masterflex 7591-07) Şekil 4.16’de gösterilmiştir.



Şekil 4.16 Denemelerde kullanılan blower ve pompa

4.5.4 Demir (III) İçeren Arıtma Çamurunun Kolonlara Geri Devri

Bir önceki denemede kullanılan tek tanktaki rejenerasyonun gazın oksijen içeriğini arttırdığı düşüncesiyle bu sistemde revizyona gidilerek iki tanklı rejenerasyon sistemi kurulmuştur. Şekil 4.17’de iki kademeli tank sistemi gösterilmiştir.



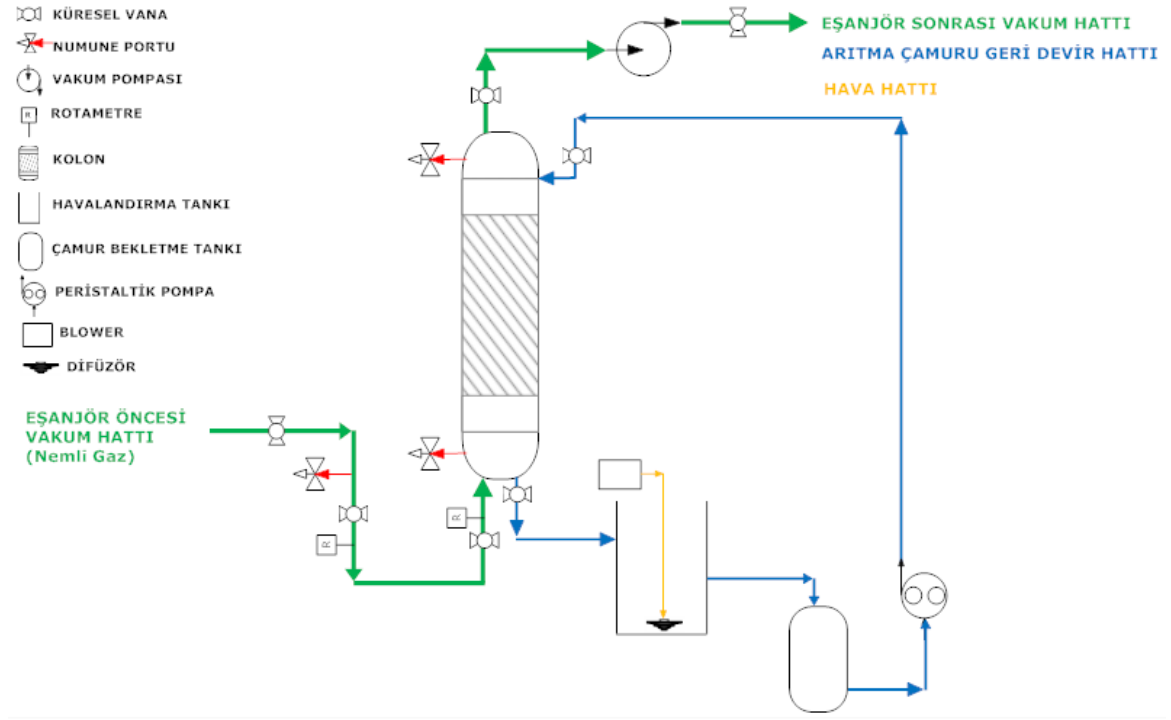
Şekil 4.17 İki kademeli tank sistemi ve ekipmanlar

Buna bağılı olarak tankların ve dolayısıyla kolonların yeri değıştirilmek zorunda kalınmıştır. Kolonların yeni konumu Şekil 4.18’de gösterilmiştir. Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’de gösterilen ve bir önceki denemede kolon içinde kullanılan malzemeler temizlenerek tekrardan kolona konulmuştur.



Şekil 4.18 Kolonların yeni konumu

Bu denemede kullanılmak üzere İSKİ Ömerli İçme Suyu Arıtma Tesisi'nden Demir (III) içeren sıvı çamur temin edilmiştir. Sistem 10.07.2014 tarihinde devreye alınmıştır. Kurulan bu sistemde 3,2 m³/saat debide çalıştırılmıştır. Bu sisteme ait P&ID tasarımı Şekil 4.19'da gösterilmiştir.



Şekil 4.19 Demir (III) içeren arıtma çamuru ile H₂S giderim denemesinin P&ID tasarımı

Sistem devreye alındıktan sonra çamurun ilk tankta çöktüğü görülüp sisteme KNF marka N022AN.18 model blower bağlanmıştır (Şekil 4.20).



Şekil 4.20 Çalışmada kullanılan diğer blower

Blower 15 dakika çalışıp 15 dakika duracak şekilde ayarlanmıştır. Yeni blowerın bunun ilk tankta çamurun çökmesini engellediği ikinci tankta çökmenin olduğu görülmüştür. 15.07.2014 tarihinde saat 13:00'da blower çalışma süresi 30 dakikaya çıkarılmıştır.

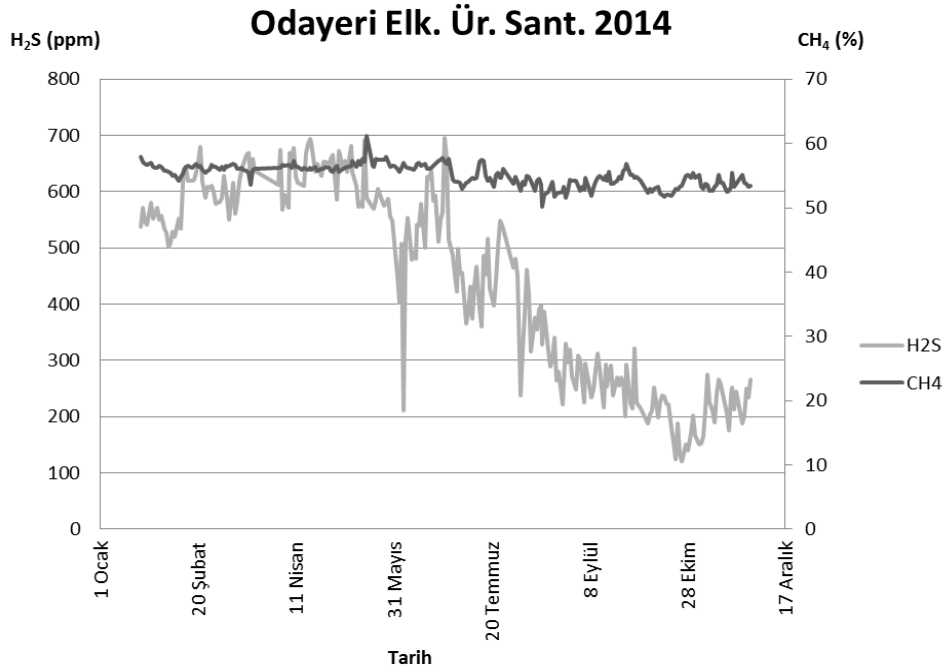
Demir içeren karışımlarda H_2S gideriminde pH önemli bir faktördür. Bu çalışmada kullanılan çamurun pH'sı 6,6 olarak ölçülmüştür. H_2S giderim veriminin artırılması için pH'nın kontrol edilmesi ve ayarlanması gerekmektedir. Bu sebeple kireç ile manuel olarak pH ayarı yapılması uygun görülmüştür. Genel olarak $pH > 8,5$ olacak şekilde kireç ile ayarlama yapılmıştır.



DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER

5.1 Çöp Gazı Özellikleri

Çalışmanın yapıldığı Odayeri Elektrik Üretim Santrali'nde enerji çevrim sistemine beslenen gaz kalitesi ölçümü ($\%CH_4$, $\%CO_2$ ve $\%O_2$) sürekli olarak sabit gaz analiz cihazı ile izlenmektedir. Ancak ölçülebilen parametreler içinde H_2S 'ün olmaması sebebiyle bu çalışmada da kullanılan portatif gaz analiz cihazı ile yıl içinde ana gaz hattındaki gaz kalitesi H_2S 'ü içerecek şekilde takip edilmeye başlanmıştır. Bu ölçümler booster sonrası ana hatta (basınç hattı) ve her gün saat 08:00-08:30 aralığında yapılmıştır. Tesise ait CH_4 ve H_2S 'ün yıl içindeki değişimi Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Odayeri tesisi metan ve hidrojen sülfürün yıl içindeki değişimi

5.2 Demir (III) İçeren Arıtma Çamuru

İSKİ'den alınan Demir (III) içeren sıvı arıtma çamuruna ait yapılan analiz sonuçları Çizelge 5.1'de gösterilmiştir. Analizler standart metotlara göre yapılmıştır.

Çizelge 5.1 Demir (III) içeren arıtma çamuruna ait analiz sonuçları

Parametre	Birim	Değer
Nem İçeriği	%	99,4
Katı Madde	mg/L	5.845
Organik Madde	mg/L	1.475
Fe ⁺³ Konsantrasyonu	mg/L	14

5.3 Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen ölçüm sonuçlarıyla anlık verim hesapları yapılmıştır. Çizelge 5.2'de her bir çalışmaya ait minimum ve maksimum giderim verimleri gösterilmiştir.

Çizelge 5.2 Denemelere ait maksimum ve minimum giderim verimleri

Malzeme	Gaz Türü	Debi (m ³ /saat)	Verim (%)		Çalışılan Gün Sayısı
			Maksimum	Minimum	
Aktif Karbon	Kuru Gaz	5	97,1	20,4	32
Aktif Karbon	Kuru Gaz	10	92,1	11,1	32
Aktif Karbon	Nemli Gaz	5	97,9	25,6	43
Aktif Karbon	Nemli Gaz	10	98,1	7,4	43
Demir (III) Hidroksit	Nemli Gaz	3,2	87,3	51,6	3
Demir (III) İçeren A. Çamuru	Nemli Gaz	3,2	71,5	25,1	8

Literatürde birçok farklı izoterm modeli bulunmaktadır. Bunlar içinden en çok kullanılanları Langmuir ve Freundlich izotermidir. Langmuir modeli adsorpsiyon yüzeyinin tamamının homojen olduğu kabulüyle elde edilmektedir. Freundlich izotermi ise yüksek oranda heterojen yüzeylere uygundur.

Bu çalışma kapsamında verilerin değerlendirilmesinde de Langmuir ve Freundlich izotermi kullanılmıştır. Çizelge 5.3’de bu iki izoterme ait eşitlikler ve parametrelerin açıklamaları verilmiştir.

Çizelge 5.3 Çalışmada kullanılan izotermi

İzoterm	Model
Langmuir	$q_e = X/M = \frac{Q_0 \cdot k_L \cdot C_e}{1 + k_L \cdot C_e}$
Freundlich	$q_e = k_f \cdot C_e^{1/n}$

Bu eşitliklerdeki parametreler şunlardır;

- $q_e = X/M$ = Adsorpsiyon kapasitesi (mg/g aktif karbon),
- C_e = adsorpsiyon sonrası çözeltide kalan maddenin konsantrasyonu (mg/L),
- Q_0 = maksimum doygunluk kapasitesi (mg/g),
- k_L = Langmuir sabiti,
- k_f = Freundlich sabiti,
- $1/n$ = Freundlich sabiti.

Langmuir ve Freundlich izotermiinin katsayıları eşitliklerin lineerize edilmesiyle bulunabilmektedir. Ancak hem deneysel verilere en uygun eğrinin hem de elde edilen eğriye ait performans indikatörlerinin elde edilmesi gerektiğinden Özkaya’nın [66] kullandığı şekil ile lineer olmayan regresyon yöntemi kullanılmıştır.

İzotermiinin oluşturulabilmesi ve değerlendirmenin daha sağlıklı yapılabilmesi için elde edilen ölçüm sonuçlarından günlük ortalama giderim verimi hesaplamaları yapılmıştır. Ardından izotermiine ait hesaplamalar yapılmıştır.

İzotermiine ait hesaplamalar yapıldıktan sonra her bir denemeye ait veriler MATLAB R2013a programına aktarılmıştır. Ardından deneysel verilere en uygun eğri bulunmuştur. Verilere uyan eğrinin bulunması sonrası izoterm katsayıları ve bu eğriye ait performans indikatörleri bulunmuştur. Uydurulan eğrinin performansını belirlemek için hataların kareler toplamı (SSE), determinasyon katsayısı (R^2) ve ortalama karesel

hatanın karekökü (RMSE) çıktı modeli sonuçları yardımıyla MATLAB R2013a tarafından hesaplanmıştır.

Langmuir izotermine ait katsayılar ve oluşturulan modele ait performans indikatörleri Çizelge 5.4’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.4 Langmuir izotermine ait katsayılar ve performans indikatörleri

Çalışılan Sistem	Debi (m ³ /saat)	Q ₀	k _L	SSE	R ²	RMSE
Aktif Karbon&Kuru Gaz	5	239,1	1,121	749,7	0,9355	6,641
Aktif Karbon&Kuru Gaz	10	528,1	0,3934	497,3	0,9746	5,758
Aktif Karbon&Nemli Gaz	5	359,4	1,372	459,1	0,9777	6,775
Aktif Karbon&Nemli Gaz	10	694,4	0,5094	2162	0,9532	14,02
Demir (III) Hidroksit&Nemli Gaz	3,2	737,8	0,475	378,3	0,9343	13,75
Demir (III) içeren A.Ç.&Nemli Gaz	3,2	874,8	1,58	1479	0,9794	27,19

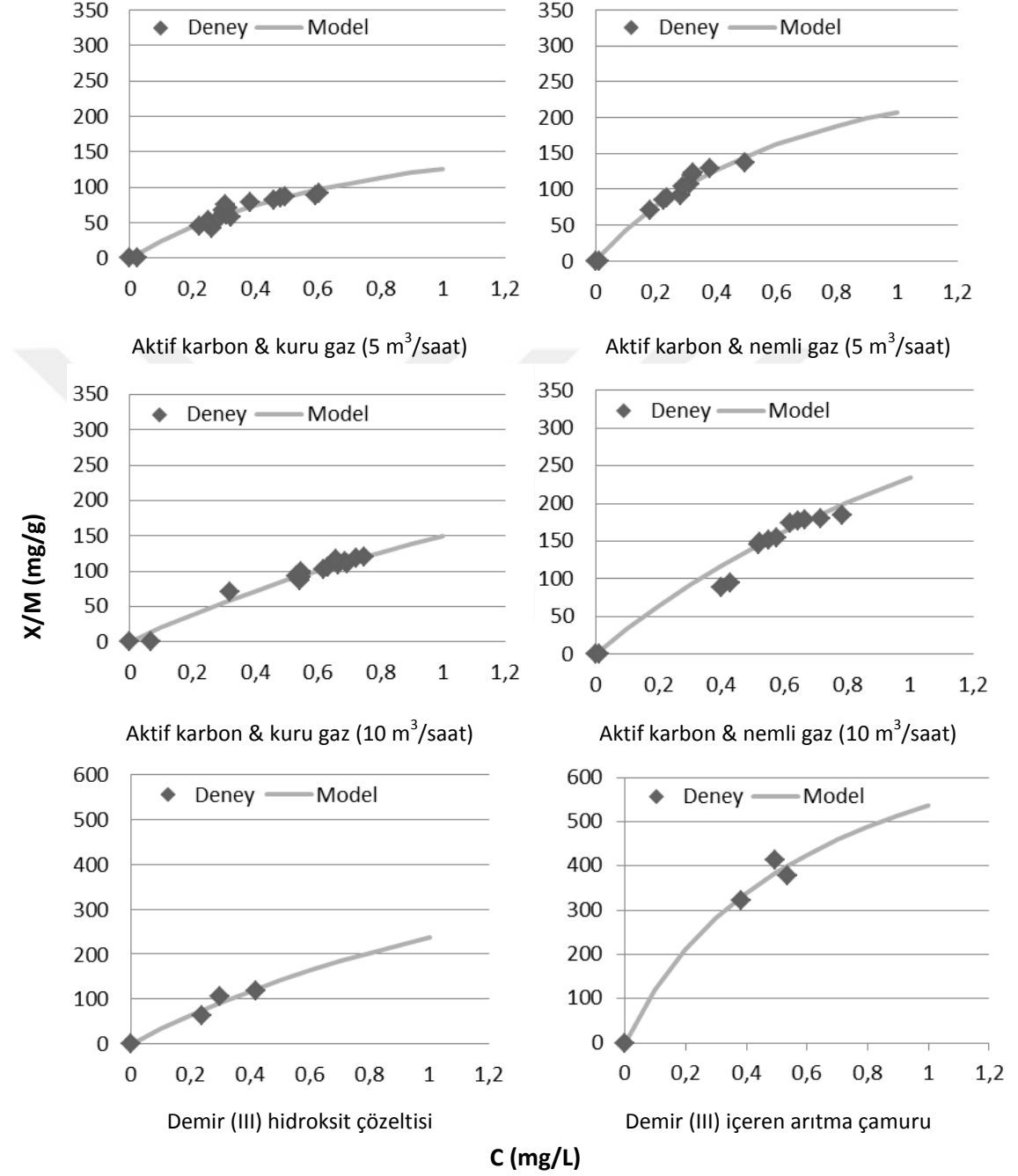
Freundlich izotermine ait katsayılar ve oluşturulan modele ait performans indikatörleri Çizelge 5.5’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.5 Freundlich izotermine ait katsayılar ve performans indikatörleri

Çalışılan Sistem	Debi (m ³ /saat)	k _f	n	SSE	R ²	RMSE
Aktif Karbon&Kuru Gaz	5	143,7	1,363	914	0,9214	7,332
Aktif Karbon&Kuru Gaz	10	151,6	1,245	105	0,9946	2,645
Aktif Karbon&Nemli Gaz	5	272,9	1,276	158,2	0,9923	3,978
Aktif Karbon&Nemli Gaz	10	253,1	1,17	2244	0,9515	14,28
Demir (III) Hidroksit &Nemli Gaz	3,2	267,1	1,123	389,8	0,9323	13,96
Demir (III) içeren A.Ç.&Nemli Gaz	3,2	578,8	1,706	1535	0,9787	27,71

Denemelerin Langmuir izotermi incelendiğinde en yüksek maksimum doygunluk kapasitesine sahip malzemenin demir (III) içeren arıtma çamuru (874,8 mg/g) olduğu görülmektedir. Demir (III) içeren çamurdan sonraki maksimum doygunluk değeri 737,8 mg/g ile demir (III) hidroksit ve nemli gaz kombinasyonuna aittir. Aktif karbon ile kuru gaz ve nemli gaz kombinasyonlarının maksimum doygunluk değerleri demir (III) içeren

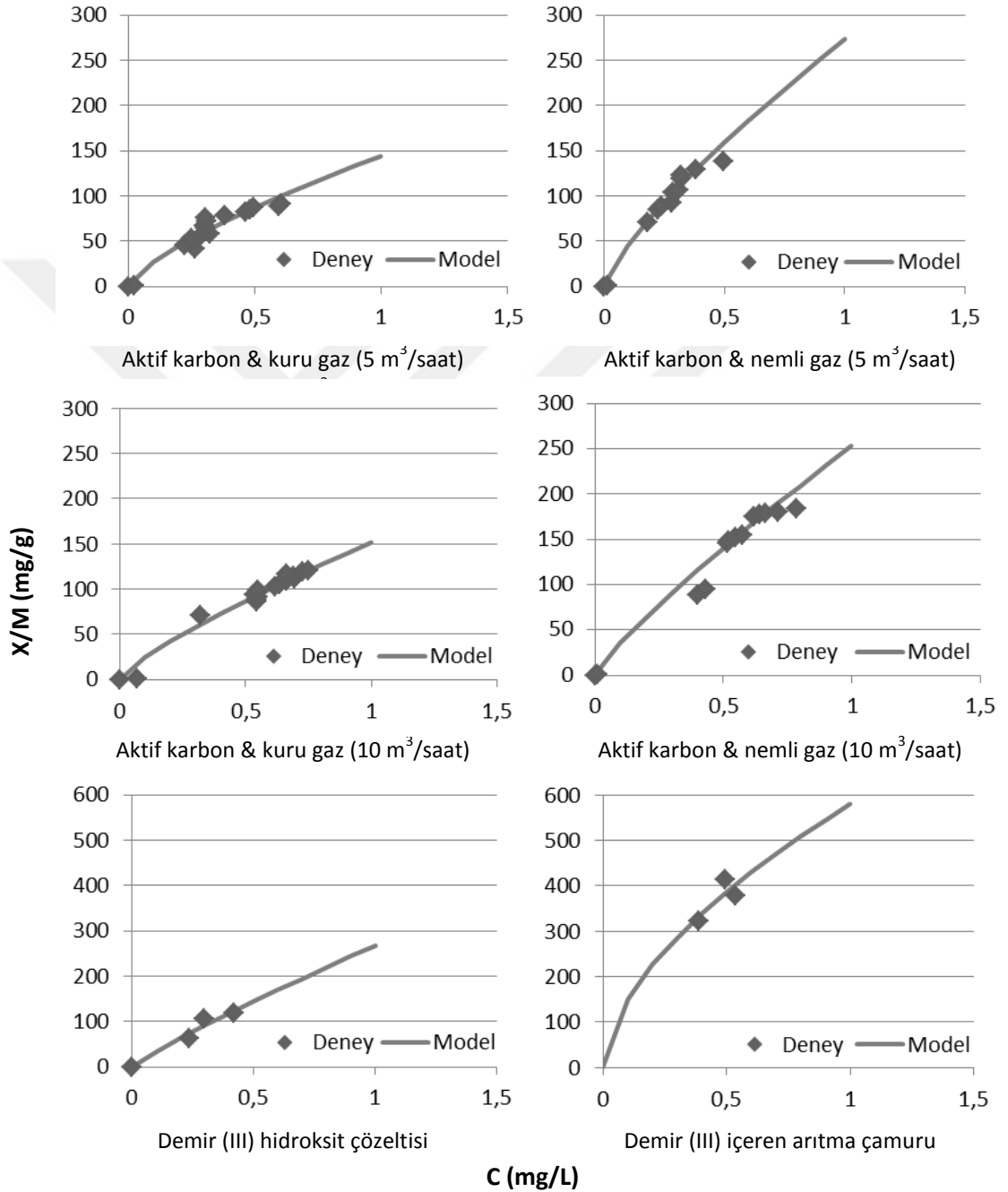
çözeltilerden daha düşük bulunmuştur. Langmuir izotermine göre oluşturulan model ve deney sonuçlarının gösterimi ve her bir denemenin çıktıları Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5.2 Langmuir izoterm modelleri ve deney sonuçları

Freundlich izotermi verileri incelendiğinde en yüksek Freundlich sabiti demir (III) içeren arıtma çamuru malzemesinde (578,8) bulunmuştur. Demir (III) içeren çamurdan

sonraki en yüksek Freundlich sabiti (272,9) aktif karbon ve nemli gaz (5 m³/saat) kombinasyonuna aittir. En yüksek üçüncü kombinasyon ise demir (III) hidroksit ve nemli gaz kombinasyondur ve Freundlich sabiti 267,7 olarak bulunmuştur. Freundlich izotermine göre oluşturulan model ve deney sonuçlarının gösterimi ve her bir denemenin çıktıları Şekil 5.3’de gösterilmiştir.



Şekil 5.3 Freundlich izoterm modelleri ve deney sonuçları

Genel olarak bakıldığında demir (III) içeren çözeltilerin adsorpsiyon kapasitelerinin aktif karbona göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Aktif karbon esaslı malzemeler işletmeye alındığı andan itibaren giderim verimi düşmektedir. Bu aktif karbonun en önemli dezavantajıdır. Ancak demir (III) içeren çözeltilerin kullanılması durumunda çözeltisinin rejenerasyonunun yapılabilmesi sebebiyle giderim verimi belirli seviyelerde tutulabilme imkanı bulunmaktadır. Ayrıca demir (III) içeren çözeltilerin adsorpsiyon kapasitelerinin aktif karbona göre daha yüksek olması bir diğer olumlu yanıdır.

Demir (III) hidroksit kimyasalı ve demir (III) içeren arıtma çamuruna ait H_2S 'ün demir ile olan absorpsiyonun 1. derece kinetiğe uyduğu düşünülerek hız sabitleri bulunmuştur.

$$dC/dt = -k.C \quad (5.1)$$

Burada;

$C = H_2S$ Konsantrasyonu (ppm)

$t =$ süre (dakika)

$k =$ absorpsiyon sabiti (1/dakika)

$$\ln (C/C_0) = -k. t \quad (5.2)$$

$$C/C_0 = \exp(-k.t) \quad (5.3)$$

Bu amaçla eldeki mevcut veriler MATLAB R2013a programında eğri uydurma metoduyla işlenerek en uygun eğri ve buna bağlı olarak hız sabiti bulunmuştur. Çizelge 5.6'de ilgili veriler özetlenmiştir.

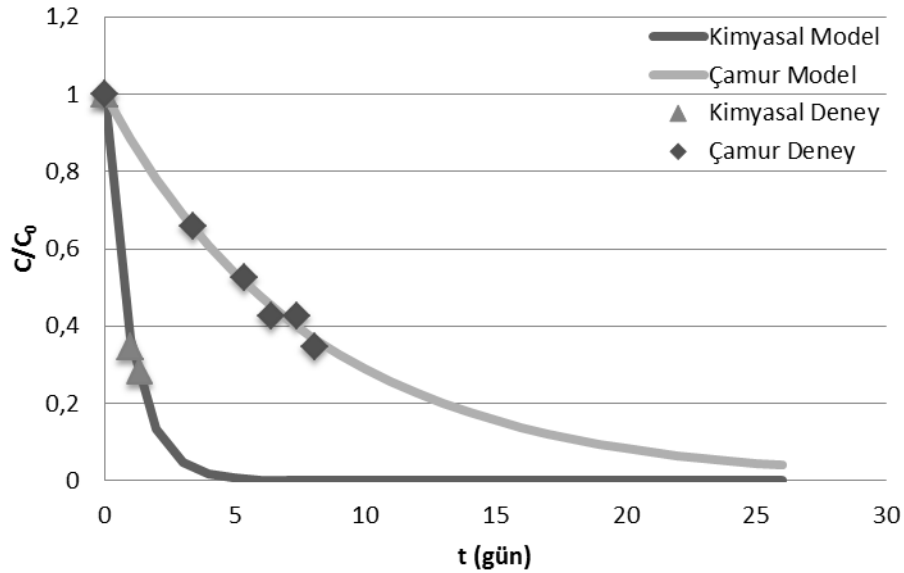
Çizelge 5.6 Adsorpsiyon hız sabiti ve performans indikatörlerine ait veriler

Malzeme	k (gün ⁻¹)	SSE	R^2	RMSE
Demir (III) hidroksit	1,0053	0,0009212	0,9942	0,03035
Demir (III) arıtma çamuru	0,1239	0,001897	0,9917	0,02178

Elde edilen verilere göre demir (III) hidroksit çözeltisinin absorpsiyon katsayısı demir (III) içeren arıtma çamurundan daha yüksek bulunmuştur. Buna göre demir (III) hidroksit çözeltisinin H_2S absorpsiyonunun daha uzun süreceği anlamına gelmektedir. Bir başka deyişle aynı şartlarda ve aynı sürede işletilen demir (III) çözeltisinin H_2S

giderim oranı daha fazla yani çıkış konsantrasyonu daha düşük olacaktır. Demir (III) hidroksit kimyasalında demir (III) içeren çamura göre daha fazla miktarda demir (III) olduğu göz önüne bulundurulursa bu durumun normal olduğu görülmektedir.

MATLAB R2013a programıyla bulunan eğriler ve deneysel veriler Şekil 5.4’de gösterilmiştir.



Şekil 5.4 Demir (III) içeren çözeltilere ait kinetik modeller ve deney sonuçları

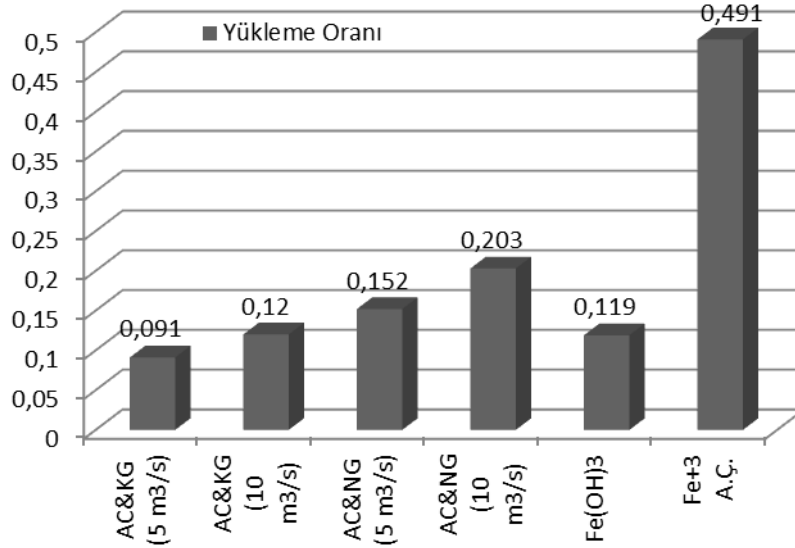
Yapılan denemelerde demir (III) çamur ile yapılan çalışmada pH parametresinin önemli olduğu ve giderim veriminin buna bağlı olarak değişebildiği gözlemlenmiştir. Bu sebeple pH'nın kontrol edilip ayarlandığı bir deneme gerçekleştirilmiştir. Ancak demir (III) hidroksit çözeltisinde pH kontrol edilmemiştir. Demir (III) hidroksit çözeltisinde pH kontrolü yapıp pH ayarlaması yapılması durumunda giderim veriminin azalma hızının düşeceği ön görülmektedir. İleride yapılabilecek bir çalışmanın bu şekilde düzenlenmesinin faydalı olacağı düşünülmektedir.

Yapılan çalışmaların verilerine bağlı olarak her bir denemenin yükleme oranları (g H₂S/g malzeme) olarak hesaplanmış ve Şekil 5.5’de gösterilmiştir.

Yükleme oranları incelenecek olursa aktif karbon ve kuru gaz ile yapılan denemelerin yükleme oranları 0,091 ve 0,12 g H₂S/ g aktif karbon olarak bulunmuştur. Abatzoglou vd. [67] çalışmasında kaynağında bu farklı üretilmiş aktif karbonlar için 0,02 – 0,2 g H₂S/g aktif karbon olarak verilmiştir. Elde edilen değer literatürle uyumludur. Nemli gaz

ile yapılan çalışmalarda kuru gaza göre gazdaki nemin kolonda ve aktif karbonda birikmesi sonucu bir miktar H_2S 'ün bu yolla giderildiği düşünülmektedir. Bu sebeple elde edilen yükleme oranı kuru gaza göre daha yüksek olduğu düşünülmektedir.

Yükleme Oranı



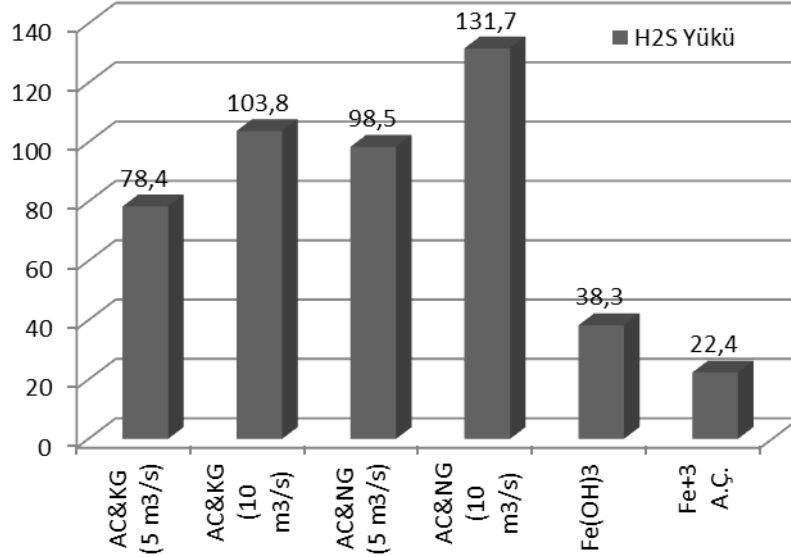
Şekil 5.5 Denemelerin yükleme oranları

Demir (III) içeren çözeltilerde ise bu değer $g H_2S/g Fe^{+3}$ olarak hesaplanmıştır. Demir (III) hidroksit çözeltisi ile yapılan çalışma bu değer $0,119 g H_2S/g Fe^{+3}$ olup demir (III) içeren arıtma çamurunda ise $0,491 g H_2S/g Fe^{+3}$ olarak bulunmuştur. Demir (III) hidroksit çözeltisinde demir (III) içeren arıtma çamuruna göre daha fazla miktarda demir (III) olmasına rağmen yükleme oranının düşük çıkma sebebi kimyasalın rejenerasyonunun tam olarak yapılamamış olmasıdır. Kimyasalın pH'sının kontrol edilmediği düşünüldüğünde elde edilen sonucun tutarlı olduğu anlaşılabacaktır. Bir sonraki yapılacak çalışmalarda pH kontrol edilerek demir (III) hidroksit çözeltisi kullanılırsa demir (III) içeren çamurdan daha yüksek yükleme değeri elde edileceği düşünülmektedir.

Yükleme oranı birim miktarda H_2S giderimi için hangi malzemeden ne kadar kullanılacağını belirlemektedir. Buna göre yükleme oranı yüksek olan bir malzeme, yükleme oranı düşük malzemeye göre daha az miktar ile aynı işlevi yapabilmektedir.

Yapılan çalışmaların verilerine bağı olarak her bir denemedeki H₂S yükü (g H₂S/m³ kolon.saat) olarak hesaplanmış ve Şekil 5.6'da gösterilmiştir.

H₂S Yüğü



Şekil 5.6 Denemelerdeki H₂S yükleri

Buna göre en yüksek H₂S yüklemesi aktif karbon ve nemli gaz ile 10 m³/saat debi ile işletilen kolonda uygulanmıştır. Aktif karbon ile yapılan denemelerdeki H₂S yükü demir (III) içeren çözeltilerden daha yüksek bulunmuştur. demir (III) hidroksit çözeltisinin H₂S yükü demir (III) içeren arıtma çamurundan daha yüksek bulunmuştur. Bunun sebebi demir (III) hidroksit çözeltisinin içerisindeki demir (III) miktarının demir (III) içeren arıtma çamurundan daha fazla olmasından dolayıdır.

H₂S yükü birim miktarda H₂S gideriminin yapılabilmesi için gerekli tank hacmini vermesinden dolayı önemlidir. Buna göre H₂S yükü yüksek olan bir malzeme, H₂S yükü düşük olan bir malzeme veya sisteme göre daha küçük tank ile hacmi ile giderim yapılabilmektedir.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Katı atıkların miktarının fazlalığı ve sürekliliği sebebiyle yönetimi ve bertarafı her geçen gün önem kazanmaktadır. Katı atıkların bertarafında en çok kullanılan yöntem düzenli depolama metotudur. Düzenli depolama ile katı atıklar bertaraf edilirken aynı zamanda enerji içerisine sahip büyük çoğunluğunun metan gazı olduğu çöp gazı üretilmektedir. Depolanan atığın bileşimi, depo sahasının işletimi vd. parametrelere bağlı olarak çöp gazının içeriği değişebilmektedir.

Çöp gazının bileşimi ve miktarına göre enerji üretim ve/veya bertaraf tesisi yapılmaktadır. Bu tesislerin fizibil olabilmemesinin ön koşulu yapılan ön görülerin gerçekleşmesine bağlıdır. Bunu etkileyen iki unsur ise oluşacak gaz miktarının belirlenmesi ve enerji üretim sisteminin bakım-onarım maliyetidir. Çöp gazı büyük oranda CH_4 ve CO_2 'den oluşmasına rağmen iz miktarda ve fazla sayıda da iz kirletici içermektedir. Bu iz kirleticiler enerji çevrim sistemlerine olumsuz etki yaparak malzeme ve ekipmanların ömrünü kısaltarakmakta ve motor yağının kısa sürede işlevsiz hale gelmesine sebep olarak işletme maliyetini arttırmaktadır. Ayrıca enerji çevrim sisteminin bakım-onarım sebebiyle çalışmaması sebebiyle üretim kaybı da yaşanmaktadır.

Çöp gazında bulunabilen iz kirleticilerin en önemlileri siloksan ve hidrojen sülfürdür. Hidrojen sülfür çöp gazındaki nem ile birleşerek sülfürik asit oluşturmakta bu da enerji çevrim sistemlerinde korozyon, aşınma ve motor yağı oksitlenmelerine sebep olmaktadır. İşletme maliyetlerini arttıran ve enerji çevrim sisteminin emre amadelik oranını düşürerek üretim kayıplarına sebep olmaktadır. Bu sebeple hidrojen sülfürün ya çöp gazından giderilmesi veya enerji çevrim sisteminde tolere edilebilmesi

gerekmektedir. Burada hidrojen sülfür miktarına göre işletmeden işletmeye değişken alternatifler ve uygulamalar söz konusudur.

Bu çalışma kapsamında çöp gazındaki hidrojen sülfürün işletme maliyeti düşük, işletilmesi kolay ve düşük maliyetli bir malzeme ile arıtılabilirliği incelenmiştir. Bu amaçla tam ölçekli tesiste pilot ölçekli bir çalışma yapılacak sistem dizayn edilerek üç farklı malzeme ve değişken kombinasyonlar ile denemeler yapılmıştır. Bu amaçla 225 mm çaplı HDPE borudan yapılma iki adet kolon sistemi imal ettirilmiştir. Denemelerde aktif karbon, demir (III) hidroksit çözeltisi ve demir (III) içeren arıtma çamuru kullanılmıştır. Yapılan denemelerde pilot ölçekli tesisin başarılı olması durumunda ölçeğinin büyütülerek tam ölçekli sisteme entegrasyonu amaçlanmıştır. Bu amaçla yapılan denemeler nemli ve nemi alınmış gaz kombinasyonları ile yapılmıştır.

Aktif karbon esaslı malzemelerin yüksek yüzey alanı ve bu sebeple küçük tank hacmi sunmaları önemli bir avantajdır. Ancak aktif karbon malzemeler genel olarak pahalıdır ve giderim performansı işletmeye alındığı andan itibaren kapasitesini doldurana kadar azalmaktadır. Her ne kadar üreticiler aktif karbonların rejenerasyonunun yapılabileceğini söyleselerde büyük ölçekli tesislerde pratik olarak bunun yapılması mümkün olmamaktadır.

Yapılan çalışmanın sonuçları değerlendirildiğinde genel olarak demir (III) içeren çözeltilerin H₂S giderme performansının aktif karbon malzemesine göre daha iyi olduğu belirlenmiştir. Demir (III) içeren çözeltilerden ise demir (III) içeren arıtma çamurunun performansı daha iyi olarak belirlenmiştir. Ancak demir (III) hidroksit çözeltisi ile yapılan çalışmanın sonuçları da kötü sayılmayacak kadar iyidir. pH kontrolünün yapılabileceği ve pH dozajlamasının otomatik yapılabileceği bir sistemde demir (III) hidroksit çözeltisi ile H₂S gideriminin daha iyi olacağı düşünülmektedir.

Yapılan değerlendirmeler sonucu demir (III) içeren arıtma çamurundaki demir konsantrasyonunun demir (III) hidroksit çözeltisine göre daha az miktarda olması sonucu daha büyük hacmi tank gerektirdiği belirlenmiştir. Ayrıca belirli sürelerde çamur alımında yapılacağı düşünüldüğünde ilgili arıtma tesisinin enerji çevrim santraline yakın yerlerde olması gerektiği düşünülebilir. Bu tarz durumlarda maliyet

analizinin iyi bir şekilde yapılması ve projelendirmenin bu sonuca göre yapılması önerilmektedir.

Bir atık olan arıtma çamurunun başka bir kirleticiyi giderme şansının olması oldukça önemlidir. Çünkü bu sayede başka bir malzemeden atık oluşumu önlerken mevcut kaynakların korunabilmesi ve/veya değerlendirilebilmesi mümkün olacaktır.

Yapılan çalışmalar ışığında demir (III) içeren arıtma çamurunun belirli ön işlemlerden geçirilerek demir (III) konsantrasyonunun arttırılması sonucu H_2S gideriminde kullanılabilirliği incelenmesi gereken bir husustur. Bu yönde yapılacak çalışmaların önemli olacağı düşünülmektedir.

Yapılması düşünülen bir H_2S giderim sisteminde temel olarak giderim ünitesinin işletme ve yatırım maliyetleri önemli bir unsur olup bir diğer yandan H_2S gideriminin yapılması ile elde edilecek kazançlarında net olarak belirlenmiş olması gereklidir. Eğer bu yapılamaz ise H_2S giderim sistemi ve malzemesinin seçiminde net bir karar alınamayacağı düşünülmektedir. Ayrıca literatürde maliyeti esas alarak enerji çevrim sisteminde H_2S tolere edilebileceği opsiyonlar üzerinde de durulmaktadır. Burada işletmenin alacağı kararlar ve işletim stratejileri ön plana çıkmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Skerman, A., Collman, G., Sohn, J. H. ve Pott, L., (2012). Options for Biogas Cleaning and Use On-farm, Rural Industries Research and Development Corporation, Australia.
- [2] Tchobanoglous, G. ve Kreith, F., (2002). "Handbook of Solid Waste Management-Second Edition" McGraw Hill, Inc., USA.
- [3] T.C. Resmi Gazete, Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği, (20814). 14.03.1991, 16.
- [4] Demir, A., Özkaya, B., Bilgili, M.S., Debik, E., Günay, A., Kanat, G. ve Karaaslan, Y., (2001), "Odayeri Düzenli Katı Atık Depo Sahasında Sızıntı Suyu ve Depo Gazı Oluşumu", Araştırma Projesi Nihai Raporu, İSTAÇ A.Ş.'ye, Ekim 2001.
- [5] Türkiye İstatistik Kurumu, Belediye Atık İstatistikleri 2012, <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=16170>, 15 Eylül 2014.
- [6] D-Waste, (2013). Waste Atlas 2013, Yunanistan.
- [7] D-Waste, Waste Atlas, <http://www.atlas.d-waste.com>, 15 Eylül 2014.
- [8] Hoornweg, D. ve Bhada-Tata, P., (2012). What A Waste, Birinci Baskı, World Bank, Washington
- [9] Tchobanoglous, G., Theisen, H. ve Vigil, S.A., (1993). "Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues", McGraw Hill, Inc., USA.
- [10] Bilgili, M.S., (2006) Katı Atık Düzenli Depo Sahalarında Atıkların Aerobik Ve Anaerobik Ayrışması Üzerine Sızıntı Suyu Geri Devrinin Etkileri, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [11] Bilgili, M.S., (2002). Katı Atık Düzenli Depo Sahalarında Depo Gazı Oluşumunu Etkileyen Faktörlerin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [12] Daskalopoulos, E., Badr, O. ve Probet, S.D., (1997). "Economic and Environmental Evaluations of Waste Treatment and Disposal Technologies for Municipal Solid Waste", Applied Energy, 58 (4), 209-255.

- [13] Çalışkan, Y., (2013). Katı Atık ve Bertaraf Yöntemleri-Organik Madde İçeren Katı Atıkların Enerji Üretimi Amacıyla Anaerobik Kompostlaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
- [14] Saltabaş, F., Soysal, Y., Yıldız, Ş. ve Balahorli, V., (2009). "Evsel Katı Atık Termal Bertaraf Yöntemleri ve İstanbul'a Uygulanabilirliği", TÜRKAY 2009, 15-17 Haziran 2009, İstanbul.
- [15] Daskalopoulos, E., Badr, O., Probert, S.D., (1997), "An Integrated Approach to Municipal Solid Waste Management", Resources, Conservation and Recycling, 24:33-50.
- [16] T.C. Resmi Gazete, Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik, (27533), 26.03.2010, 1-9.
- [18] İSTAÇ, Düzenli Depolama, [http://www.istac.com.tr/hizmetler/belediye-atiklari-\(evsel-atiklar\)/duzenli-depolama.aspx](http://www.istac.com.tr/hizmetler/belediye-atiklari-(evsel-atiklar)/duzenli-depolama.aspx), 16 Eylül 2014.
- [18] ESMAP, 2004 Handbook for the Preparation of Landfill Gas to Energy Projects in Latin America and the Caribbean, The World Bank, Waterloo, Ontario.
- [19] Spokas K., Bogner J., Chanton J. P., Morcet M., Aran C., Graff C., Moreau-Le Golvan Y. ve Hebe I., (2006)., "Methane Mass Balance at Three Landfill Sites: What is the Efficiency of Capture by Gas Collection Systems? Waste Management 26: 516-525.
- [20] Uyanık, İ. (2011). Katı Atık Depo Sahalarında Meteorolojik Faktörlerin Depo Gazı Oluşumu Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [21] Ham, R.K., ve Barlaz, M.A., (1989). Measurement and Prediction of Landfill Gas Quality and Quantity, in Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact, ed. T. H. Christensen, R. Cossu, and R. Stegmann, Academic Press, New York.
- [22] Özkaya, B., (2004). Katı Atık Depo Sahalarında Sızıntı Suyu Geri Devrinin Atıkların Ayrışması ve Sızıntı Suyu Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [23] Çetindemir, H. M., (2012). Katı Atık Düzenli Depolama Sahalarında Depo Gazı Tahmin Modellerine Alternatif Model Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [24] Warith, M.A., (2002). "Solid Waste Management: New Trends in Landfill Design", Emirates Journal for Engineering Research, 8(1), 61-70.
- [25] Christensen, T.H. ve Kjeldsen, P., (1989). "Basic Biochemical Processes in Landfills", In Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact, Editors: Christensen, T.H., Cossu, R., Stegmann, R., Academic Press, London, UK.
- [26] Speece, R.E., (1996). "Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewaters", Archae Press, Nashville, Tennessee, USA.

- [27] Kiriş, A. ve Saltabaş, F., (2011). “Katı Atık Düzenli Depolama Sahalarında Depo Gazı (LFG) Yönetimi ve İstanbul Uygulamaları”, YÜ Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, Sigma 3, 209-218.
- [28] U.S. Environmental Protection Agency (EPA), (2012). International Best Practices Guide for Landfill Gas Energy Projects, Birinci Baskı, Washington.
- [29] Özkaya, B., Demir, A., ve Bilgili, M. S., (2007). “Neural Network Prediction Model For the Methane Fraction in Biogas From Field-Scale Landfill Bioreactors”, Environmental Modelling and Software, 22:815-822.
- [30] Özcan, H. K., Uçan, O. N., Şahin, U., Borat, M. ve Bayat, C., (2006). “Appling Simple Numerical Model To Predict Methane Emission From Landfill”, Journal of Scientific & Industrial Research, 65:128-134.
- [31] Eren, S., (2010). Evsel Atıklardan Elde Edilen Elektrik Enerjisinin Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Tahmini, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [32] The International Solid Waste Association (ISWA), (2010). Landfill Operational Guidelines, İkinci Baskı.
- [33] Terraza, H. ve Willumsen, H., (2009). Guidance Note on LFG Capture and Utilization, Birinci Baskı, Inter-American Development Bank, Washington.
- [34] Alman Yenilenebilir Hammaddeler İhtisas Ajansı (FNR), (2010). Biyogaz Kılavuzu Üretimden Kullanıma, Beşinci Baskı, Gülzow.
- [35] U.S. Environmental Protection Agency EPA, (2009). Landfill Gas Energy Project Development Handbook, Birinci Baskı, Washington.
- [36] British Columbia Ministry of Environment, (2010). Landfill Gas Management Facilities Design Guidelines, Richmond.
- [37] UK Environment Agency, (2010). Guidance on Gas Treatment Technologies for Landfill Gas Engines, İkinci Baskı, Bristol.
- [38] Martin, J. H., (2008). A New Method to Evaluate Hydrogen Sulfide Removal from Biogas, Master Thesis, Biological and Agriculture Engineering, North Carolina State University, North Carolina.
- [39] Sevimoğlu, O. ve Tansel, B. (2012). “Effect Of Persistent Trace Compounds In Landfill Gas On Engine Performance During Energy Recovery: A Case Study”, Waste Management, 33:74-80.
- [40] Wheless, E. ve Pierce, J., “Siloxanes in Landfill and Digester Gas Update”, SWANA 27th LFG Conference, 22-25 Mart 2004, San Antonio.
- [41] Üresin, E., Saraç, H.İ., Sarioğlu, A., Ay, Ş., ve Akgün, F., (2014). “An experimental study for H₂S and CO₂ removal via caustic scrubbing system”, Process Safety and Environmental Protection, (baskıda).
- [42] Arespachaga, N., Valderrama, C., Mesa, C., Bouchy, L. ve Cortina, J.L., (2014). “Biogas deep clean-up based on adsorption Technologies for Solid Oxide Fuel Cell applications”, Chemical Engineering Journal, 225:593-603.

- [43] Ortiz, F. J. G., Aguilera, P. G. ve Ollero, P., (2014). "Biogas desulfurization by adsorption on thermally treated sewage-sludge", *Separation and Purification Technology*, 123:200-213.
- [44] Xu, X., Cao, X., Zhao, L. ve Sun, T., (2014). "Comparison of sewage sludge- and pig manure-derived biochars for hydrogen sulfide removal", *Chemosphere*, 111:296-303.
- [45] Mostbauer, P., Lombardi, L., Oliveri, T. ve Lenz, S., (2014). "Pilot scale evaluation of the BABIU process – Upgrading of landfill gas or biogas with the use of MSWI bottom ash", *Waste Management*, 34:125-133.
- [46] Kalapala, S., (2014). Removal of Hydrogen Sulfide from Landfill Gas Using a Solar Regenerable Adsorbent, Master Thesis, Youngstown State University, Youngstown.
- [47] Sarperi, L., Surbrenat, A., Kerihunel, A. ve Chazarenc, F., (2014). "The use of an industrial by-product as a sorbent to remove CO₂ and H₂S from biogas", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2:1207-1213.
- [48] Bergersen, O. Ve Haarstad, K., (2014). "Treating landfill gas hydrogen sulphide with mineral wool waste (MWW) and rod mill waste (RMW)", *Waste Management*, 34:141-147.
- [49] Rasi, S., Lantelä, J. ve Rintala, J., (2014). "Upgrading landfill gas using a high pressure water absorption process", *Fuel*, 115:539-543.
- [50] Moreno, A.M., Bloom, D., Singh, P., Fantry, J., Gorton, S., ve Mhadeshwar, A., (2013). "Chapter 2 – A Novel Enzymatic Technology for Removal of Hydrogen Sulfide from Biogas", *Batteries, Hydrogen Storage and Fuel Cells*, 17-32.
- [51] Li, L., Han, Y., Yan, X. ve Liu, J., (2013). "H₂S removal and bacterial structure along a full-scale biofilter bed packed with polyurethane foam in a landfill site", *Bioresource Technology*, 147:52-58.
- [52] Cherosky, P. ve Li, Y., (2013). "Hydrogen sulfide removal from biogas by bio-based iron sponge", *Biosystems Engineering*, 114:55-59.
- [53] Lin, W. C., Chen, Y. P. ve Tseng, C. P., (2013). "Pilot-scale chemical–biological system for efficient H₂S removal from biogas", *Bioresource Technology*, 135:283-291.
- [54] Krischan, J., Makaruk, A. ve Harasek, M., (2012). "Design and scale-up of an oxidative scrubbing process for the selective removal of hydrogen sulfide from biogas", *Journal of Hazardous Materials*, 215-216:49-56.
- [55] Deshmukh, G. M., Shete, A. ve Pawar, D.M., (2012). "Oxidative Absorption of Hydrogen Sulfide using Iron-chelate Based Process: Chelate Degradation", *Journal of Analytical & Bioanalytical Techniques*, 3:138.
- [56] Vakili, M., Gholami, Z. ve Gholami, F., (2012). "Removal of Hydrogen Sulfide from Gaseous Streams by a Chemical Method using Ferric Sulfate Solution", *World Applied Sciences Journal* 19:241-245.

- [57] Baspinar, A. M., Turker, M., Hocalar, A. ve Ozturk, I., (2011). "Biogas desulphurization at technical scale by lithotrophic denitrification: Integration of sulphide and nitrogen removal", *Process Biochemistry*, 46:916-922.
- [58] Huertas, J.I., Giraldo, N. ve Izquierdo, S., (2011), "Chapter 7 Removal of H₂S and CO₂ from Biogas by Amine Absorption", *Mass Transfer in Chemical Engineering Processes*, Dr. Jozef Markoš (Ed.), ISBN: 978-953-307-619-5
- [59] Sigot, L., Ducom, G., Benadda, B. ve Labouré, C., (2014). "Adsorption of octamethylcyclotetrasiloxane on silica gel for biogas purification", *Fuel*, 135:205-209.
- [60] Gislón, P., Galli, S. ve Monteleone, G., (2013). "Siloxanes removal from biogas by high surface area adsorbents", *Waste Management*, 33:2687-2693.
- [61] Sevimoğlu, O. ve Tansel, B., (2013). "Composition and source identification of deposits forming in landfill gas (LFG) engines and effect of activated carbon treatment on deposit composition", *Journal of Environmental Management*, 128:300-305.
- [62] Ajhar, M., Bannwarth, S., Stollenwerk, K. H., Spalding, G., Yüce, S., Wessling, M. ve Melin, T., (2012). "Siloxane removal using silicone–rubber membranes", *Separation and Purification Technology*, 89:234-244.
- [63] Piechota, G., Hagmann, M. ve Buczkowski, R., (2012). "Removal and determination of trimethylsilanol from the landfill gas", *Bioresource Technology*, 103:16-20.
- [64] Läntelä, J., Rasi, S., Lehtinen, J. ve Rintala, J., (2012). "Landfill gas upgrading with pilot-scale water scrubber: Performance assessment with absorption water recycling", *Applied Energy*, 92:307-314.
- [65] T.C. Resmi Gazete, Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun, (25819), 18.05.2005, 9389.
- [66] Özkaya, B., (2006). "Adsorption and desorption of phenol on activated carbon and a comparison of isotherm models", *Journal of Hazardous Materials*, B129:158-163.
- [67] Abatzoglou, N. ve Boivin, S., (2008). "A review of biogas purification processes", *Biofuels, Bioproducts & Biorefining*, 3:42–71.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Fatih GÜRELİ
Doğum Tarihi ve Yeri : 06.10.1987 / Eminönü
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : fgureli@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Çevre Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2011
Lisans	Kimya	Yıldız Teknik Üniversitesi	2010
Lise	Fen Bilimleri	Kemal Hasoğlu Lisesi	2005

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2013 - ...	Ortadoğu Enerji A.Ş.	Gaz Üretim Uzman Yrd.
2011 - 2012	Türk Silahlı Kuvvetleri	İkmal Asteğmen
2005 - 2006	Fatih Halı	Yönetici Asistanı