

**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**BİYOGAZ SAFLAŞTIRMA VE TAŞIT YAKITI OLARAK KULLANMA
TEKNOLOJİLERİ**

Yavuz Selim BOYACI

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ŞANLIURFA
2024**

**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**BİYOGAZ SAFLAŞTIRMA VE TAŞIT YAKITI OLARAK KULLANMA
TEKNOLOJİLERİ**

Yavuz Selim BOYACI

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ŞANLIURFA
2024**

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı	3
1.2. Kavramsal Çerçeve	5
1.2.1. Biyogaz	5
1.2.2. Biyogaz Kaynakları (Biyokütle)	6
1.2.2.1. Tarımsal biyogaz hammaddeleri	7
1.2.2.1.1. Hayvancılık	7
1.2.2.1.2. Bitki atıkları	9
1.2.2.2. Endüstriyel biyogaz hammaddesi	10
1.2.2.3. Kentsel Atık Biyogaz Hammaddesi	11
1.2.2.3.1. Kaynaktan ayrılmış organik atıklar	11
1.2.2.3.2. Kanalizasyon çamuru	12
1.2.2.4. Aquatik (Sucul) Biyokütle	13
1.2.3. Biyogaz hammaddesinin özellikleri	15
1.2.3.1. Uygunluk ve kullanılabilirlik	15
1.2.3.2. Sindirilebilirlik	15
1.2.3.3. Rahatsız edici etkileri olan safsızlıklar	16
1.2.3.4. İnhibitörler	16
1.2.3.5. Metan verim artırıcıları olarak hammadde	17
1.2.3.6. Hammaddenin tesis işletimi üzerindeki etkisi	17
1.2.3.7. Hammadde tanımı ve beyanı	17
1.2.4. Biyogaz üretimi	18
1.2.5. Biyogaz Arıtma Yöntemleri	21
1.2.5.1. Water Scrubbing (Suyla yıkama)	21
1.2.5.2. Kimyasal Scrubbing	23
1.2.5.3. Fiziksel Scrubbing	25
1.2.5.4. Basınç Salımlı Adsorpsiyon	26
1.2.5.5. Membran ayırma tekniği	26
1.2.5.6. Biyolojik Teknikler	29
1.2.5.7. Kriyojenik Ayırma	30
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	33
3. GEREÇ ve YÖNTEM	44
3.1. Siverek Atık Su Arıtma Tesisi	44
3.2. Siverek Atık Su Arıtma Tesisindeki Üniteler ve Özellikleri	47
3.2.1. Mekanik Arıtma	47
3.2.1.1. Kaba Izgaralar	47
3.2.1.2. İnce Izgaralar	48
3.2.1.3. Kum ve Yağ Giderme Havuzu	50
3.2.1.4. Ön Çökeltim Havuzu	51
3.2.1.5. Ön Çamur Pompa İstasyonu	52
3.2.1.6. Koku Giderim Ünitesi	53
3.2.2. Biyolojik Arıtma	54
3.2.2.1. Havalandırma Havuzu Dağıtım Yapısı	54
3.2.2.2. Havalandırma Havuzu	55
3.2.2.3. Blower İstasyonu	56

3.2.2.4.	Son Çökeltim Havuzu Dağıtım Yapısı.....	57
3.2.2.5.	Son Çökeltim Havuzu.....	58
3.2.2.6.	Geri Devir Pompa İstasyonu.....	60
3.2.2.7.	Çıkış Suyu.....	61
3.2.2.8.	Servis Suyu Sistemi.....	61
3.2.2.9.	İçme Suyu ve Yangın Suyu Pompa İstasyonu.....	62
3.2.3.	Çamur Arıtma.....	63
3.2.3.1.	Graviteli Çamur yoğunlaştırma.....	63
3.2.3.2.	Mekanik Yoğunlaştırma Ünitesi.....	64
3.2.3.3.	Mix Çamur Tankı.....	65
3.2.3.4.	Anaerobik Çürütme Ünitesi (Digester).....	66
3.2.3.5.	Çürütülmüş Çamur Depolama Ünitesi.....	68
3.2.3.6.	Çamur Susuzlaştırma Ünitesi.....	69
3.2.3.7.	Süzüntü Suyu Pompa İstasyonu.....	70
3.2.3.8.	Biyogaz Ünitesi.....	71
3.2.3.9.	Desülfürizasyon Ünitesi.....	72
3.2.3.10.	Kojenerasyon (CHP) Ünitesi.....	74
3.2.3.11.	Dizel Jeneratör Ünitesi.....	75
3.3.	Siverek Atık Su Arıtma Tesisi Biyogaz Üretimi.....	75
3.4.	Çalışma İçin Kurulan Water Scrubber Sistemi.....	76
3.5.	Aquaflex PTFE Kaplı Membran Difüzör.....	85
4.	BULGULAR.....	87
4.1.	pH.....	95
4.2.	Alkalinite.....	98
4.3.	Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ).....	100
5.	TARTIŞMA.....	106
5.1.	Suyla Yıkama (Washing With Water).....	106
5.2.	Maliyet Analizi.....	108
6.	SONUÇLAR.....	111
6.1.	Üretim.....	113
6.2.	Saflaştırma.....	113
6.3.	Sıkıştırma (CNG) veya Sıvılaştırma (LNG).....	113
6.4.	Depolama ve Dağıtım.....	114
7.	ÖNERİLER.....	117
KAYNAKLAR		120
ÖZGEÇMİŞ	 Hata! Yer işareti tanımlanmamış.	

ÖZET

Doktora Tezi

BİYOGAZ SAFLAŞTIRMA VE TAŞIT YAKITI OLARAK KULLANMA TEKNOLOJİLERİ

Yavuz Selim BOYACI

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Sinan UYANIK
Yıl: 2024, Sayfa: 127

Dünya genelinde temiz su kaynaklarının azalması ve kullanım olanaklarının zorlaşması nedeniyle son zamanlarda arıtılmış atıksuların yeniden kullanımı son derece önem arz etmektedir. Çalışmada; biyogaz saflaştırma işleminde en yaygın olarak kullanılan ve işletme maliyeti en düşük olan water scrubbing yöntemi kullanılmıştır. Bu yüzden çalışmada atık su arıtma tesisindeki digesterlarda üretilen biyogazı saflaştırmak için yıkama suyu olarak temiz su yerine arıtılmış atıksu kullanılmıştır. Atık suyun, hem su ile yıkama tekniği ile biyogaz saflaştırılmasındaki verimliliği hem de arıtılmış atıksu üzerindeki Alkalinite, KOİ ve Ph, parametrelerine etkisi gözlemlenmiştir. Uygulamada uzun süreli yıkama işlemi gerçekleştirilmiş ve yıkama suyunun absorpsiyon verimi ile kullanım süresi arasındaki ilişkiyi gösteren verilerden grafik ve tablolar oluşturulmuştur. Çalışmamızda en iyi performans/verim 20°C sıcaklık, 10 L/dk biyogaz debisi ve 10 bar basınçta elde edilmiştir. Atık suyun tek sefer kullanılmasıyla metan konsantrasyonu %90 seviyelerine çıkarılmıştır. Karbondioksit ayırma işlemi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Biyogaz, metan, atık su anaerobik arıtma, biyogaz safsızlaştırma, su ile biyogaz yıkama

ABSTRACT

PhD Thesis

BIOGAS PURIFICATION AND TECHNOLOGIES FOR USING AS VEHICLE FUEL

Yavuz Selim BOYACI

**Harran University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Environmental Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Sinan UYANIK

Year: 2024, Page: 127

Due to the dwindling global freshwater resources and increasing challenges in accessing them, the reuse of treated wastewater has become increasingly crucial. This study employed the water scrubbing method, a widely used and cost-effective technique for biogas purification, using treated wastewater instead of clean water. The study investigated the efficiency of water scrubbing for biogas purification using treated wastewater and its impact on the alkalinity, COD, and pH parameters of the treated wastewater. The study involved a prolonged scrubbing process, generating data to illustrate the relationship between the absorption efficiency of the scrubbing water and its duration. The optimal performance/efficiency was achieved at 20°C, a biogas flow rate of 10 L/min, and a pressure of 10 bar. Using treated wastewater once resulted in a methane concentration of 90%. The carbon dioxide separation process was successfully implemented.

KEY WORDS: Biogas, methane, wastewater anaerobic treatment, biogas purification, biogas washing with water

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim boyunca bilgi, deneyim ve yardımlarını esirgemeyen, doktora tez çalışmama büyük katkılar sağlayan, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım Harran Üniversitesi Çevre Mühendisliği hocalarına ve ŞUSKİ Genel Müdürlüğünde destek olan herkese teşekkür ederim.



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Water scrubbing (Su yıkama) tekniğinin şeması	23
Şekil 1.2. CO ₂ 'nin kimyasal reaksiyonları	24
Şekil 1. 3 Kimyasal/fiziksel temizleme şeması	25
Şekil 1.4. Biyogaz yükseltme için membran akış şeması	28
Şekil 3.1. Siverek Atık Su Arıtma Tesisi	46
Şekil 3.2. Kaba ızgara ünitesi	48
Şekil 3.3. İnce ızgara ünitesi	49
Şekil 3. 4. Kum ve yağ tutucu havuzu	51
Şekil 3.5 Ön çökeltim havuzu	52
Şekil 3.6. Ön çamur pompa istasyonu	53
Şekil 3.7. Koku giderim ünitesi	54
Şekil 3.8. Havalandırma havuzu dağıtım yapısı	55
Şekil 3.9. Havalandırma havuzu	56
Şekil 3.10. Blower istasyonu	57
Şekil 3.11. Son çökeltim havuzu dağıtım yapısı	58
Şekil 3.12. Son çökeltim havuzu	59
Şekil 3.13. Geri devir pompa istasyonu	60
Şekil 3.14. Çıkış suyu	61
Şekil 3.15. Servis suyu	62
Şekil 3.16. İçme suyu ve yangın suyu pompa istasyonu	63
Şekil 3.17. Graviteli çamur yoğunlaştırma	64
Şekil 3.18. Mekanik yoğunlaştırma ünitesi	65
Şekil 3.19. Mix çamur tankı	66
Şekil 3.20. Digester	68
Şekil 3.21. Çürütülmüş çamur depolama tankı	69
Şekil 3.22. Çamur susuzlaştırma ünitesi	70
Şekil 3.23. Süzüntü suyu pompa istasyonu	71
Şekil 3.24. Biyogaz ünitesi	72
Şekil 3.25. Desülfürizasyon ünitesi	73
Şekil 3.26. Kojenerasyon (CHP) ünitesi	74
Şekil 3.27. Dizel jeneratör ünitesi	75
Şekil 3.28. Gaz ölçüm cihazı kalibrasyon sertifikası	79
Şekil 3.29. Tez çalışmaları için kurulan water scrubber	81
Şekil 3.30. Çalışmada kullanılan absorpsiyon kulesi	82
Şekil 3.31. Biyogaz saflaştırma genel akış şeması	83

Şekil 3.32. Debimetreli vana ile biyogaz debi ayarlaması	84
Şekil 3.33. Water scrubber sistemine ait akış şeması	85
Şekil 3.34. Aquaflex PTFE kaplı membran difüzör	86
Şekil 4.1. Siverek AAT 2020 yılı aylara göre biyogaz üretimi	87
Şekil 4.2. % CH ₄ , CO ₂ , H ₂ S konsantrasyonları (20 °C, 10 L/dk).....	90
Şekil 4.3. pH değişim grafiği	97
Şekil 4.4. Alkalinite değişim grafiği	100
Şekil 4.5. 300 L su hacmi, 10 bar sabit basınçta 10 L/dk çıkan sonuçlar. (20 °C, 10 L/dk)....	104



ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 1.1. bazı yaygın enerji bitkilerinin metan verimleri (Murphy ve ark., 2011).....	10
Çizelge 1.2. Bazı Mikroalglerin verimlilik verileri	14
Çizelge 1.3. Biyogaz yükseltme için membran malzemeleri (Basu ve ark., 2010)	28
Çizelge 1.4. CO ₂ giderme tekniklerinin özeti (Andriani ve ark., 2014)	31
Çizelge 1.5. Yükseltmiş biyogazın enerji gereksinimi (Andriani ve ark., 2014)	32
Çizelge 1.6. Yükseltme teknolojilerinin maliyet tahminlerinin ve bakım maliyetlerinin özeti .	32
Çizelge 3.1. Çökeltme ünitesinin özellikleri	59
Çizelge 3.1. Analiz Planı	80
Çizelge 4.1. Atmosfer basıncında saflaştırma performansı.....	89
Çizelge 4.2. 3 Bar basınçta saflaştırma performansı	89
Çizelge 4.3. 10 Bar basınçta saflaştırma performansı	89
Çizelge 4.4. 13 Bar basınçta saflaştırma performansı	90
Çizelge 4.5. Biyogaz Saflaştırma Verileri.....	93
Çizelge 4.6. ANOVA Test Sonucu	94
Çizelge 4.7. 10 litre biyogaz absorpsiyonu sonrası pH değerleri	95
Çizelge 4.8. 1000 litre biyogaz absorpsiyonu sonrası pH değerleri	96
Çizelge 4.9. 2500 Litre biyogaz absorpsiyonu sonrası pH değerleri.....	96
Çizelge 4.10. 4000 Litre biyogaz absorpsiyonu sonrası pH değerleri.....	97
Çizelge 4.11. 10 Litre biyogaz absorpsiyonu sonrası alkalinite değerleri	98
Çizelge 4.12. 1000 Litre biyogaz absorpsiyonu sonrası alkalinite değerleri.....	99
Çizelge 4.13. 2500 Litre biyogaz absorpsiyonu sonrası alkalinite değerleri.....	99
Çizelge 4.14. 4000 Litre biyogaz absorpsiyonu sonrası alkalinite değerleri.....	99
Çizelge 4.15. 10 Litre biyogaz absorpsiyonu sonrası alkalinite değerleri.....	101
Çizelge 4.16. 4000 Litre biyogaz absorpsiyonu sonrası alkalinite değerleri.....	102
Çizelge 4.17. 4000 Litre biyogaz absorpsiyonu sonrası alkalinite değerleri.....	102
Çizelge 4.18. 4000 Litre biyogaz absorpsiyonu sonrası alkalinite değerleri.....	103
Çizelge 5.1. Çalışma için kurulan pilot ölçekli absrpsiyon kulesi maliyet tablosu	108
Çizelge 5.2. Farklı biyogaz saflaştırma teknolojilerinin karşılaştırılması	109

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

AD	Anaerobik sindirim (Aneorobic Digestion)
BOİ	Biyolojik oksijen ihtiyacı
CNG	Sıkıştırılmış Doğal gaz (Compressed Natural Gas)
DMEA	Dimetil etanol amin
EMS	Etil metan sülfonat
KOİ	Kimyasal oksijen ihtiyacı
kPa	Kilopaskal
L	Litre
LPG	Liquit petrol gas
LNG	Sıvılaştırılmış doğal gaz (Liquefied Natural Gas)
MEA	Mono etenol amin
NAPWS	Atmosfere yakın basınçlı su ile yıkama
NOx	Nitrik oksit
PEG	Poli etilen glikol
PM	Partikül madde
PSA	Basınç salınlı adsorpsiyon
PTFE	Teflon
VFA	Uçucu yağ asiti (volatile fatty acid)

1. GİRİŞ

Biyogaz, anaerobik koşullar altında biyogenik maddeden, aslında tüm biyokütle formlarından doğal olarak meydana gelir. Doğal olarak oluşan bu biyogaz, ana bileşen maddesi olan metanın küresel ısınma üzerine önemli etkisi vardır. Geçen yüzyılda, metan enerji üretimi, ısıtma ve ulaşım amaçları için en fazla kullanılan yakıtlardan birine dönüşmüştür. Günümüzde toplumlar tarafından kullanılan metanın oransal olarak çoğunluğu doğal gaz olduğundan, çürüyen biyokütleden meydana gelen metanın toplanmasına yönelik ilgi hızla artmaktadır. Elbette, bu, doğadaki tüm doğal kaynaklardan salınan metanı gazını yakalamak veya toplamak anlamına gelmemektedir. Bu, biyogaz prosesinin tamamen muhafaza edilebildiği, kontrol edilebileceği, optimize edilebileceği ve ticari olarak uygulanabilir bir endüstrinin kurulabileceği, doğanın yenilenebilir, çevresel olarak sürdürülebilir, gaz halindeki biyoyakıt üretme potansiyelinden yararlanabileceği özel biyogaz tesisleri kurmak anlamına gelir (Wellinger ve ark. 2013).

Doğa ve çevrenin korunmasının yanı sıra küresel iklim değişikliği, fosil kaynakların sonlu karakteri ve güvenli ve karlı bir enerji arzına duyulan ihtiyaç, bu geçişin ana itici nedenleridir. Bu bağlamda yenilenebilir enerjilerin gelecekteki enerji politikalarında önemli bir rol oynayacağı kaçınılmaz görünmektedir. Tüm yenilenebilir enerji türleri arasında biyoenerji genellikle "çok yetenekli" olarak tanımlanmaktadır. Biyoenerji, yenilenebilir elektrik, sıcak, soğuk ve sıvı biyoyakıtların üretiminde önemli bir pay kazanabilir. Arz güvenliğine, iklimin korunmasına ve talep odaklı elektrik üretimine büyük ölçüde katkıda bulunur. Biyoenerji, özellikle uzak bölgelerde

yeni istihdam yaratma ile döngüsel ve sürdürülebilir biyoekonomilerin kurulmasına yol açmaktadır (Balussou, 2018).

Günümüzde birçok yöntem ile biyokütle kaynaklı enerji üretimi gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemlerin en yaygınlarından birisi de bakteriyolojik faaliyetler neticesinde biyogaz sentezleyerek enerji üretimidir. Saflaştırılmış biyogaz, diğer biyokütleden elde edilen yakıtların aksine, fosil yakıtlar ile karıştırma ihtiyacı olmadan direkt kullanılabilir. Biyogaz üretimi, başta Çin ve Amerika olmak üzere birçok ülkede yaygın olarak uygulanmaktadır. Ülkemizde ise biyogaz kullanımı ve teknolojileri yeni gelişmeye başlamış olup üretim miktarı hızla artmaktadır. Biyogaz, partikül madde, NO_x ve CO₂ emisyonları açısından dizel, benzin ve LPG gibi fosil kaynaklı yakıtlara göre çok daha az emisyonu sebep olmaktadır. Biyogaz içerisindeki metanın (CH₄) içeriğinde diğer yakıtlara nispeten daha az karbon bulunduğundan motorlu taşıttan atılan CO₂ emisyonu gayet düşük seviyelerdedir (Çiftçi ve ark. 2017).

Ham biyogaz içerik olarak %40–75 CH₄, %25–60 CO₂ ve H₂S, N₂, H₂, CO gibi diğer gazlardan oluşmaktadır. Biyogaz üretimi yaygın ve kolay olmasına karşılık; içeriğinde bulunan korozif etkiye sahip H₂S ve yüksek miktarda bulunan CO₂ sebebi ile saflaştırılmadan kullanımı oldukça kısıtlıdır (Ryckebosch, vd., 2011). Bununla beraber, biyogazın içeriğindeki CH₄ oranının en az %90 seviyelerine yükseltilmesi ile doğalgaz, CNG ve LNG kullanan araçlarda yakıt olarak kullanılması mümkündür. Ayrıca biyogaz yerel olarak üretilen bir enerji kaynağı olduğu için, fosil yakıt kullanımında mecbur olunan uzun mesafelerde nakliye ihtiyacı bulunmamaktadır (Çiftçi ve ark., 2017).

Biyogazın içeriğindeki CO₂ ve H₂S gazlarının ayrıştırılmasının ekonomik ve sürdürülebilir yöntem/yöntemlerini belirlemek çok önemlidir. Biyogazlardan istenmeyen safsızlıkların giderilmesi ile ilgili yapılan çalışmalarda kolay, yaygın ve

sürdürülebilir yöntemin Water-Scrubber metodu olduğu ifade edilmektedir. Bununla birlikte bu metodun uygulanmasında bazı dezavantajlar da mevcuttur (İlkılıç ve Deviren, 2011).

Water scrubber sistemlerinde aynı su tekrar tekrar kullanıldığı için belli bir kullanım süresi sonunda biyogazdaki H_2S 'in su içinde çözülmesi sonucu su içerisindeki sülfirik asit konsantrasyonunun artması korozyon etki oluşturmaktadır (Kadam ve Panwar, 2017).

1.1. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada; biyogazın içeriğindeki CO_2 gazlarının ayrıştırılmasının Türkiye şartlarında, ekonomik ve sürdürülebilir yöntem/yöntemlerini belirlemek amaçlanmıştır. Bu konu ile ilgili daha önceki yapılan çalışmalarda en kolay, yaygın ve sürdürülebilir yöntem Water-Scrubber yöntemidir. (İlkılıç ve Deviren, 2011) metodu olduğu ifade edilmektedir. Bununla birlikte bu metodun uygulanmasında da bazı dezavantajlar mevcuttur. Çalışmamızda water-scrubber sisteminin uygulanmasında karşılaşılan problemlere karşı daha önce denenmemiş bir yöntem olan arıtılmış atıksuyun biyogaz saflaştırılmasında kullanılmasıyla sözkonusu dezavantajlara çözüm ortaya koymak hedeflenmiştir.

Water scrubber sisteminin dezavantajları ve tez çalışmasında belirlenen stratejinin hedeflediği çözümler aşağıda sıralanmıştır.

Aşırı miktarda su kullanımı; bu tez çalışmasının uygulama alanı olan atıksu, arıtma tesislerinde zaten bol miktarda mevcut olup, gaz zenginleştirme sisteminde bu arıtılmış suyun kullanılmasıyla sözkonusu problem çözülmüş olacaktır. Araştırmada kullanılan arıtılmış su; yapılan analizler sonucuna göre kullanım uygunluk kriterlerini sağladığından direkt deşarj edilmiştir.

Köpük problemi; yıkama sisteminde arıtılmış atıksu kullanıldı ve aynı suyun sistemde defalarca sirkülasyonu yerine daha sık yenilenmesiyle köpük oluşumu engellenmiştir.

Bakteri floklarının oluşması; yıkama sisteminde arıtılmış atıksu kullanılması ve sisteme sürekli taze su verilmesiyle bakteri floklarının oluşumu engellenmiştir.

Yıkama suyu içerisindeki H_2S miktarının çoğalarak pompaların zarar görmesi; Water-Scrubbing sistemlerinde aynı su tekrar tekrar kullanıldığından zamanla biyogazdaki H_2S 'in su içinde çözülmesi sonucu ortamdaki sülfirik asit konsantrasyonun artması korozyona neden olmaktadır (Kadam ve Panwar, 2017). Arıtılmış atıksuyun tek sefer kullanımı veya sık değiştirilmesi ile bu problem aşılmaya çalışıldı.

Özellikle yerel yönetimlerin bertaraf etmiş olduğu atıksu ve katı atıklardan elde edilen biyogazın toplu taşıma araçlarında kullanım potansiyelinin ve kullanım yönteminin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu tez çalışmasında Şanlıurfa Büyükşehir Belediyesi sorumluluğunda bulunan atıksu ve katı atıklardan elde edilebilecek biyogaz potansiyelinin hesaplanmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Bu proje

neticesinde yerel yönetimlerin elinde mevcut bulunan ve sıfır maliyetle elde edilen atıkların enerjiye çevrilmesi teşvik edilmiş olacaktır.

Bu tez, hem kullandığı yöntemin dezavantajlarını ortadan kaldırmayı hem de saflaştırılan biyogazın araçlarda kullanımının yaygınlaşmasını amaçlamaktadır.

1.2. Kavramsal Çerçeve

Bu bölümde konuyla ilgili aşağıdaki kavramlara yer verilmiştir.

1.2.1. Biyogaz

Biyogaz, doğal gaz ikamesi için uygun, sindirilebilir biyokütleden elde edilen yenilenebilir ve sürdürülebilir bir yakıttır. Bununla birlikte, anaerobik sindirim yoluyla üretilen biyogaz düşük basınç, düşük özgül ağırlık ve büyük özgül hacimdedir ve bu nedenle enerji depolama için uygun değildir. Biyogazda bulunan CO₂'nin büyük payı, kalorifik değerini, alev hızını ve yanıcılık sınırlarını doğal gaza kıyasla düşürmektedir (Budzianowski ve ark., 2017).

Organik malzemelerin anaerobik sindiriminden elde edilen biyogaz, esas olarak CH₄ ve CO₂'den oluşan yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Biyogazda sıklıkla bulunan eser bileşenler su buharı, hidrojen sülfür (H₂S), siloksanlar, hidrokarbonlar, amonyak, oksijen, karbon monoksit ve azottur (Andriani ve ark., 2014).

1.2.2. Biyogaz Kaynakları (Biyokütle)

Biyokütle, biyolojik olarak üretilen tüm maddeleri tanımlamak için kullanılan genel bir terimdir ve bu nedenle canlı organizmalardan türetilen her türlü malzeme ve maddeyi içerir. Ormancılık ve tarımdan kaynaklanan biyokütle, endüstriyel ve kentsel atıklar ve atıklar enerji üretiminde hammadde olarak kullanılan biyokütle türleridir. Genellikle anaerobik çürüme (AD: Anaerobic Digestion) hammaddesi olarak adlandırılan biyogaz hammaddeleri olarak uygun biyokütle kaynakları, basit bileşiklerden karmaşık yüksek katı maddelere kadar yenilenebilir bazda mevcut çok çeşitli organik malzemelerle temsil edilir. Genellikle yüksek oranda şeker, nişasta, protein veya yağ içerirler. Bunların ortak özelliği ise, AD yoluyla kolayca ayrışma yetenekleridir.

Tarihsel olarak AD, hayvan gübresi, bulamaçlarının arıtılması ve atık su tesislerinden kanalizasyon çamurunun stabilizasyon arıtımı ile ilişkilendirilmiştir. 1970'lerde, sanayiden kaynaklanan organik atıklar ve belediye atıkları biyogaz hammaddesi olarak ifade edilmektedir. Bu, artan çevre bilinci ve yeterli atık yönetimi stratejilerine olan talepten kaynaklanıyordu (Steffen ve ark., 1998). Fikir çok daha eski olmasına rağmen, özellikle biyogaz için hammadde olarak mısır, otlar, tahıllar, pancar, patates ve ayçiçeği gibi mahsullerin yetiştirilmesi 1990'lı yıllarda Almanya, Avusturya gibi ülkelerde geliştirilmiştir. Çeşitli mahsullerin metan potansiyeli 1930'larda Buswell tarafından araştırılmıştır (Murphy ve ark., 2011).

Biyogaz üretimine elverişli biyokütle kaynakları çeşitli kriterlere göre kategorilere ayrılabilir. Kökenlerinin taksonomik derecelendirmelere göre, bitkisel ve hayvan olabilirler. Bunları üreten sektöre göre, tarımsal (hayvansal gübreler ve bulamaçlar, bitkisel yan ürünler ve atıklar, enerji ürünleri), endüstriyel (organik atıklar, tarımsal sanayi, gıda endüstrileri, yem ve bira endüstrilerinden yan ürünler ve

artıklar, endüstriyel proseslerden organik yüklü atık sular ve çamurlar, biyoyakıt üretiminden ve biyorafinerilerden organik yan ürünler, vb.), Belediye kaynaklarından (kaynaktan ayrılmış evsel atıklar, kanalizasyon çamuru, kentsel katı atık ve gıda kalıntıları) olabilir. Bu sektörlerde, farklı biyokütle değer zincirlerinin atıkları, kalıntıları ve yan ürünleri, günümüzde AD hammaddesi olarak kullanılan en sürdürülebilir malzemelerdir (Wellinger ve ark., 2013).

1.2.2.1. Tarımsal biyogaz hammaddeleri

Biyogaz kaynağı olarak kullanılan hammadde substratları esas olarak biyogaz hammaddeleri açısından büyük potansiyeli oluşturan tarım sektöründen türetilmiştir. Bu hammaddeler esas olarak çeşitli kalıntı ve yan ürünlerden oluşur; bunlardan en önemlileri çiftliklerden (sığır, domuz, kümes hayvanları, vb.) toplanan hayvan gübreleri ve bulamaçlarıdır. Gübre ve bulamaç ile birlikte, mahsul artıkları, yan ürünler ve atıklar, örneğin saman, otlar, yapraklar, meyveler, bütün bitkiler de kullanılmaktadır. Son on yılda, yeni hammadde kategorileri test edilmiş ve bu hammaddeler günümüzde AD tesislerinde kullanılmaktadır; Bunlar, biyogaz üretimi için özel olarak yetiştirilen mısır, otlar, pancar, ayçiçeği vb enerji bitkileridir (Steffen ve ark.,1998).

1.2.2.1.1. Hayvancılık

Hayvan yetiştiriciliği, pek çok ülkede tarım sektörünün önemli bir parçası olup dünya çapındaki sera gazı emisyonlarının %18'ini oluşturmaktadır. Bu CO₂ salınımının çoğu, dünya genelinde, yılda üretildiği tahmin edilen 13 milyar ton hayvan gübresinden ve bulamacından kaynaklanmaktadır (Horn, Newton, ve Kunkle, 1997; Wellinger ve ark., 2013). Geçmiş uygulamalar, gübrenin tarım arazilerinde sınırlama

olmaksızın yayılmasına neden olmuştur. Ancak günümüzde, birçok ülkede gittikçe daha kısıtlayıcı hale gelen çevre mevzuatları, AD gibi gübre arıtma ve yönetim teknolojilerini zorunlu kılmaktadır. ABD'de AD'yi "yenilenebilir enerji, su kirliliğinin önlenmesi de dahil olmak üzere birçok fayda sağlayabilen, hayvan gübresi için benzersiz bir arıtma çözümü" olarak kabul etmiştir. Ayrıca hava emisyonları için de çözüm olarak görmektedir. Anaerobik çürütme, hayvan gübresini ve bulamaçlarını çevreyi kirlüten atıklar olmaktan çıkarmakla kalmayıp aynı zamanda biyogaz üretimi (yenilenebilir yakıt olarak) ve değerli biyogübre (doğal sindirim) olarak kullanılan kaynaklara dönüştürmektedir (Wellinger ve ark., 2013).

Pekçok hayvandan (domuzlar, sığırlar, kümes hayvanları, atlar, vizon ve diğerleri) elde edilen gübreler ve bulamaçlar, biyogaz elde etmede hammadde olarak kullanılabilir. Bunlar, kuru madde içeriklerine göre karakterize edilirler. Katı çiftlik gübresi %10-30 kuru madde içerirken sıvı bulamaç ifadesi %10 kuru maddenin altındaki hammaddeleri belirtmek için kullanılır. Kompozisyonları ayrıca menşe türlerine ve hayvan yeminin kalitesine bağlı olarak da farklılık gösterir. Basitleştirmek amacıyla genel terim olarak 'hayvan gübresi' ifadesi sıklıkla kullanılmaktadır. Gübre, AD için mükemmel bir hammaddedir; karbon-azot (C/N) oranı yaklaşık 25/1 olup aynı zamanda anaerobik mikroorganizmaların gelişimi ve büyümesi için gerekli çeşitli besinler bakımından zengindir. Yüksek tampon kapasitesine sahiptir, çürütücü içinde önemli bir pH düşüşü durumunda AD prosesini stabilize edebilir, doğal bir anaerobik mikroorganizma içeriğine sahiptir, oldukça erişilebilir ve ucuzdur. Hayvan gübrelerinin ve bulamaçlarının anaerobik çürütmesi yaygın olarak biyogaz üretiminde kullanılmaktadır. Avrupa, Asya ve Kuzey Amerika'da gibi pek çok yerde sadece yenilenebilir enerji amaçları için değil, aynı zamanda çevreyi korumak ve maddeleri/malzemeleri tarım sistemlerine verimli bir şekilde geri dönüştürmek için de kullanılmaktadır (Wellinger ve ark., 2013; Zafar, 2008).

1.2.2.1.2. Bitki atıkları

Bitki artıkları sınıfı, çeşitli bitkisel tarımsal yan ürünleri ile hasat artıklarını, bitkileri ve bitki parçalarını, kalitesiz ya da bozuk mahsulleri, meyveler, sebzeler ve bozuk yem silajını kapsamaktadır. Bitkisel artıklar genellikle hayvan gübreleri ve diğer hammadde türleri ile birlikte substratlar olarak çürütülür. Çoğunun bir çürütücüye aktarılmadan önce işlenmesi gerekir. Ön işlemler, basit mekanik partikül boyutu küçültmeden, anaerobik mikroorganizmaların bu yapılara erişimini kolaylaştırmak için ligno-selülozik molekülleri kırmayı hedefleyen daha karmaşık işlemleri içermektedir. 1 cm'lik bir parçacık boyutu diğer hammadde türleriyle uygun şekilde işleme ve karıştırılmaya izin verir ve iyi sindirim sağlamaktadır (Amon ve Boxberger, 1999).

Enerji bitkileri özellikle enerji üretimi için kullanılan mahsullerin yetiştirilmesi, 1990'lı yıllarda Almanya ve Avusturya gibi ülkelerde geliştirilmiştir. Buswell, 1930'lara kadar çeşitli mahsullerin metan potansiyelini araştırmıştır. Hem bütün bitkiler hem de bitki parçaları olmak üzere birçok ürün çeşidi test edilmiş ve biyogaz hammaddesi olarak uygun olduğu kanıtlanmıştır. Bunlar arasında Tablo 2.2'de gösterildiği gibi mısır, çeşitli otlar, çeşitli tahıllar, pancar, patates ve ayçiçekleri bulunur (Murphy ve ark., 2011)

Çizelge 1.1. bazı yaygın enerji bitkilerinin metan verimleri (Murphy ve ark., 2011)

Enerji ürünü	Metan verimi (m³/VS)
Mısır (tüm mahsul)	205-450
Çimen	298-467
Yonca otu	290-390
Kenevir	355-409
Ayçiçeği	154-400
Kolza yağlı tohumu	240-340
Patates	275-400
Şeker pancarı	236-381
Yem pancarı	420-500
Arpa	353-658
Tritikale	337-555
Yonca	340-500
Çavdar otu	390-410
Isırgan otu	120-420
Saman	242-324
Yapraklar	417-453

1.2.2.2. Endüstriyel biyogaz hammaddesi

Tarımsal hammaddeleri işleyen ve kullanan endüstriyel faaliyetler sonucunda önemli miktarda yan ürün, atık ve kalıntı ortaya çıkmaktadır. Bu endüstri dalları arasında yiyecek ve içecek, balık işleme, nişasta, yem, şeker, süt, ilaç, biyokimyasallar ve kozmetik, kâğıt, kâğıt hamuru ve mezbahalar yer almaktadır. Bu endüstrilerden gelen atıklar çok çeşitlidir ve kökenlerine göre farklı metan potansiyellerine, kuru madde içeriklerine, yapılarına ve bileşimlerine sahiptir. Pekçoğu için ortak olan özellikler, kolayca sindirilebilir, homojen yapıda, lipitler, proteinler ya da şekerler bakımından zengin olmalarıdır. Birçok endüstriyel atık, aşırı yüksek metan potansiyelleri nedeniyle “metan güçlendiriciler” olarak kullanılmaktadır. Endüstriyel kaynaklı organik atıklar, AD tarafından daha küçük ve merkezi olmayan biyogaz üretim tesislerinde, büyük karma sindirim tesislerinde ya da endüstriyel üretim merkezlerinde (örneğin organik yüklü endüstriyel atık sular) ek hammadde olarak

işlenebilmektedir. Organik yüklü atık sularda amaç, organik yükleri azaltmak, daha fazla bertaraf için uygun hale getirmek ve üretilen biyogazı proses enerjisi için kullanmaktır. Birçok endüstriyel organik atık, hayvan gübresi ile birlikte sindirilir ve daha sonra üretilen sindirim gübre olarak kullanılır. Gübre ve endüstri kaynaklı atıkların bereaber sindirimi, metan üretimini arttırmaktadır. Çünkü çoğu organik atık türü, genellikle metreküp olarak hammadde başına 30-500 m³ metan oranı ile hayvan gübresinden çok daha yüksek metan verimine sahiptir (Angelidaki, 2002; Wellinger ve ark., 2013).

1.2.2.3.Kentsel Atık Biyogaz Hammaddesi

Kentsel atıklar birkaç başlık altında özetlenmiştir.

1.2.2.3.1. Kaynaktan ayrılmış organik atıklar

Kaynaktan ayrılmış organik atıklar, ayrıştırılmış gıda atıkları ve bahçe atıkları ile diğer benzer organik atıklar gibi evsel atıkların organik kısmını ifade eder. Kentleşme ve tüketim alışkanlıklarının artması, yeterli atık yönetimini zorunlu hale getirmiştir. Ayrı toplama, AD hammaddesi olarak kullanılmak üzere hem temiz hem de yüksek kaliteli malzemeler sağlayabilen, bununla birlikte çöp sahalarına ve yakma işlemlerine giden organik malzeme akışını geri dönüşüm ve besin geri kazanımı lehine azaltan bir çözümdür (Favoio, 2002; Rutz ve ark., 2011).Ayrıştırılan veya ayrı olarak toplanan organik evsel atıklar genellikle gübre bazlı AD tesislerinde hayvan gübresi ve bulamaçları ile birlikte sindirilir. Toplumda giderek artan miktarda üretilen evsel atıklar, çok yüksek bir AD potansiyeline işaret etmektedir. Evsel atıkların biyogaz için hammadde olarak kullanılması, arazi kullanımı için rekabet etmemektedir ve

sürdürülebilirlik için olumsuz etkilerine sahip değildir (Rutz ve ark., 2011; Wellinger ve ark., 2013).

Organik evsel atıklar yüksek biyolojik parçalanabilirliğe ve metan verimine sahiptir. Besin içerikleri, anaerobik mikroorganizmaların metabolizması için iyi dengelenmiş ve elverişlidir. Evsel atıklar çeşitli patojenler, mantarlar ve diğer biyolojik vektörler içerdiğinden, patojenik maddenin etkili bir şekilde inaktivasyonu için sanitasyon gereklidir (Zhang ve ark., 2007).

1.2.2.3.2.Kanalizasyon çamuru

Belediye atık sularının aerobik arıtılmasından elde edilen birincil, ikincil çamurun arıtılması işleminde kullanılan anaerobik çürütme, dünya genelinde kullanılan standart bir teknolojidir. Bu teknoloji, belediye atık sularının modern arıtma sistemlerinin önemli bir parçası olarak binlerce tesiste kullanılmaktadır. Kanalizasyon çamuru, hayvan bulmaçlarına benzer bir metan potansiyeline sahiptir. Birincil çamur, atıkla aktive edilen çamurdan daha yüksek bir metan potansiyeline sahiptir. Metan oranını ve verimini arttırmak için, bakteriyel biyokütlenin parçalanmasını ve sonraki anaerobik bozunmaya kolayca erişilebilen organik maddelerin serbest bırakılmasını amaçlayan çeşitli ön işlemler; örneğin mekanik olarak parçalanma, kimyasal hidroliz, termal hidroliz ve enzimatik bozunma uygulanabilmektedir (Rulkens, 2008).

Kanalizasyon çamurunun biyogaz hammaddesi olarak kullanılması için sınırlayıcı faktör, yüksek kirletici içeriği ve gübre olarak kullanılan sindirimden sonra da ortamda bulunmalarıyla ilgili risklerdir. Kaynağından dolayı, kanalizasyon çamuru

kayda değer miktarda biyolojik ve kimyasal kirletici içermektedir. Bu nedenle, kanalizasyon çamurunun AD için hammadde olarak ve atık ürünlerin gübre olarak kullanılması için ulusal mevzuatlarla ve kalite standartlarıyla düzenlenmektedir. Sindirilmiş kanalizasyon çamurunun gübre olarak veya diğer tarımsal amaçlar için kullanılmasının yasaklandığı ülkeler vardır, diğer ülkelerde ise gübre olarak kullanımı, ağır metallerin ve kalıcı organik kirleticilerin konsantrasyonlarının sınır değerlerinin yanında patojenler ve diğer biyolojik vektörlerin inaktivasyonu için sanitasyon gereklilikleri ile ilgili katı mevzuatlarla kontrol edilmektedir (Smith, 2009). Kanalizasyon çamuru genellikle endüstrilerden ve evlerden gelen gübre ve/veya organik atıklarla birlikte sindirilir, bu da biyogaz verimini ve proses stabilitesini artırır (Kuglarz ve Mrowiec, 2009).

1.2.2.4.Aquatik (Sucul) Biyokütle

Şimdiye kadar açıklanan toplumun farklı kesimleri tarafından üretilen malzemelerin yanında, tatlı ve deniz sularından sucul biyokütlenin kullanımına da artan bir ilgi göze çarpmaktadır. Bunun, yem ve gıda üretiminde ve çeşitli endüstriler için hammadde olarak kullanımının yüksek potansiyele sahip olduğu düşünülmektedir. Aynı zamanda bunların biyogaz da dahil olmak üzere biyoyakıt elde etmek için umut verici hammaddelerden oldukları belirtilmektedir (Angelidaki ve ark., 2011; Burton, 2009; Wellinger, 2009).

Çizelge 1.2. Bazı Mikroalglerin verimlilik verileri

Mikroalg türü	Biyokütle verimi (t/ha/yr)	Bölge	Sistem	Gözlemler
Ulva sp.	22,5	Pensilvanya, USA	Ekili	6 aylık büyümeye dayalı tahminler
Ulva sp.	45	Danimarka	Ekili	4 aylık denemenin ekstrapolasyonu
L. japonika	25	Çin	Ekili	Ticari olarak elde edilen verim
L. japonika	60	Japonya	Ekili	Kuru ve külsüz
L. hiperboria	30	İskoçya	Doğal stok	Hasatlar arasında >5 yıl dinlenme gerektirir
Laminaria, Gracilaria multicrop	45	Güney USA	Ekili	Optimize edilmiş üretim
Kırmızı, yeşil, kahverengi multicrop	50	Kuzey Denizi	Ekili	Teorik verim
Kaynak: Burton (2009)'dan sonra derlenen veriler				

Son birkaç on yıllık süreçte, sucul biyokütle üzerine yapılan araştırmalar yoğunlaşmıştır ve Wellinger'e (2009) göre, bu konu üzrine yapılan araştırmalar önümüzdeki yıllarda daha da artacak ve tamamen akademik çalışmalardan, hızla tükenen petrol kaynaklarına alternatifler ve sera gazı salınımlarının azaltılması ile karbon tutulması için çözümler araştıran, enerji endüstrileri tarafından desteklenen gösteri projelerine dönüşecektir. Sucul biyoküteller atık su ıslahı için uygun olup yüksek biyokütle verimine sahiptir. Biyogaz sektöründe iki grup sucul biyokütle ile ilgilenilmektedir. Birincisi, doğal şekerler ile diğer karbonhidratlar bakımından zengin, yüksek biyokütle verimleri ile bilinen ve sucul biyoçeşitliliğin desteklenmesinde önemli bir role sahip olan, deniz yosunlarıdır. İkinci grup ise mikroalglerdir. Deniz ya da tatlı sularda yaşayan, çoğunluk itibarıyla tek hücreli, mikroskobik fotosentetik organizmaların heterojen bir grubudur. Dünya genelinde bilinen 30.000'den fazla mikroalg türünden yalnız birkaçı Chlorella, Spirulina, Dunaliella ve Haematococcus dahil olmak üzere gerçek ticari ilgi alanına girmektedir. Diatomlar olarak bilinen yeşil mikroalgler, enerji, biyogaz ve diğer biyoyakıt üretiminin yanı sıra yüksek değerli malzemelerin üretimi için en uygun olanı olarak

kabul edilmektedir. Mikroalgler yüksek fotosentetik verimliliğe sahiptir ve lipidler bakımından zengindir. Mikroalglerin dezavantajlarından biri, çok düşük kuru madde içeriğine sahip olmalarıdır. Örneğin biyodizel üretirken, lipidlerin biyoesterleşmesini sağlamak için suyun uzaklaştırılması gerekmektedir (Wellinger, 2009).

1.2.3. Biyogaz hammaddesinin özellikleri

1.2.3.1. Uygunluk ve kullanılabilirlik

Biyogaz üretimi için pratikte kullanılan substratlar, uygunluklarına ve kullanılabilirliklerine göre seçilir. Bu durumda uygunluk, kolayca sindirilebilir organik madde içeriği, metan potansiyeli, partikül boyutu, kuru madde içeriği, pH, C/N oranı, makro ve mikro elementlerin içeriği gibi bir dizi özellik ve parametre ile tanımlanır. Kullanılabilirlik ise, hammaddenin biyogaz tesisi operatörleri için kolayca erişilebilir olduğu ve yenilenebilir bir temelde yeterli miktarlarda tedarik edilebileceği anlamına gelir (Steffen ve ark., 1998; Wellinger ve ark., 2013).

1.2.3.2. Sindirilebilirlik

Sindirilebilirlik, metan üretimi üzerinde doğrudan etkisi olan ana AD hammadde parametresidir ve substratın AD yoluyla ayrışma kabiliyetini ifade eder. Belirli bir malzemenin sindirilebilirliği, basit şekerler gibi kolayca sindirilebilir bileşiklerin içeriğine bağlıdır. Bununla birlikte, biyogaz hammaddesi, lingoselülozlar gibi inatçı madde olarak bilinen çeşitli miktarlarda düşük sindirilebilir bileşikler de içerebilir. Steffen ve arkadaşları, anaerobik bozunma oranının hammadde bileşimine göre önemli ölçüde değiştiğini belirtmiştir (Steffen ve ark., 1998).

1.2.3.3. Rahatsız edici etkileri olan safsızlıklar

Tedarik edilen hammadde ile birlikte, biyogaz tesisine yanlışlıkla çeşitli istenmeyen bileşenler de taşınabilmektedir. Çürütücüye girdikten sonra, varlıkları normal proseslerin bozulmasına neden olabilir. Yaygın sorunlar, çürütücünün aktif hacminin azaltılması (çürütücünün dibindeki kumun çökmesinden kaynaklanır), köpüklenme, faz ayırma ve yüzer tabakalar yoluyla proses arızası ve hatta metalik safsızlıkların veya diğer rahatsız edici bileşenlerin neden olduğu pompalar gibi makinelerin zarar görmesidir. En yaygın rahatsız edici malzeme, genellikle hayvan gübresindeki kumdur. Saman ve ahşap parçacıkları gibi hafif malzemeler de yüzen katmanlara ve akışkanlar dinamiğinin bozulmalarına neden olabilir. Saman varlığının da rahatsız edici etkileri olabilir, ancak bu parçacık boyutuna bağlıdır: küçük parçacıklı saman işlemi bozmaz ve metan verimini önemli ölçüde artırabilir (Steffen ve ark., 1998; Wellinger ve ark., 2013).

1.2.3.4. İnhibitörler

Hammaddedeki bazı bileşikler (hammadde ile birlikte çürütücüye verilir), çürütücünün içindeki mikrobiyoloji üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olabilmektedir. Buda mikrobiyolojik aktivitenin dengesizliğine veya tamamen durmasına neden olabilir. Bunlar inhibitörler olarak adlandırılır ve inhibitörlerin etkileri, büyük ölçüde hammadde karışımındaki konsantrasyonlarına, aynı zamanda çürütücü içindeki diğer yerel koşullara da bağlıdır. Örneğin, artan miktarda uçucu yağ asidi (VFA), çürütücü içindeki konsantrasyonları AD prosesinin pH tampon kapasitesini aşarsa ve şok seviyeleri olarak adlandırılan seviyelere ulaşırsa proses dengesizliğine neden olabilir (Steffen ve ark., 1998; Wellinger ve ark., 2013).

1.2.3.5. Metan verim arttırıcıları olarak hammadde

Metan verim arttırıcılar grubu, hepsi çok yüksek metan potansiyelinin ortak özelliklerine sahip olan çeşitli hammadde kategorilerine ait bileşikleri içerir (Tablo 2.1). Metan güçlendiriciler, biyogaz tesislerine ekonomik nedenlerle tedarik edilir ve sindirilmiş biyokütlenin hacmi başına metan verimini arttırmak amacıyla, hammadde karışımına oldukça küçük miktarlarda, hassas bir şekilde dozlanmış olarak eklenir. Herhangi bir biyogaz hammaddesinde olduğu gibi, metan güçlendiricilerin yüksek kalitede olması önemlidir, çünkü hammadde karışımına ilaveleri biyogaz üretiminin hem miktarını hem de kalitesini etkilemektedir.

1.2.3.6. Hammaddenin tesis işletimi üzerindeki etkisi

Hammaddenin özellikleri ve bileşimi, anaerobik bir çürütücünün konfigürasyonunu, tasarımını ve operasyonel parametrelerini etkiler. Hammadde üretilen biyogaz ve sindirimin kalitesi ile miktarını belirler ve bu nedenle biyogaz tesisinin genel ekonomisi üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Sindirilecek hammaddenin bileşimi, çürütücünün büyüklüğünü ve dolayısıyla hammaddenin yatırım maliyetini belirlemede en önemli unsurlardan biridir. Çünkü daha uzun bekletme süreleri daha büyük bir çürütücü hacmi gerektirir.

1.2.3.7. Hammadde tanımı ve beyanı

Bir biyogaz tesisine tedarik edilen her bir hammadde türü ve yüküne, hammadde üreticisi tarafından sağlanan malzemenin ayrıntılı bir tanımını içeren belgeler eşlik etmelidir. Bu belgelerde en azından aşağıdaki temel bilgiler dahil edilmelidir.

- Köken; hammadde üreticisi ve tedarik şirketinin adı ve adresi, bunların bir ve aynı olmadığı, atıkların hangi prosesten kaynaklandığı ve işlemden kullanılan hammadde veya orijinal işlenmiş malzemeler.
- Evsel atıklar için; atıkların toplandığı alan, kaynaktan ayrılmış olsun veya olmasın ve kullanılan toplama kaplarının türü (plastik torbalar, kâğıt torbalar, kutular, diğer).
- Metan potansiyeli.
- Kimyasal bileşim (pH, kuru madde, organik kuru madde, makro ve mikro elementler).
- Kontaminasyon (kimyasal ve biyolojik).
- Açıklama (renk, doku, tutarlılık, koku vb.).
- Gübre olarak işleme; depolama veya geri dönüşüm ile ilgili potansiyel tehlikeler.
- Partikül boyutu.
- Kullanılabilirlik (aynı kalitede malzemenin mevcut olduğu süre ve süre).

1.2.4. Biyogaz üretimi

Doğal kaynaklardan sürekli kendini yenileyerek tükenmeyen doğaya zararı çok az olan enerji kaynaklarına yenilenebilir enerji kaynakları denir (Gülşen ve ark., 2021). Biyogaz bir yenilenebilir enerjidir.

Biyogaz, biyogaz tesislerinde anaerobik koşullar altında biyokütlenin bakteriyel olarak parçalanması ile üretilir. Üç biyokütle kategorisi vardır:

- Sıvı gübre, yem atıkları, hasat atıkları, enerji bitkileri gibi çiftlik kökenli substratlar;

- Ayır ayrı toplanmış olan organik atıklar (organik atık konteynerlerinde), pazar atıkları, süresi dolmuş gıdalar veya gıda atıkları gibi özel hanelerden ve belediyelerden gelen atıklar;
- Gliserin gibi endüstriyel yan ürünler, gıda işleme yan ürünleri ya da yağ ayırıcılardan kaynaklanan atıklar. Organik madde, hava geçirmez çürütücülerde birkaç adımda bakteriler tarafından biyogaza dönüştürülür. Bakteriler, ruminantların premidelerinde bulunanlara benzer (Wellinger ve ark., 2013).

Biyogaz, organik materyali dört adımda biyogaza indirgeyen anaerobik bakteriler tarafından üretilir: hidroliz, asitleştirme, asetik asit üretimi ve metan üretimi. Sindirim sürecinin ürünü olan ham biyogaz, % 50-75 metan, % 25-50 karbondioksit ve % 2-8 azot, oksijen ve eser gazlar (örneğin hidrojen sülfür (H_2S), amonyak (NH_3) ve hidrojen) gibi diğer gazlardan oluşur. Biyogaz, üretildiği yerdeki motorlarda elektriğe dönüştürülmeden önce, ham biyogazın, su buharına doymuş biyogazın kükürttten arındırıldığı ve soğutulularak kurutulduğu ilk işlemden önce temizlenmesi gerekir. Bakterilerin substratı verimli bir şekilde bozmasını sağlamak için bazı temel koşullar yerine getirilmelidir (Wellinger ve ark., 2013). Bunlar:

- Havanın yokluğu (anaerobik atmosfer);
- Eşit sıcaklık;
- Optimum besin tedariki;
- Optimum ve homojen pH.

Bir biyogaz tesisinin ekipmanı bu temel gereksinimleri karşılayabilmelidir. Bu nedenle, bir biyogaz tesisi tasarımcısı, verimli biyogaz üretimi için doğru ekipmanın seçilebilmesi için tesisin ne tür bir substratla besleneceğini en başından beri bilmelidir. Biyogaz üretim yöntemleri, proses adımlarının sayısı, proses sıcaklığı, kuru madde içeriği ve substratın beslenmesi ile karakterize edilmektedir. Sıvı gübre, hasat kalıntısı

ve enerji mahsulleri gibi tarımsal yan ürünlerle beslenen biyogaz tesislerinde genellikle ıslak fermentasyon ve yarı-sürekli besleme ile mezofilik (32-42 °C) sıcaklık aralığında tek adımlı bir işlem kullanır. Yöntem, işlemin hız, sindirim derecesi ve hijyenleştirici etki açısından karşılaması gereken gereksinimlere bağlı olarak değişebilir. Örneğin, ilk adım olarak hidroliz genellikle süreci hızlandırır ve ayrıca daha yüksek derecede bozulmaya neden olabilmektedir. Proses sıcaklığının mezofilik (32-42 °C) seviyesinden termofilik (45-57 °C) seviyesine yükseltilmesi de bozulmayı hızlandırır ve substratın sağlık durumunu iyileştirir (Eder ve Schulz, 2006).

Substratın bir karıştırıcının yavaş dönüşü ile karıştırıldığı ve uzun bir yatay çürütücüden geçirildiği tıkaç akışlı fermentasyon yöntemi için daha sağlıklı sonuçlar verildiği de bildirilmiştir. Çürütücüdeki substrat tek geçişte karıştırılmadığından, besleme noktasından teslimat noktasına hızlı geçiş önlenir ve böylece substrat için çürütücüde minimum bekleme süresi elde edilir. Substratların bu zorunlu bekleme süresi, bu yöntemin hijyenleştirici etkisini artırır. Tam karışımli ıslak çürütme prosesinden farklı olarak, bir tıkaç akışlı çürütücü normalde çürütücü hacminin metreküpe başına daha yüksek hacimli organik malzeme yükü taşıyabilir.

Biyogaz tesisinde sindirilen substrat %20'den fazla kuru madde içeriyorsa, bu durumda kuru sindirim yöntemleri olarak adlandırılan yöntemler uygulanmaktadır. Bu yöntemlerde, çürütücü istiflenebilir substratlarla yüklenir. Substratlar karıştırılmaz, ancak perkolat adı verilen bir sıvı içlerinden geçirilir. Yeterince uzun bir bekleme süresinden sonra, çürütücü açılır ve sindirilmiş ürün çıkarılır.

Biyogaz teknolojisinin amacı, organik maddelerin yakıt olarak metana dönüştürülmesi ve aksi takdirde kullanılmayacak olan mevcut kaynakların değerli

gübreye dönüştürülmesidir. Bu, özellikle sindirim için substrat olarak münhasıran yan ürünler ve atıklar kullanıldığında geçerlidir.

1.2.5. Biyogaz Arıtma Yöntemleri

Absorpsiyon tekniğini kullanarak biyogazın yükseltilmesinde, prensip, CO₂'nin metandan daha çözünür olmasına dayanmaktadır. Ham biyogaz, belirli bir sütundaki bir sıvının (su, kimyasal çözelti) akışına karşı püskürtülür. Böylece sıvı, artan CO₂ konsantrasyonu içerir ve kolondan ayrılır. Yine kolondan çıkan yükseltilmiş gaz ise başlangıçtaki biyogaza göre daha yüksek bir metan konsantrasyonuna sahiptir. Biyogaz yükseltme için kullanılan en yaygın absorpsiyon teknikleri; su ile yıkama (Water Scrubbing), kimyasal yıkama ve fiziksel yıkamadır. Bu tekniklerin birbirinden farkı sütunda kullanılan absorbans türüdür (Petersson ve Wellinger, 2009).

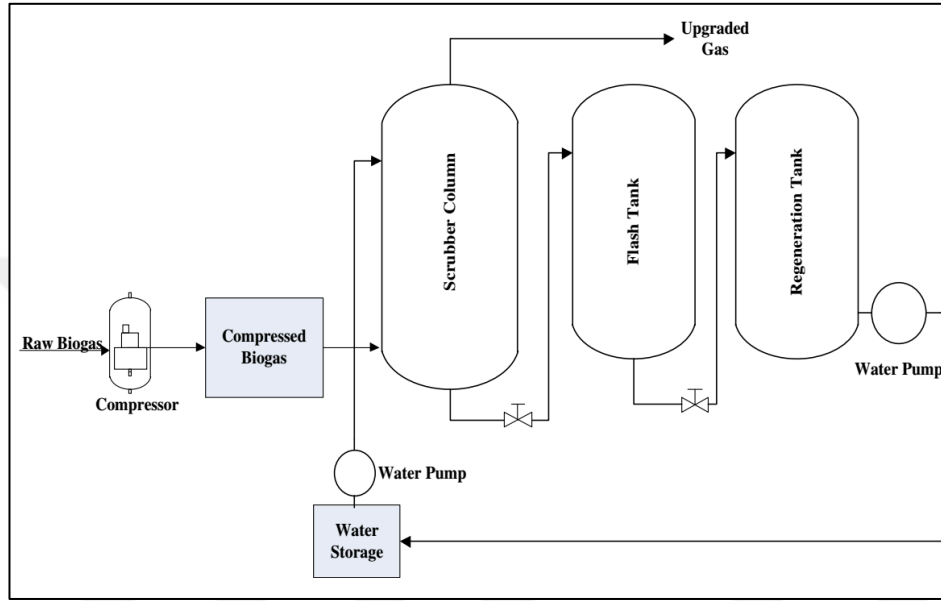
1.2.5.1. Water Scrubbing (Suyla yıkama)

Water Scrubbing, CO₂'yi gidermek için basit bir işlem olarak kabul edilir. Çünkü CO₂ suda metan gazından daha yüksek bir çözünürlüğe sahiptir (Petersson ve Wellinger, 2009). Biyogaz çoğunlukla metandan oluşur ve CO₂, paketlenmiş yıkayıcı kolondaki su ile muamele edilir. Biyogaz sıkıştırılır ve alt taraftan, tipik olarak 1.000-2.000 kPa basınçta yıkayıcı kolona eklenir (Ryckebosch ve ark., 2011). Kolon daha sonra yüksek basınçlı su pompası kullanılarak su ile doldurulur. CH₄ ve CO₂'nin çözünürlüğündeki farklılık nedeniyle, biyogaz karışımı su akışından geçirildiğinde, CO₂ suda çözünür ve CH₄ gaz fazında kalır, böylece CO₂, biyogazdaki metandan ayrılır. Temizlenen gaz metan ile daha zengin hale geldikçe su fazındaki CO₂ konsantrasyonu zamanla azalır (Läntelä ve ark., 2012; Petersson ve Wellinger, 2009; Ryckebosch ve ark., 2011; Zhao ve ark., 2010).

Proses performansı, yıkama kolonu, ham gazın bileşimi, su akış hızları ve kullanılan suyun saflığı gibi faktörlere bağlıdır (Tippayawong ve Thanompongchart, 2010). CO₂'nin sudaki çözünürlüğünü arttırmak için, su yıkama işleminde yaklaşık 1.000-2.000 kPa yüksek basınca ihtiyaç duyulmaktadır (Ryckebosch ve ark., 2011). Bu düşük difüzyon değerleri, biyogazdaki CO₂'nin suda yavaş çözünmesine yol açar. Bu, gaz yıkayıcı olarak suyun kullanıldığı arıtma işleminde, gaz karışımının kolonda uzun bir süre bekletilmesine neden olur. Dolayısıyla yüksek metan seviyelerine sahip biyogaz elde etmek için büyük bir kolon hacmine ihtiyaç duyulmaktadır. Su yıkayıcı kullanmanın diğer bir dezavantajı, tatlı suyun tek su kaynağı olmasıdır. Bu durumda, biyogaz saflaştırma ve yükseltmesinde su yıkama kullanılırken büyük ölçekte tatlı su harcanmaktadır. Bu nedenle su geri dönüşümü yapmak ekonomik açıdan cazip bir seçim olarak görülmektedir (Läntelä ve ark., 2012).

Absorbe edilen CO₂ ile birlikte yıkayıcı kolondan çıkan su yenilenebilir ve yıkayıcı kolona geri gönderilebilir. Suyun yenilenmesi (rejenerasyonu), basınçsızlaştırılarak veya benzer tipte kolondaki suyun hava ile temas ettirilmesiyle gerçekleştirilebilir. Ucuz su kullanımı, örneğin bir kanalizasyon arıtma tesisinden çıkan su bir alternatif olarak düşünülebilir (Zhao ve ark., 2010). Ucuz su kullanıldığında, suyun tekrar sirküle edilmesi önerilmez. Lantela ve ark. çöp gazı yükseltmesini pilot ölçekli su yıkayıcı ile gözlemlemişlerdir (Läntelä ve ark., 2012). Sisteme yeni su eklemeyen su geri dönüşümünü kullanmışlardır. Proses parametreleri, bu pilot sistemle yapılan önceki bir çalışma ile karşılaştırmışlardır. Basınç (20-25 bar), sıcaklık (10-25 °C) ve su akış hızının (5,5-11 L/dak) yükseltme performansı, eser bileşikler (siloksanlar, halojenli bileşikler) ve su kalitesi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışmada, 25 bar, 11 L/dak ve 10–15 °C'de %88,9 ile en yüksek CO₂ giderme verimliliği elde edilmiştir. Karşılaştırmalı ekonomik analiz açısından, Boateng ve Kwofie, su yıkayıcının sermaye, yıllık işletme ve bakım maliyetini, biyogazın arıtılmasında kimyasal absorpsiyon ve biyolojik yöntemin maliyetiyle karşılaştırmışlardır (Ofori-Boateng ve Kwofie, 2009). Sonuç, su yıkayıcının diğer yöntemlere kıyasla daha verimli ve çevre dostu olduğu gösterilmiştir. Önerilen tasarlanmış biyogaz su yıkayıcı, ham biyogazda bulunan CO₂'nin % 93 v / v'sini

giderebildi. Bu yöntemdeki metan kaybı, CO₂ ve metanın sudaki çözünürlüğündeki büyük fark nedeniyle nispeten (% 2'den) küçüktür. (Ryckebosch et al., 2011). Su yıkama tekniğinin şeması Şekil 1.1.'de görülmektedir.

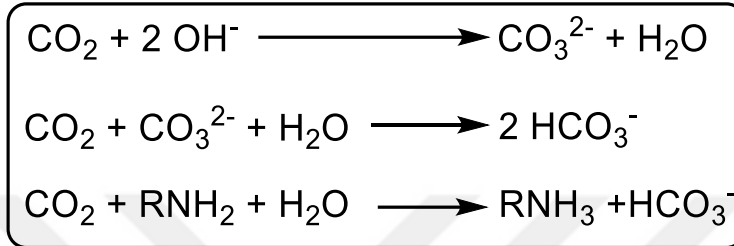


Şekil 1.1. Water scrubbing (Su yıkama) tekniğinin şeması

1.2.5.2. Kimyasal Scrubbing

Kimyasal ve Organik scrubbing, amin çözeltileri veya alkali çözeltileri kullanılarak yapılan yıkamadır ve su yıkama ile aynı temel prensibe dayanır. Yaygın olarak kullanılan mono etanol amin (MEA) ve di-metil etanol amin (DMEA) olarak adlandırılan iki tip amin bileşiği vardır (Petersson and Wellinger, 2009). Genellikle kullanılan alkali çözeltiler sodyum, potasyum ve kalsiyum hidroksitlerdir (Bacocchi et al., 2013; Zhao et al., 2010). Kimyasal yıkama, çözünen madde (CO₂) ve çözücü arasında geri dönüşümlü kimyasal bağın oluşumunu içermektedir. Kimyasal absorpsiyon, CO₂'nin gaz karışımından uzaklaştırılması için etkili bir teknolojidir. Bir

absorpsiyon sütununda, CO₂ gazdan gaz / sıvı arayüzüne ve daha sonra sıvı fazın kütlesine aktarılır, daha sonra CO₂ reaksiyonların gerçekleştiği kolondaki kimyasal madde ile reaksiyona girer. CO₂ emilimi durumunda, aşağıdaki reaksiyonlar meydana gelir (Georgiou ve ark., 2007):

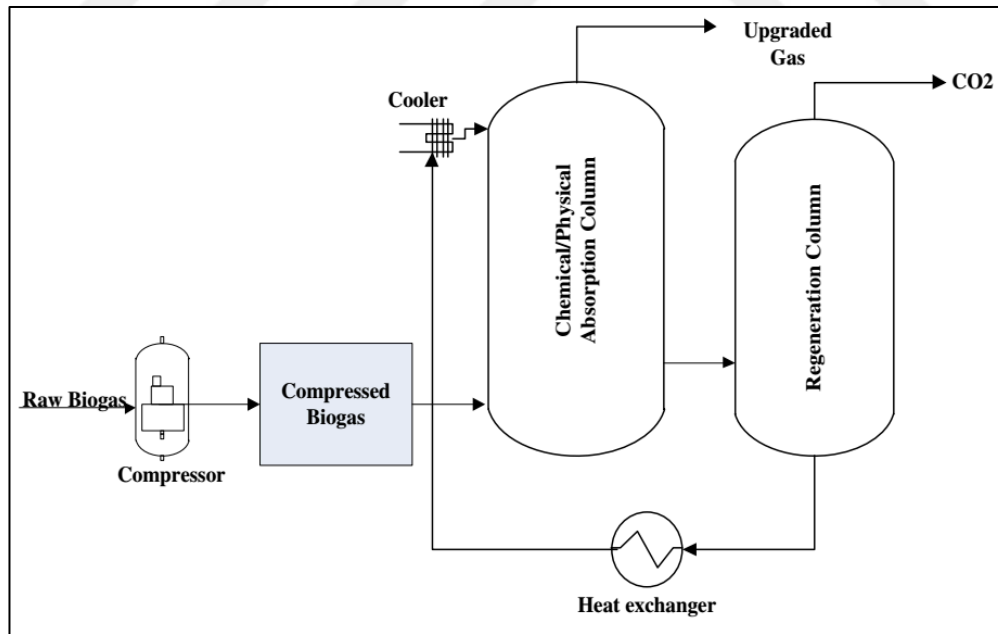


Şekil 1.2. CO₂'nin kimyasal reaksiyonları

Reaksiyondan sonra, kimyasal buhar veya ısı ile rejenere edilir ve CO₂ geri kazanılır. Kimyasal yıkama kullanmanın avantajları, su yıkamaya oranla yüksek verimlilik ve daha yüksek reaksiyon hızları ve düşük basınçta çalışabilme kabiliyetine sahip olmasıdır (Tippayawong ve Thanompongchart, 2010). Asit-baz reaksiyonuna dayandığından, kimyasal absorpsiyon işlemi hızlı bir şekilde çalışır, böylece kolonda tutma süresi kısalmış ve kolon hacmi de küçülür. MEA çözeltisinin çözücü olarak kullanılmasının avantajı, yenilenebilmeye sahiptir olmasıdır; bu çözelti yaklaşık 5 dakika kaynatılarak tamamen yenilenebilir. Dezavantajı ise CH₄ ile zenginleştirilmiş gazın yüksek saflığını elde etmek için büyük miktarda kimyasal maddeye gereksinim duyulmasıdır (Ryckebosch ve ark., 2011; Tippayawong ve Thanompongchart, 2010).

1.2.5.3.Fiziksel Scrubbing

CO₂ gideriminde su ve kimyasal bileşikler yerine, ayırmanın CO₂ ve metanın bir çözücü içindeki fiziksel çözünürlüğündeki farklılıklara dayandığı fiziksel absorpsiyon kullanılabilecek diğer bir yöntemdir. CO₂ çözücünde çok çözünürken, metan çözücünde hiç/az çözünmektedir. Böylece biyogaz çözücünden geçtiğinde, CO₂ çözücüyle taşınır ve geride yüksek metan içerikli gaz kalır. Çözücü rejenerasyonu genellikle damıtma ile yapılır ve kimyasal absorpsiyonda solventlerin rejenerasyonundan daha yüksek bir enerji gerektirir. Fiziksel absorpsiyon işlemine sahip polietilen glikol (Selexol™) de kullanılabilmektedir (Petersson ve Wellinger, 2009; Zhao ve ark., 2010). CO₂'nin PEG'de daha fazla çözündüğü bilinmektedir. Bu da daha düşük çözücü talebi ve daha az pompalama avantajı ile sonuçlanır. PEG, ısıtma ve/veya basınç düşürme yoluyla da yenilenebilir. Kimyasal/fiziksel temizlemenin şeması Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 1. 3 Kimyasal/fiziksel temizleme şeması

1.2.5.4.Basınç Salınlı Adsorpsiyon

Basınç salınlı adsorpsiyon (PSA), belirli bir gazı, bir adsorban malzemeye afinitesine dayanarak bir gaz karışımından ayırmak için kullanılan bir yöntemdir (Zhao ve ark., 2010). Biyogaz saflaştırma durumunda, PSA, CO₂ gazının diferansiyel adsorpsiyonu için zeolit, aktif karbon veya silika jel gibi molekülerin adsorpsiyon malzemesi olarak kullanıldığı bir elek olarak ile doldurulmuş bir paket kolonu kullanılır. Bu kolon metanın geçmesine izin vermektedir (Krich ve ark., 2005). Genellikle, PSA ünitesi, her biri farklı bir bölümde çalışan seri kaplardan oluşur. Bunlar; adsorpsiyon, basınçsızlaştırma, desorpsiyon ve basınçlandırmadır (Andriani ve ark., 2014). PSA süreci, basınç altında gazların adsorbanlara çekilme eğiliminde olduğu gerçeğine dayanmaktadır. Basınç ne kadar yüksek olursa, o kadar fazla gaz adsorbe olmaktadır (Zhao ve ark., 2010). PSA tekniğini kullanmanın avantajları, %97'den fazla metan zenginleştirmenin yanında düşük güç talebi ve düşük emisyonudur. Ayrıca PSA prosesi kuru gaz gerektirir, bu nedenle ham biyogaz prosese girmeden önce kurutulur (Ryckebosch ve ark., 2011).

1.2.5.5.Membran ayırma tekniği

Membran ayırma tekniğinin prensibi, ham biyogazın bazı bileşenlerinin bir membrandan taşınırken, diğerlerinin tutulmasına dayanmaktadır (Zhao ve ark., 2010). Membran, içi boş fiber modüller, spiral sargı modülleri ve zarf tipi modüller olarak inşa edilebilmektedir. Tipik çalışma basıncı 25-40 bar aralığındadır. Yüksek ambalaj yoğunluğu nedeniyle, içi boş elyaf ve spiral sargı modüllerinin uygulanması daha yaygındır (Scholz, Melin, ve Wessling, 2013). Proses genellikle iki aşamada gerçekleştirilmektedir. Gaz, içi boş liflere girmeden önce, bir filtreden geçerek su, yağ damlacıkları ve aerosollerden arındırılır, aksi takdirde membran performansını olumsuz yönde etkilenmektedir (Petersson ve Wellinger, 2009). İki membran ayırma tekniği vardır:

- Yüksek basınçlı gaz ayırma veya gaz-gaz ayırma ve
- Gaz-sıvı adsorpsiyon membranı (Ryckebosch ve ark., 2011).

Her iki teknikte de birden fazla aşama gerekebilmektedir ve bu da metan kaybında bir artışa neden olur. Gaz-gaz ayırımında, ilk olarak H_2S ve yağ buharlarını gidermek için 2.000- 3.600 kPa arasında değişen basınçlı gaz kullanılmaktadır. Ham biyogaz, tek aşamalı performansta CH_4 %94 oranında saflaştırılabilir. İki veya üç aşamalı performans kullanıldığında CH_4 saflığı %96 kadar artırılabilir (Weiland, 2010). Gaz-sıvı ayırımında, mikro gözenekli hidrofobik bir membran, gazı sıvı fazdan ayırır. Bir yönde akan ve zardan geçebilen gaz molekülleri, diğer tarafta karşı akımda akan sıvı tarafından emilmektedir. Gazın hafif basınçlandırılması nedeniyle sıvının gaz tarafına akması engellenmektedir. Adsorpsiyon membranları yaklaşık olarak atmosferik basınçta (100 kPa) çalışır (Ryckebosch ve ark., 2011). Bu süreçte, ham biyogaz tek adımda %96'nın üzerinde CH_4 'e yükseltilebilir.

Membran teknolojisinin düşük maliyet, yüksek enerji verimliliği, işleme kolaylığı, mükemmel güvenilirlik ve az yer kaplama gibi birçok avantajı vardır (Stern, 1994; Basu ve ark., 2010; Lai ve ark., 2003). Bununla birlikte, membran teknolojisinin potansiyel uygulaması büyük ölçüde membran malzemelerinin yüksek separasyon performansı gösterme kabiliyetine bağlıdır. Polimerik membranlar geleneksel gaz ayırma işlemlerinde ilk sırada yer almaktadır. Bunun nedenleri;

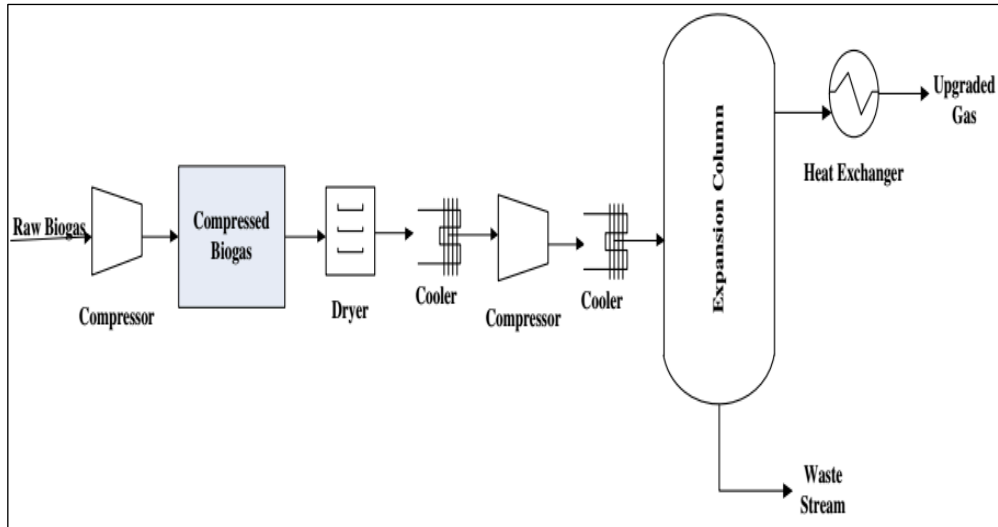
- İnorganik membranlardan çok daha ucuzdurlar,
- İçi boş elyaf veya spiral sargılı modüllere işlenebilen ticari olarak uygulanabilir içi boş liflere veya düz levhalara kolayca imal edilebilirler,
- Gelişimin ileri aşamasındadırlar,
- Yüksek basınçlarda kararlıdırlar ve

- Kolayca ölçeklenebilirler (Basu ve ark., 2010; Henis ve Tripodi, 1983; Merkel ve ark., 2002).

Basu ve ark., Tablo 1'de belirtildiği gibi biyogaz yükseltmesi için membran malzemelerini sınıflandırmışlardır.

Çizelge 1.3. Biyogaz yükseltme için membran malzemeleri (Basu ve ark., 2010)

Organik polimer malzemeler	Polimerik olmayan malzemeler
Polisülfan (PSf), polietersülfon (PES)	Karbon moleküler elekler (CMS)
Selüloz asetat (CA), selüloz triasetat (CTA)	Gözeneksiz karbon
Poliimid (PI), polieterimid (PEI)	Zeolitler ve zeolitik olmayan moleküler elekler
Poliaramid (PA)	Ultramikro gözenekli amorf silika
Polikarbonat (PC)	paladyum alaşımları
Polifenilenoksit (PPO)	Karışık iletken perovskitler



Şekil 1.4. Biyogaz yükseltme için membran akış şeması

1.2.5.6. Biyolojik Teknikler

Biyolojik teknik, biyogazı yükseltmenin alternatif bir yolu olabilir. Bu biyolojik sistem, orijinal CH_4 kütlesini yaklaşık iki katına çıkarırken CO_2 'yi etkili bir şekilde giderebilmektedir. Bu teknikte kullanılan kimyasallar sınırlı olduğundan, bu işlem ekonomik ve çevre dostu olarak kabul edilmektedir. Biyogazı yükseltmek için kemotrofik, heterotrofik ve ototrofik bakterilerin kullanımı yaygındır. Mikroalg kültürü de uygun bir seçenek olarak düşünülmektedir. Kemotrofik tiyobakteriler CO_2 'yi hem aerobik hem de anaerobik yollarda ayırabilmektedir. Çoğu tiyobakteri ototroftir. Bunlar CO_2 tüketir ve indirgenmiş inorganik bileşiklerin oksidasyonundan kimyasal enerji üretir. Yaklaşık %30 CO_2 içeren biyogaz, iyi bir inorganik karbon kaynağıdır ve ototrofik bakteriler için oldukça kullanışlıdır. Strevett ve ark. kemo-ototrofik biyogaz yükseltmenin mekanizmasını ve kinetiğini araştırmışlardır (Strevett ve ark., 1995). Bu deneyde, karbon kaynağı olarak sadece CO_2 ve enerji kaynağı olarak H_2 kullanan farklı metanojenler incelenmiştir.

Ya Kao ve arkadaşları, domuz atık suyunun anaerobik sindiriminden üretilen biyogazı yükseltmek için foto-biyoreaktörleri içeren dış mekân mikroalgleri ile kültür sisteminin kullanımını araştırmışlardır. Etil metan sülfonat (EMS) rastgele mutajenezini kullanarak, yüksek CH_4 ve CO_2 'ye toleranslı olan mutant bir mikroalg suşu olan *Chlorella* sp. MB-9'u izole ettiler. Dış mekân operasyonunun saha çalışmasında, kükürten arındırılmış biyogazdaki CO_2 'nin % 70'i *Chlorella* sp. MB-9 kültürleri tarafından ayrılabilir. *Chlorella* kültürlerinden elde edilen atık su biyogazındaki %70'lik CH_4 konsantrasyonunu %85-90'a yükselmiştir. Bir gaz döngüsü anahtarlama işlemi ile kurulan dış mekân mikroalgleri içeren kültür sisteminin, biyogaz yükseltme için bir CO_2 yakalama modeli olarak verimli bir şekilde kullanılabilir. Bu sonucuna ulaşılmıştır (Kao ve ark., 2012). Biyolojik tekniklerin avantajları; düşük enerji gereksinimi, hafif koşullar ve elementel kükürt yan ürününün sülfürik asit üretimi veya tarımsal uygulama için yeniden kullanılabilmesidir (Kim ve ark., 2004; Vannini ve ark., 2008). Bu teknikleri kullanmanın dezavantajları, bakteri

veya mikroalglerin yetiştirilmesi için ek besinlerin gerekli olması ve işlenmiş biyogazda az miktarda O₂ ve N₂'nin bırakılmasıdır (Zhao ve ark., 2010).

1.2.5.7.Kriyojenik Ayırma

Kriyojenik yükseltmede, metanın kaynama noktası (161°C) ve karbondioksitin süblimleşme noktasının (78.48°C) farklılığından yararlanılır (Willmes, 2007). Proseste sıcaklık seviyesine bağlı olarak, teorik olarak diğer gaz bileşenleri de kriyojenik bir proseste ayrıştırılabilir. Bir üretici uygulama örneğini kullanarak, aşağıdaki adımlar gerçekleştirilir (Wellinger ve ark., 2013);

- İlk olarak 6°C'de bir çığırma noktası düşüşü sağlanır. Bu sıcaklıkta H₂S ve siloksanlar katalitik adsorpsiyon ile (kısmen) uzaklaştırılabilir.
- İlk işlemde sonra ham gaz 18-25 bar'a kadar sıkıştırılır.
- Daha sonra sıcaklık 25°C'ye düşürülür. Bu sıcaklıkta gaz kurutulur ve olası kalan siloksanlar da yoğunlaştırılır.
- Son adım olan desülfürizasyon (parlatma) gerçekleşir. Sıcaklığın 50-59 °C'ye düşmesi CO₂'nin sıvılaşmasına neden olur ve daha sonra sistemden uzaklaştırılır.

Burada %0,1-1 oranında bir metan kaybı gerçekleşebilir (Burmeister et al., 2009). Yeni verilere göre metan kayıpları %2 ile sınırlıdır. Ham biyogazla ilgili olarak elektrik talebinin 0,18-0,25 kWh_{el}/m_n³ olduğu bildirilmiştir Çıkış gazı önemli miktarda CH₄ içerdiğinden, çıkış gazı akışında emisyon azaltımı gerekebilmektedir (Wellinger ve ark., 2013).

Çizelge 1.4. CO₂ giderme tekniklerinin avantaj ve dezavantajlarının özeti (Andriani ve ark., 2014)

Teknikler	Avantajlar	Dezavantajları
Water scrubbing	• Basit işlem, bir su akışı kullanarak hem H₂S'yi hem de CO₂'yi giderin • Özel kimyasal gerekmez • Çıkışta iyi metan içeriği (%97'den fazla) • Düşük CH₄ kayıpları (< %2)	• Yüksek basınç, gaz basmak ve suyu pompalamak için daha yüksek enerji gerekir • Fiziksel çözünürlüğe dayalıdır (fiziksel süreç), dolayısıyla süreç yavaştır • Kimyasal absorpsiyona kıyasla daha büyük kolon hacmine ihtiyaç duyar • CO₂ geri kazanımında zorluk • Rejenerasyonda bile çok su gerektirir • H₂S nedeniyle korozyon sorunu • Bakteri oluşumu nedeniyle tıkanma
Kimyasal scrubbing	• Yüksek CH₄ saflıkları (>%95) ve düşük CH₄ kayıpları (<%0,1) • Hacim birimi başına daha fazla çözünmüş CO₂ (suya kıyasla) • Çok düşük CH₄ kayıpları (<0,1 %) • İşlem, su ile temizlemeden daha hızlıdır • Sütun hacmi, suyla temizlemeden daha	• Kimyasal çözümü yenilemek için buharın sağlanması gerektiğinden yoğun enerji • Çözücünün işlenmesi zor • Korozyon sorunları • Atık kimyasal arıtma gerektirebilir
Fiziksel scrubbing	• Suya göre daha yüksek emilim • Yüksek CH₄ saflıkları (>%95) ve düşük CH₄ kayıpları	• Önce H₂S çıkarılmazsa solvent rejenerasyonu karmaşıktır • Çözücüyü yenilemek için daha yüksek enerjiye ihtiyaç var • Çözücü pahalıdır ve işlenmesi zordur
Basınç salınımlı Adsorpsiyon (PSA)	• Nispeten yüksek saflıkta üretimde ekonomi. • Sermaye maliyeti payı makul. • Nispeten hızlı kurulum ve çalıştırma	• Yüksek sermaye maliyeti (PSA birimindeki sütun sayısından etkilenir) • Eksik ovma (önce ve sonra başka işlemler gereklidir) • Valflerin arızalanması durumunda CH₄ kayıpları
Membran bazlı teknikler	• Hızlı kurulum ve başlatma. • Üretim çıktısı esnektir. • Saflık ve akış hızı değişebilir • Düşük enerji gerekli • Yüksek CH₄ saflıkları (>%95)	• Düşük membran seçiciliği • Yüksek saflık gereksinimleri için uygun değildir. • Üretilen gaz birimi başına nispeten daha fazla elektrik tüketir • Genellikle daha düşük metan konsantrasyonu sağlar, ancak yüksek saflıkta üretilir
Biyolojik teknikler	• Düşük enerji gereksinimleri • İstenmeyen son ürün yok • CH₄'ün zenginleştirilmesi	• Bakteri üremesi için ek besinler gereklidir • Arıtılmış biyogazda az miktarda O₂ ve N₂ kalır.

Kriyojenik Ayırma	• Yüksek CH₄ saflıkları (%90–98) • Kuru buz olarak kullanılabilenler gibi pazarlanabilir formda CO₂ üretin • Sıvı metan gaz hacmini azaltır, böylece tüp içinde paketlenabilir ve kolayca dağıtılabilir.	• Başta kompresör, ısı eşanjörü ve soğutucu olmak üzere çok sayıda proses ekipmanı kullanır • Yüksek işletme ve bakım maliyeti
-------------------	--	---

Çizelge 1.5. Yükseltilmiş biyogazın enerji gereksinimi (metreküp başına kilovat saat olarak) (Andriani ve ark., 2014)

Teknikler	Kişi, 2009	Beil, 2009	Berndt, 2006
PSA	0,5-0,6	0,24	0,335
Water scrubbing	0.3	0.2	43
Kimyasal scrubbing	0,15	0.12	0,646
Fiziksel scrubbing	0.4	-	49
Membran bazlı	-	0.19	0,769
Kriyojenik ayırma	-	-	-

Çizelge 1.6. Yükseltme teknolojilerinin maliyet tahminlerinin ve bakım maliyetlerinin özeti (Andriani ve al., 2014)

Teknikler	Bakım maliyeti (€/yıl)	m ³ başına maliyet (€/m ³)
PSA	56.000	0,26
Water scrubbing	15.000	0,15
Kimyasal scrubbing	59.000	–
Fiziksel scrubbing	39.000	–
Membran bazlı	25.000	0,22
Kriyojenik ayırma	–	0.40

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Absorpsiyonun ayırma prensibi, bir sıvı yıkama çözeltisindeki çeşitli gaz bileşenlerinin farklı çözünürlüklerine dayanmaktadır. Absorbe edilen gaz bileşenleri fiziksel olarak yıkama sıvısına bağlanır. Bu durumda su seçici bir emicidir ve biyogaz safsızlıklarına karşı daha az hassas olması nedeniyle küresel biyogaz iyileştirme pazarının %41'ine sahip olan endüstriyel ölçekte biyogazın suyla yıkanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır (Thrän ve ark., 2014). CH_4 'ün çözünürlüğü $25\text{ }^\circ\text{C}$ 'de CO_2 'ninkinden 26 kat daha düşüktür (Gavin and Sinnott, 2013). Ayrıca Persson ve diğerlerine göre (Persson ve ark., 2007), daha polar olan CO_2 veya H_2S ile polar olmayan metanın farklı bağlanma kuvvetleri bu bileşikleri ayırmak için kullanılır. Bu nedenle, H_2S 'in sudaki çözünürlüğü CO_2 'ninkinden daha yüksek olduğundan H_2S prensip olarak CO_2 ile birlikte uzaklaştırılabilir. Bununla birlikte, çözünmüş H_2S çok aşındırıcı olduğundan ve rahatsız edici kokusundan dolayı, CO_2 gideriminden önce ayrılması tavsiye edilir (Awe ve ark., 2017).

Biyogaz arıtma, tarımsal atık veya gübre gibi organik maddelerden üretilen biyogazın kullanımında çok önemli bir adımdır. Ham biyogaz, araç yakıtı olarak veya gaz şebekesine enjekte edilmesi de dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda kullanılmadan önce giderilmesi gereken önemli miktarda karbondioksit (CO_2) içerir (Bauer ve ark., 2013). Biyogazın iyileştirilmesi için yaygın olarak kullanılan teknolojilerden biri, saflaştırılmış biyometan elde etmek için CO_2 'nin suda emilmesini içeren su yıkama işlemidir (Batlle-Vilanova ve ark., 2015).

Suyla yıkama, CO₂'nin sudaki çözünürlüğüne dayanan fiziksel bir yıkama işlemidir. Ancak, bu işlemin bazı sınırlamaları vardır. Ahmed ve arkadaşlarına göre, su ile yıkama teknolojik olarak basittir ancak su adsorpsiyonu yoluyla metan kaybı nedeniyle düşük bir verime sahiptir (Ahmed, 2021). CO₂'nin sudaki çözünürlüğü organik çözücülere kıyasla daha düşüktür, bu da sistemde yeniden sirküle edilmesi gereken daha büyük hacimde su ile sonuçlanır (Bauer ve ark., 2013). Bu sınırlamalara rağmen, su ile yıkama biyogazın iyileştirilmesi için en yaygın olarak benimsenen teknoloji olmaya devam etmektedir ve toplam iyileştirme tesislerinin yaklaşık %40'ını oluşturmaktadır (Batlle-Vilanova ve ark., 2015).

Su ile yıkamanın yanı sıra, biyogazın iyileştirilmesi için ticari olarak başka teknolojiler de kullanılmaktadır. Bunlar arasında organik çözücü yıkaması, amin yıkaması, basınç salımlı adsorpsiyon (PSA) ve gaz ayırma membranları bulunmaktadır. Teknoloji seçimi, teknolojinin olgunluğu, yatırım maliyeti, enerji talebi ve sarf malzemeleri gibi faktörlere bağlıdır. Biyogaz iyileştirme pazarı son yıllarda hızla gelişmiştir ve amin yıkama gibi yeni teknolojiler önemli pazar payları kazanmıştır (Bauer ve ark., 2013).

Fiziksel bir absorban kullanılarak biyogazın iyileştirilmesi, rejenerasyon için düşük enerji gereksinimi olan basit ve verimli bir teknolojidir. Karbondioksit giderimindeki iyi performansı nedeniyle, propilen karbonat absorpsiyonu doğal gaz ve sentez gazının saflaştırılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Nie ve arkadaşları çalışmalarında, absorban olarak propilen karbonat ile biyogaz yükseltmenin fizibilitesi, su ile yıkama ve propilen karbonat absorpsiyonunun karşılaştırmalı testleri ile incelenmiştir. Absorpsiyon gazı/sıvı oranı, hava sıyırma gazı/sıvı oranı ve besleme gazındaki hidrojen sülfür içeriğinin etki faktörleri araştırılmıştır. Biyogazın propilen karbonat ile arıtılma kapasitesi su ile arıtılma kapasitesinin 4-5 katıydı. Propilen karbonat absorpsiyonu hidrojen sülfür varlığına karşı daha iyi tolerans göstermiştir. Besleme gazındaki hidrojen sülfür konsantrasyonu 4000 ppm'e yükseldiğinde, ürün

gazındaki metan içeriği emici olarak su kullanıldığında %5,09 oranında azalırken, propilen karbonat emilim testinde sadece %1,68 oranında azalmıştır. Sonuçlar, propilen karbonat absorpsiyonunun yüksek verimliliğe sahip olduğunu ve biyogaz yükseltme için uygulandığında enerji tasarrufu açısından bariz bir avantaj sağladığını göstermiştir. Düşük metan geri kazanımı ve yüksek solvent kaybı dezavantajları, flaş buharlaştırma ve solvent geri kazanımı yoluyla önlenebilir (Nie ve ark., 2013).

Biyogazın iyileştirilmesi temelde bir gaz ayırma işlemidir ve genellikle biyometan veya biyo-CNG olarak bilinen CH_4 bakımından zengin bir gaz elde edilir. CO_2 ve diğer istenmeyen bileşenleri biyogazdan ayırmak için çeşitli yöntemler mevcuttur. Ancak, uygun yöntemin seçilmesi maliyet, enerji gereksinimi, saha koşulları, uygulama vb. gibi çeşitli faktörlere bağlıdır (Wellinger ve ark., 2013). Bu yöntemler, moleküler özelliklerindeki farklılıklara veya biyogazdaki bileşenlerin termodinamik ve taşıma özelliklerine dayanmaktadır; örneğin absorpsiyon (basıncı su ile yıkama, fiziksel veya kimyasal absorpsiyon), adsorpsiyon (basınç salınlı adsorpsiyon), membran (yüksek basınç, düşük basınç) Sıcaklığa dayalı ayırma ve basınçlı kriyojenik yükseltmedir (Andriani ve ark., 2014).

Absorpsiyon, CO_2 'nin absorbe edilmesi için bir çözücüye ihtiyaç duyduğu fiziksel veya kimyasal bir süreçtir. Fiziksel absorpsiyonda CO_2 'nin çözücüdeki çözünürlüğüne bağlı olarak su, polietilen glikol, Selexol ve Genosorb gibi çözücüler kullanılırken, kimyasal absorpsiyon yönteminde yüksek oranda CO_2 seçici olan ve çözeltiye sürmek için kimyasal olarak reaksiyona giren mono-etanol amin veya di-metil etanol amin gibi kimyasal çözücüler kullanılır (Tippayawong ve Thanompongchart, 2010). Kimyasal çözücülerle ilgili başlıca kısıtlamalar toksisite, aşındırıcılık ve rejenerasyon için önemli miktarda enerji tüketimine gereksinim duyulmasıdır (Lin ve Shyu, 1999).

Bir adsorpsiyon yöntemi olan basınç salınlı adsorpsiyonda (PSA), CO_2 aktif karbon gibi gözenekli bir katı yüzey üzerine adsorbe edilir ve daha sonra basınçtaki değişikliklerle desorbe işlemi gerçekleştirilir. Bu yöntem yüksek metan kayıpları,

karmaşık proses tasarımı ve yüksek işletme maliyetleri içermektedir (Cavenati ve ark., 2005).

Membran ayırma yöntemi, seçici geçirgenliğe ve CO₂'nin biyogazdan bir bariyer görevi gören yarı geçirgen bir membrandan tercihli olarak aktarılırken diğer bileşenler tutulmasına dayanır. Ancak, membranın yüksek maliyetine ek olarak proses sırasındaki yüksek basınçlar, membranın kimyasal korozyonu, kontaminasyonu ve aynı zamanda yüksek bakım maliyetleri bu yöntemin önemli dezavantajlarından bazılarıdır (Shao ve ark., 2012).

Kriyojenik ayırmada, gaz soğutularak ve sıkıştırılarak CO₂'yi biyogazdan ayrılır. Bu işlem, gaz formundaki farklı maddelerin farklı sıcaklık ve basınç koşullarında sıvılaşması temeline dayanır (Jonsson ve Westman, 2011).

Tüm iyileştirme teknolojileri arasında, fiziksel absorpsiyon sürecine dayalı su ile yıkama tekniği, biyogaz iyileştirmesi için en basit ve en verimli, sürdürülebilir ve en çok uygulanan yöntem olmaya devam etmektedir. Su ile yıkama yöntemi fiziksel bir absorpsiyon işlemidir. CO₂'nin CH₄'e kıyasla suda daha fazla çözünürlüğüne dayalı olarak gazların ayrılmasını içeren bir saflaştırma işlemidir (Patterson ve ark., 2011). Bu süreç, basınç, sıcaklık ve sudaki gazın konsantrasyonuna bağlı olarak, gazların sudaki çözünürlüğü prensibine göre yönetilir. Suyla yıkama prosesi sadece suyun çözücü olarak özelliklerine ve gazların sudaki çözünürlüğüne değil, aynı zamanda gaz ve su akış hızları, kolon içindeki basınç, salmastra malzemesi, salmastralı kolonun çapı ve yüksekliği gibi çeşitli operasyonel ve dolgulu yatak tasarım parametrelerine de bağlıdır. Bu, CO₂ giderimi biyogaz yükseltimi için yüksek basınçlı su yıkama tabanlı dolgulu yatak absorpsiyon prosesinin optimum tasarımı için çok önemlidir. Su yıkama prosesi, biyogazdan CO₂ emilimi için düşük basınç alçalması ile birlikte yüksek kütle transfer verimliliğini teşvik etmek üzere yüksek bir yüzey alanı sağlamak için dolgulu yataklı bir kolon kullanılmaktadır (Petronela ve ark., 2013).

Yükseltme işlemi sırasında, sıkıştırılmış biyogaz yıkama kolonunun altından, su ise kolonun üstünden besleme yapılır. Su ve biyogaz arasında bir karşı akış akımı sağlanır. Biyogaz kolonda yukarı doğru hareket ederken, CO₂ ile birlikte bir miktar CH₄, yıkama kolonunun alt kısmından çıkan su tarafından emilir. Su, düşük basınçta karbondioksitten arındırılır ve ardından absorpsiyon kolonuna geri yüklenebilir. Bu yöntem daha düşük sermaye yatırımı ve işletme maliyetleri sağlar. Güvenilir ve bakımı kolaydır. Ayrıca yüksek gaz saflığı ve verimi sağlar (Petronela, Ghinea, et al., 2013). Su ile yıkama iyi geliştirilmiş bir teknolojidir. Dünya çapında bu tekniğe ilgi her geçen gün artmaktadır. 2019'un sonuna kadar faaliyette olan 500'den fazla biyogaz iyileştirme tesisi içerisinde 200'den fazlası su ile yıkama teknolojisine dayanmaktaydı (Aryal ve ark., 2021).

CO₂'nin çözünürlüğünün kimyasal ve fiziksel çözücülerde daha yüksek olmasına rağmen, su, CO₂'nin biyogazdan yıkama kolonları kullanılarak ayrılması için tercih edilen yöntem olmaya devam etmektedir. Bir çözücü olarak su zararsızdır, yanıcı değildir ve kimyasal olarak kararlı, donma noktası düşüktür. Kolay uçucu değildir, aşındırıcı değildir. Köpürmez ve viskoz değildir, bu da emilim oranını artırır ve düşük basınç alçalması sağlar (Houghton, 2007; Kestin ve ark., 1978).

Su en bol bulunan ve genellikle polar gazlar için yüksek çözünürlüğe ve polar olmayan gazlar için düşük çözünürlüğe sahip evrensel bir çözücü olarak adlandırılır. Suyun ısı kapasitesi, yüksek basınçlarda ve düşük sıcaklıklarda düşük viskozite gibi önemli özelliklere sahiptir. CO₂ gibi gazlar için bir emici olarak suyun başlıca faydaları çözünürlüğü, bol miktarda bulunabilirliği ve düşük maliyetidir. Buna ek olarak, basınçlı suyun rejenerasyonu enerji veya özel ekipman gerektirmez. Bu faktör, kimyasal ve organik fiziksel çözücüler yerine suyu dikkate almaya değer kılmak için yeterlidir (Aryal ve ark., 2021).

Su akış hızı, CO₂ giderme verimliliğini doğrudan etkiler. Suda CO₂ absorpsiyonu prosesi için kütle transferine karşı direnç sıvı fazdadır. Yüksek su akış hızları, birim zamanda CO₂ molekülleri ile reaksiyona girecek daha fazla su molekülü sağlar. Ayrıca salmastra malzemesinin ıslanan yüzeyinde bir artış olur, bu da kütle transferi için etkin alanı artırır (Richardson ve ark., 2002).

Basınç, CO₂'nin suda emiliminde çok önemli bir rol oynar. Läntelä ve arkadaşları, 10°C-15°C sabit sıcaklıkta basınç 20 bar'dan 25 bar'a yükseldikçe CO₂ giderim veriminin %85,8'den %88,9'a yükseldiğini gözlemlemiştir (Läntelä ve ark., 2012).

Xiao ve arkadaşları, dolgu yataklı kolonu 8, 10 ve 12 bar basınçta çalıştırmış ve 12 bar basınçta %94,2 ile en yüksek CO₂ giderme verimini gözlemlemiştir. Ayrıca yükseltilmiş gazda sadece %2,6 oranında CO₂ tespit etmiştir. Basınç arttıkça CO₂'nin sudaki çözünürlüğü artmaktadır, bu da biyogazda yüksek CH₄ konsantrasyonu elde edilmesini sağlamaktadır. Yüksek basınç aynı zamanda absorpsiyon için gereken su miktarını da azaltır (Xiao ve ark., 2014).

Sıcaklık, su ile yıkama işlemindeki en önemli faktörlerden biridir. Sudaki CO₂ emilimi, büyük miktarda çözünme ısısının açığa çıktığı fiziksel bir süreçtir (Carroll ve ark., 1991; Weiss, 1974). Bu nedenle absorpsiyon kolonundaki düşük sıcaklıklar CO₂ gideriminin artırılması için avantaj sağlamaktadır. Düşük sıcaklıklarda CO₂'nin çözünürlüğünde bir artış gözlenmektedir. Läntelä ve diğerleri, 25 bar sabit basınçta sıcaklık 10°C-15°C'den 20°C-25°C'ye yükseldikçe CO₂ giderim verimliliğinde %88,9'dan %87,3'e bir düşüş gözlemlemiştir (Läntelä et al., 2012). Benzer bir durum Xiao ve diğerleri tarafından da gözlemlenmiştir. Sıcaklık 7°C'den 40°C'ye yükseldikçe CO₂ giderme verimliliğinde %85,3'ten %52,2'ye bir düşüş görülmüştür.

Bu nedenle, biyogazın iyileştirilmesi için su yıkama kolonundaki sıcaklık kontrolüne, özellikle tesis yaz aylarında çalıştırıldığında, büyük önem verilmelidir (Xiao ve ark., 2014).

Petronela ve arkadaşları, yıkama kolonundaki daha yüksek basıncın (17 bar) daha düşük su akış hızını telafi ettiğini gözlemlemiştir (Petronela ve ark., 2014).

Suyla yıkama, CO₂'nin ve H₂S'in çözünürlüğünün, CH₄'ün sudaki çözünürlüğünden daha yüksek olması nedeniyle çözünürlükten faydalanır. CO₂'nin sudaki çözünürlüğünün de zayıf olması nedeniyle, CO₂'in sudaki çözünürlüğünün artırılması gerekir. CO₂ kısmi basıncını ve dolayısıyla sudaki çözünürlüğünü artırmak için, yıkayıcının çalışma basıncı genellikle 0,8 ila 1,2 MPa arasında ayarlanır. CO₂'yi yıkama suyundan ayırmak ve böylece suyu rejenere etmek için ikinci bir düşük basınçlı yıkayıcı kullanılmaktadır. Bu durumda CO₂, karbondioksiti güçlü bir şekilde bağlayan ve bu nedenle daha yüksek sıyırma sıcaklıkları gerektiren diğer kimyasal çözücülere kıyasla, karbondioksit ayırma enerji gereksinimlerini azaltan bir sıyırma maddesi olarak hava kullanılarak ortam sıcaklığında sudan sıyrılır. Bu proses yüksek basınçlı su yıkama (HPWS) olarak adlandırılır. Alternatif bir proses, yıkayıcının atmosfer basıncına yakın basınçlar altında çalıştırıldığı basınçlı su ile yıkamadır (NAPWS).

Ham biyogaz içerik olarak %40–75 CH₄, %25–60 CO₂ ve H₂S, N₂, H₂, CO gibi diğer gazlardan oluşmaktadır. Biyogaz üretimi yaygın ve kolay olmasına karşılık; içeriğinde bulunan korozyon etkiye sahip H₂S ve yüksek miktarda bulunan CO₂ sebebi ile saflaştırılmadan kullanımı oldukça kısıtlıdır (Ryckebosch ve ark., 2011). Bununla birlikte, biyogazın içeriğindeki CH₄ oranının en az %90 seviyelerine yükseltilmesi ile doğalgaz, CNG ve LNG kullanan araçlarda yakıt olarak kullanılması mümkündür.

Ayrıca biyogaz yerel olarak üretilen bir enerji kaynağı olduğu için, fosil yakıt kullanımında mecbur kalınan uzun mesafelerde nakliye ihtiyacı duyulmamaktadır (Çiftçi ve ark., 2017).

Biyogazdan istenmeyen bileşenlerin $\geq 97\%$ CH_4 'e kadar uzaklaştırılmasından sonra, 20-25 MPa'da (2900-3600 psi) biyo-sıkıştırılmış doğal gaz (biyo-CNG) dönüştürülebilir (Farzaneh-Gord ve Branch, 2011; Molino ve ark., 2013). Sıkıştırma aynı zamanda yüksek enerji ve basınçla depolama hacmini azaltır (Kapdi ve ark., 2005). Yüksek basınçta sıkıştırma çok pahalı olmasına rağmen, biyo-CNG'nin yüksek ısıtma değeri ve çok değerli ürünü bu maliyeti haklı çıkarmaktadır (Krich, 2005). Sıkıştırma, biyogazın biyo-CNG'ye dönüştürülmesi için fiziksel bir yaklaşımdır. Ayrıca, biyo-CNG'nin özellikleri CNG ile aynıdır (Khan ve ark., 2017).

Biyo-CNG veya normal CNG'nin depolanması önemli bir aşamadır çünkü silindir dolum verimliliğini, dolum süresini, yüklü kütleyi, güvenliği ve kompresörün bakım maliyetini etkiler (Gord ve ark., 2011). CNG gibi biyo-CNG de gelecekte kullanılmak üzere hava geçirmez çelik tanklarda depolanabilir. En yaygın kullanılan depolama verimliliği. Şekil 13 tipik bir biyo-CNG dolum istasyonunu göstermektedir. Genellikle sırasıyla 0,4 veya 1,6 MPa'dan daha düşük veya orta basınçlı dağıtım boru hattından gelen biyo-CNG, büyük çok kademeli kompresörler kullanılarak sıkıştırılır. Genel olarak, bir depolama sistemi birkaç yüksek basınçlı büyük silindirden oluşur, böylece biyo-CNG diferansiyel basınçlar altında araca akar. Tipik olarak, depolama sistemi 20,5-25 MPa basınçta çalışırken, aracın maksimum yerleşik silindir basıncı 20 MPa'dır.

Biyo-CNG dolum istasyonunda gaz, daha verimli ve ekonomik olması için depolama sisteminde depolanır. Dolum istasyonlarında biyo-CNG depolamak için

tampon ve kademeli depolama sistemleri olmak üzere iki yaygın sistem vardır. (Farzaneh-Gord ve ark., 2011).

Tampon depolama sisteminde, biyo-CNG'nin basıncı 3000-3600 psi (20,7-24,8 MPa, 207-248 bar) seviyesinde tutulur ve 300 K'de aracın silindirlerine maksimum 2900 psi (20 MPa, 200 bar) gaz basıncı sağlar. Bu depolama sisteminde, tüm dolum istasyonu rezervuar silindirleri bağlanır ve tüm süre boyunca aynı basınçta tutulur (Kapdi ve ark., 2005).

Kademeli depolamada, silindirleri biyo-CNG ile doldurmak için farklı basınçlarda (düşük, orta ve yüksek) üç rezervuar kullanılır. Bu rezervuarların her biri, artan basınç sırasına göre kullanılan birkaç büyük silindir içerir. Gaz dolumu sırasında başlangıçta düşük basınçlı rezervuar silindire bağlanır. Önceden ayarlanan seviyeye ulaşıldığında, otomatik olarak orta basınçlı rezervuara geçilir ve son olarak maksimum gaz miktarını sağlamak için yüksek basınçlı rezervuar bağlanır. Kademeli depolama sisteminde, farklı basınçlardaki üç rezervuardan biyo-CNG dolumu, tampon depolama sistemine kıyasla daha fazla zaman alır. Bu nedenle, kademeli depolama sistemi normalde daha uzun bir dolum süresi alan büyük araçların doldurulması için seçilirken, tampon depolama sistemi hızlı silindir dolumu olan küçük aile arabaları için tercih edilir.

Farzaneh-Gord ve arkadaşları, depolama türünün gaz dolum istasyonlarının performansı üzerindeki etkisini incelemiş ve çeşitli önemli parametrelerin teorik bir analizini yapmıştır. Tampon depolama sisteminde araç silindirini nihai basıncına kadar doldurmak için gereken dolum süresinin kademeli depolama sisteminden yaklaşık %66 daha az olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, tampon depolama sistemi için yüklü kütle, kademeli depolama sisteminden yaklaşık %20 daha yüksekti ve bu da tampon

sistemine kademeli sisteme göre bir avantaj sağlamaktadır. Kademeli depolama sisteminin tampon sistemine göre en büyük avantajı, bu konfigürasyon için entropi üretiminin %50 daha az olması ve tampon sistemine kıyasla daha düşük kompresör giriş işine yol açmasıdır. Sıcaklığın yüklü kütle üzerinde büyük bir etkisi vardır; yüksek sıcaklık silindirdeki yüklü kütle miktarını azaltmaktadır. Kademeli depolama sistemi, tampon depolama sistemine kıyasla daha az yüklü kütle ile sonuçlanan daha yüksek bir nihai sıcaklığa sahiptir (Farzaneh-Gord ve ark., 2011).

Küresel ısınma, enerji krizi ve fosil yakıtların artan maliyeti, alternatif araç yakıtlarının geliştirilmesi için itici güçlerdir. Biyo-CNG olarak da adlandırılan sıkıştırılmış biyometan, araç yakıtı olarak kullanıldığında motor performansı, gaz tüketimi ve verimlilik açısından CNG ile aynı özelliklere sahiptir (Chandra ve ark., 2011; Lim ve ark., 2015). CO₂, sera gazı emisyonlarından biridir ve küresel ısınma ve iklim değişiklikleri göz önüne alındığında herhangi bir yakıt için önemli parametrelerdir. Her iki yakıt için CO₂ emisyon seviyesinde önemli bir fark yoktur, ancak biyo-CNG için NO_x, HC ve CO emisyon seviyeleri araç yakıtı olarak kullanıldığında CNG'den biraz daha yüksektir. CO₂ ve HC emisyonları neredeyse aynı iken CO emisyonlarında Bio-CNG biraz yüksektir. NO_x emisyonları karşılaştırıldığında Bio-CNG yaklaşık iki katı kadar yüksek olduğu tespit edilmiştir (Patterson ve ark., 2011; Subramanian ve ark., 2013; Khan ve ark., 2017).

Araç motorunun ısınma süresi boyunca sıcaklık düşüktür. Sıcaklıktaki düşüş CO'nun CO₂'ye oksidasyon oranını düşürerek yüksek CO emisyonuna neden olur (Mathai ve ark., 2012). CNG'deki etan ve propan, metandan daha az aktivasyon enerjisine sahiptir ve bu da biyo-CNG'ye kıyasla daha iyi yanma sağlar. Sonuç olarak, biyo-CNG araç yakıtı olarak kullanıldığında CNG'ye kıyasla biraz daha yüksek CO emisyonu vermektedir. Yüksek hidrokarbon karbon (HC) emisyonunun nedeni de ısınma süresi boyunca düşük sıcaklıkta zayıf oksidasyonun neden olduğu eksik yanmadır. Bio-CNG, CNG'ye kıyasla daha yüksek oranda N₂ içerir ve bu da yanma

sırasında NO_x oluşumunu destekler. Ayrıca, biyogaz (24,11 km/kg) ve CNG (24,38 km/kg) arasında yakıt ekonomisi açısından önemli bir fark yoktur (Subramanian et al., 2013). Biyo-CNG yakın gelecekte en sürdürülebilir, ekonomik ve çevre dostu araç yakıtlarından biri olmak için büyük bir potansiyele sahiptir (Ryan and Caulfield, 2010). Biyo-CNG'nin düşük yoğunluğu ve yüksek termal verimliliği onu ekonomik bir araç yakıtı haline getirmektedir (Osorio ve Torres, 2009; Vijay ve ark., 2006).

Ağır vasıtalar için biyo-CNG kullanımının çok avantajlı olduğu görülmektedir. Çünkü diğer yakıtlara kıyasla daha yüksek kalorifik değere sahiptir. Ayrıca daha çevre dostudur. Ağır vasıtalar için CNG yerine biyo-CNG kullanıldığında sera gazı emisyonunda %63'lük bir azalma görüldüğü tespit edilmiştir. Ayrıca, atmosfere daha az miktarda CO₂, sülfür, kurşun ve diğer ağır hidrokarbonlar gibi tehlikeli ve zararlı kimyasallar üretir.

Bio-CNG İsveç, İtalya, Almanya, İsviçre, Fransa, Avusturya, Hollanda ve İngiltere'de araç yakıtı olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. İsveç, 2015 yılında CNG araçlarında %73 oranında biyometan kullanarak öncü olmuştur (Virendra ve ark., 2015). İsveç, 2030 yılına kadar fosil yakıttan bağımsız karayolu taşımacılığı sistemine ve 2050 yılına kadar tüm ulaşım türlerinde tamamen karbon nötr taşımacılık sistemine ulaşmayı hedeflemektedir (Backman ve Rogulska, 2016). Almanya da 2021 yılına kadar ağırlıklı olarak belediye atıkları kullanılarak üretilen bir araç yakıtı olarak %100 biyo-CNG kullanma vizyonuna sahiptir (Subramanian ve ark., 2013). Amerika, Almanya, Fransa, İsviçre, Avusturya, İsveç ve Hollanda gibi ülkelerin araç yakıtı olarak biyogaz için kendi kalite standartları vardır. Bununla birlikte, araç yakıtı için en önemli biyogaz kalite göstergeleri, sırasıyla $\geq$ %96 ve $\leq$ %2,5 olması gereken CH₄ ve CO₂ konsantrasyonlarıdır (Chandra ve ark., 2011; Lim ve ark., 2015; Ryan ve Caulfield, 2010). Biyo-CNG için bu gereklilikler Pakistan, Hindistan, Malezya ve Endonezya gibi diğer gelişmekte olan ülkeler için de bir kalite standardı olarak alınabilir (Ullah Khan ve ark., 2017).

3. GEREÇ ve YÖNTEM

3.1. Siverek Atık Su Arıtma Tesisi

Şanlıurfa İli, Siverek İlçesi Karakoyun Köyü Mevkii, Hacı Hıdır Baraj yolunda, tapunun 633 parsel numarasında kayıtlı, 30.000 m² yüzölçümlü alan üzerine kurulmuş ve günlük 17 040 m³ kapasiteye sahip olup Siverek ilçesinin 2040 yılına kadar atık su arıtımı ihtiyacına karşılık verebilecek şekilde tasarlanmıştır. Tesis evsel atıksuların arıtılması konusunda faaliyet göstermektedir. Tesis Çevre İzin ve Lisans Yönetmeliği'nin Ek-2 Listesi; "10.3. Nüfusu 100.000 kişinin altında olan kentsel ve/veya evsel nitelikli atık su arıtma tesisleri kapsamında yer almaktadır ve yukarıda belirtilen adreste faaliyet göstermektedir".

Siverek atıksu arıtma tesisi maksimum giriş suyu kirlilik yükleri düşünülerek tasarlanmıştır. Karbon giderme için etkinleştirilmiş bir çamur tesisidir ve stabilize çamur üretilmektedir. İşletimin ilk aşamasının 2040 yılına kadar Siverek'in tahmini atık su arıtma ihtiyaçlarını karşılaması planlanmıştır. (85,661 p.e.). Arıtma tesisi arıtma ihtiyaçlarını 2040 yılına kadar karşılamak üzere genişletilecektir (110436 p.e.). Havalandırma tankları ve son çökeltim tankı Aşama-I (2040) için tasarlanmış ve inşa edilmiştir. Bu birimler Aşama-II (2040) için genişletilebilir. Tesisin diğer bileşenleri gelecekteki genişletme için gereklilikler düşünülerek Aşama-II için inşa edilmiştir.

Deşarj işlemi için Hacı Hıdır Baraj Gölü alıcı ortam olarak belirlenmiştir. Deşarj kriterlerinde, 08.01.2006 tarihli ve 26047 sayılı "Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği"nin belirlediği değerler baz alınmıştır. İlk etapta karbon (C) giderimli bir tesis planlanmıştır. 2040 yılı sonrasında ise, azot ve fosfor (N-P) giderimi de yapılacak şekilde tesis için alan ayrılmıştır.

Tesisin kokusunu kontrol etmek için, koku kaynağı olan ön çamur tankları, çökeltme tankları ve ızgara yapıları kapalı sistem olarak tasarlanmıştır. Oluşan koku, bu kaynaklardan çekilerek biyofiltre adı verilen koku giderim ünitesinde arıtılmaktadır.

Arıtma işlemi sırasında oluşan çamur, çamur hatları ve susuzlaştırma ünitesi ekipmanları aracılığıyla su miktarı azaltılarak, gaz üretiminde kullanılmakta ve susuzlaştırılan çamur bertaraf edilmektedir. Arıtma tesisinin genel performansını ve su kalitesini izlemek amacıyla giriş ve çıkış debi ölçümleri gerçek zamanlı olarak yapılmaktadır. İdari binada bulunan laboratuvarında, atıksu ve çamurun giriş-çıkış analizleri belirlenen ölçüm periyotlarına uygun olarak gerçekleştirilmektedir.

ŞUSKİ Siverek Atık Su Arıtma Tesis'i Siverek ilçesinin batı tarafında inşa edilmiş biyogaz ve elektrik üretimi yapılabilen biyolojik atık su arıtma tesisinin uzaktan görünümü Şekil 3.1.'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Siverek Atık Su Arıtma Tesisi

Tesis, atık suyu üç aşamada arıtmaktadır: mekanik, biyolojik ve çamur arıtımı. Mekanik arıtım aşamasında sırasıyla kaba ızgaralar, ince ızgaralar, kum ve yağ giderme havuzu, ön çökeltim havuzu, ön çökeltim pompa istasyonu ve koku giderim ünitesi yer almaktadır. Biyolojik arıtım aşamasında ise sırasıyla havalandırma havuzu dağıtım yapısı, havalandırma havuzu, blower ünitesi, son çökeltim havuzları dağıtım yapısı, son çökeltim havuzları, geri devir pompa istasyonu, çıkış suyu, servis suyu sistemi, içme suyu ve yangın suyu pompa istasyonu bulunmaktadır. Çamur arıtım aşamasında ise sırasıyla graviteli çamur yoğunlaştırma istasyonu, mekanik yoğunlaştırma, karıştırılmış çamur tankı, anaerobik çürütme, çürütülmüş çamur depolama ünitesi, çamur susuzlaştırma birimi, süzüntü suyu pompa istasyonu, sülfürsüzleştirme ünitesi, biyogaz ünitesi, kojenerasyon (CHP) ünitesi ve dizel jeneratör ünitesi bulunmaktadır. Tesiste biyogaz üretimi yapılan Anaerobik çürütme ünitesi (Digester), üretilen biyogazın depolandığı gaz balonu, çamuru yağunlaştıran makineler, atık su ve çamuru pompalayan pompalar, havalandırma havuzuna ve kum ve yağ tutucu havuzuna hava basan blowerlar, tesisin ihtiyacı olan elektrik ve ısı enerjisi üretimi yapılan kojenerasyon ünitesi bulunmaktadır.

3.2. Siverek Atık Su Arıtma Tesisindeki Üniteler ve Özellikleri

Siverek Atık Su Arıtma Tesisine gelen atık su evsel nitelikli olup kaynağı Siverek ilçesindeki haneler ve yağmur drenaj hatlarından gelen sulardır. Tesise gelen atık sudan elde edilen çamur digesterde bekletilip aynı zamanda hem ısıtılıp hem de karıştırılmaktadır. Yaklaşık 25 gün süreden sonra digesterde bulunan çamur fermente olmakta ve biyogaz oluşmaktadır. Üretilen biyogaz, tesisin kendi elektriğini karşılamak ve proseste ve idari binanın ısıtılmasında kullanılmak üzere kojenerasyon ünitelerinde yakılarak elektrik ve ısı enerjisine dönüştürülmektedir. Digesterde tamamen fermente olan çamur dekantör olarak adlandırılan makinelerde kuru madde oranı yaklaşık %30'lara ulaşınca yoğunlaştırıldıktan sonra tarımsal gübre olarak kullanılmaktadır.

3.2.1. Mekanik Arıtma

3.2.1.1. Kaba Izgaralar

Arıtma tesisine giren atıksu, iki kanala ayrılarak kaba ızgara binasına doğru akmaktadır. Kaba ızgara ünitesine gelen atıksu, 20 mm'den büyük ve tesisin pompalarına zarar verme potansiyeline sahip katı maddeleri yakalayarak atıksudan ayırmak amacıyla kullanılmaktadır. Kaba ızgaralar, PLC kontrollü olarak inşa edilmiştir ve sistem bir bütün olarak çalıştırılmaktadır. Ayrılan kaba malzemeler, konveyör bant sistemiyle toplanarak konteynerlere aktarılmaktadır. Kaba ızgaraların bulunduğu yapı yalıtılmış olup, her kaba ızgaraya hava çekiş bağlantısı eklenmiştir. Atık hava, koku giderim ünitesine yönlendirilmektedir. Ek havalandırma için binaya bir ventilasyon fanı eklenmiştir. Genel olarak kaba ızgara ünitesinin özellikleri aşağıda belirtilmektedir.

Seçilen Kaba Izgara Sayısı	: 1+1 adet
Seçilen Bar Aralığı	: 20mm
Seçilen Kapasite	: 1723 m ³ /sa (Adet)
Maksimum Debi İçin Seçilen Bar	: 1,2 m/sn
Seçilen Bant Konveyör Sayısı	: 1



Şekil 3.2. Kaba ızgara ünitesi

3.2.1.2.İnce Izgaralar

Kaba ızgaradan çıkan atıksu, atıksu dağıtım kanalları aracılığıyla ince ızgaralara yönlendirilir. İnce ızgaralar, atıksudaki 6 mm'den büyük partikülleri ayırmak üzere tasarlanmıştır. İnce ızgara ünitesi, PLC kontrollü olarak inşa edilmiş ve ekipmanlandırılarak bütün bir sistem halinde çalıştırılmaktadır. Yıkama kanalı, ince

taneleri bir yıkama ve presleme ünitesine taşır, yıkanan ve sıkıştırılan taneler ise bir konteynıra boşaltılır. Yıkama işlemi için servis suyu kullanılmaktadır.

Genel olarak ince ızgara ünitesinin özellikleri aşağıda belirtilmiştir:

İşletmedeki Izgaraların Sayısı	: 1+1 adet
Seçilen Izgara Tipi	:Perforeotomatik
Projelendirme Akış Değeri	: 1723 m ³ /sa (adet)
Kanal Genişliği	: 0,6 metre
Izgara Gözenekleri Arasındaki Maksimum	: 1,2 m/s
Perfore Delik Açıklığı	: 6 mm
Pres İşleminden Sonraki Tahmini Atık	: 0,26 m ³ /gün
Auma Oransal Vana	: 2 adet



Şekil 3.3. İnce ızgara ünitesi

3.2.1.3.Kum ve Yağ Giderme Havuzu

İnce ızgaradan geçen atıksu, dağıtım kanalları aracılığıyla havalandırmalı kum ve yağ giderim tanklarına yönlendirilir. Kum ve yağ giderme ünitesi, PLC kontrollü olarak inşa edilmiş ve sistem, bir bütün olarak çalışacak şekilde ekipmanlandırılmıştır.

Tankın toplam hacmi $2 \times 72 \text{ m}^3 = 144 \text{ m}^3$ 'tür. Debinin minimum değeri olan $463 \text{ m}^3/\text{saat}$ için bekleme süresi yaklaşık 18,66 dakikadır.

Kum giderme ünitesi, sonraki mekanik birimlerin zarar görme riskini azaltmak amacıyla kullanılırken, yağ giderme ünitesi ise uçucu organikler ve kötü kokulu kolloidal çamurların neden olduğu istenmeyen özellikleri gidermek için kullanılır.

Kum ve yağ giderme ünitesinin genel özellikleri aşağıda belirtilmiştir:

Kum Giderme Ünitesi Tank	: 2 Adet
Maksimum Atıksu Akışı	: $1482 \text{ m}^3/\text{sa}$
Bir Kum Tutucu Toplam	: 72 m^3
Hava Blowerlerinin Sayısı	: 1+1 Adet
Blower Kapasitesi	: $120 \text{ m}^3 \text{ hava/s}$



Şekil 3. 4. Kum ve yağ tutucu havuzu

3.2.1.4. Ön Çökeltim Havuzu

Atıksu, kum ve yağ giderme tanklarından dağıtım kanalı aracılığıyla iki adet ön çökeltim havuzuna yönlendirilir. Dairesel olarak tasarlanmış olan bu ön çökeltim havuzları, yüzen ve çöken katı maddelerin giderilmesini sağlayarak askıda katı madde (AKM) içeriğinin azaltılmasına yardımcı olur. Ön çökeltim tanklarının amacı, belirli oranda organik katı maddeyi gidermek ve biyolojik ünitelerin organik katı yükünü minimum seviyeye indirmektir.

Bu ünitenin total hacmi 1119 m³'tür. Çökelen çamur, sıyrıcılar aracılığıyla çamur gözlerine taşınır ve buradan çamur pompa istasyonu ile yoğunlaştırıcılara pompalanır. Ön çökeltim tankları, PLC kontrollü yarım köprülerle donatılmış olup, yüzey köpük giderici sistemi köprüye bağlı olarak çalışmaktadır. Ön çökeltim ünitesinin genel özellikleri aşağıda belirtilmiştir.

Ön Çökeltme Ünitesi Tank Sayısı	: 2 Adet
Toplam Ünite Hacmi	: 1119 m ³ (2 Tank)
Bekleme Süresi	: 0,76 sa
Köprü Tipi	: Dönen Yarım



Şekil 3.5 Ön çökeltim havuzu

3.2.1.5. Ön Çamur Pompa İstasyonu

Ön çamur pompa istasyonu sistemi otomatik olarak çalışmaktadır. Her biri 12 m³/sa kapasiteli iki pompa bulunmaktadır ve ön çökeltim biriminden gelen çamur debisini ölçmek için bir debimetre kullanılmaktadır.

Pompa Sayısı	:1+1 Adet
Kapasite	: 2 x 12 m ³ /sa
Kuru Katı Miktarı	: %2,5



Şekil 3.6. Ön çamur pompa istasyonu

3.2.1.6. Koku Giderim Ünitesi

Koku giderim birimi, olası koku sızıntılarının olduğu birimler için tasarlanmıştır ve bu birimler koku kaynakları nedeniyle kapatılmıştır. Ayrıca, bu kapatılan birimlerden gelen kokulu atık hava toplanarak koku giderim ünitesinde arıtılmaktadır. İlk koku ünitesi; ızgara binası ve ön çökeltim ünitelerini içerirken, ikinci koku ünitesi; çürütülmüş çamur depolama tankı, graviteli yoğunlaştırıcı, çamur susuzlaştırma binası ve çamur süzöntü suyu pompa istasyonunu içerir. Bu birimlerin hava kanalları, ızgaraların olduğu binaların hava çekici fanlarına bağlanmıştır. Ayrıca, ızgara ve çamur susuzlaştırma binaları, ek havalandırma fanlarıyla donatılmıştır.

Koku giderim ünitesinin genel özellikleri şunlardır:

Koku Giderim Ünitesi	: 2 Adet
Hava Debisi	: 1000 /1500 m ³ /sa



Şekil 3.7. Koku giderim ünitesi

3.2.2. Biyolojik Arıtma

3.2.2.1. Havalandırma Havuzu Dağıtım Yapısı

Ön çökeltmeden gelen atıksu, cazibe yardımıyla ortak çıkış kanalından dağıtım yapısına aktarılır. Dağıtım yapısının amacı, ön çökeltme biriminden gelen atıksuyu eşit miktarda iki kısma ayırarak havalandırma tanklarına dağıtmaktır. Atıksuyu biyolojik tanklara yönlendirmek için, operasyonel esnekliği kontrol etmek amacıyla motorlu vanalar kullanılmaktadır. Fosfor ve azot arıtma aşaması da bir sonraki aşamada dikkate alınmaktadır.



Şekil 3.8. Havalandırma havuzu dağıtım yapısı

3.2.2.2. Havalandırma Havuzu

Karbonun etkili bir şekilde giderilmesini sağlamak için havalandırma havuzları tasarlanmıştır. İki adet olan havalandırma tankı, aktif çamurun sürekli karıştırılmasını sağlamak için mekanik dalgıç karıştırıcılarla donatılmıştır. Havalandırma sistemi, tabana monte edilmiş ince kabarcık havalandırma difüzörleriyle sağlanmaktadır. Her bir tankta iki adet oksijen ölçüm cihazı bulunmaktadır.

Havalandırma Tankı Sayısı	: 2 Adet
Toplam Havalandırma Ünitesi Hacmi	: 3800 m ³
Çamur Yaşı	: 4 gün
Hidrolik tutma süresi	: 5,35 saat
Sıcaklık	: 15°C-20°C tasarlanmış
Çamur Hacim İndeksi	: 100 ml/g
Günlük Oksijen ihtiyacı	: 4848 kgO ₂ /gün (15 °C), 5304 kgO ₂ /gün (20 °C)
Geri Devir Oranı	: % 75



Şekil 3.9. Havalandırma havuzu

3.2.2.3. Blower İstasyonu

Havalandırma birimi için gereken sıkıştırılmış hava, blower istasyonunda üretilmektedir. Tesis, üç adet blowera sahiptir (2 aktif, 1 yedek). İkinci aşama için bir boş alan ayrılmıştır. Her bir blowerın kapasitesi 2000 Nm³/sa'dır. Blowerların kapasitesi, havalandırma tanklarındaki sağlanması gereken çözünmüş oksijen değeri olan 2 mg/L'yi sağlayacak şekilde belirlenmiştir. Blower istasyon ünitesinin genel özellikleri aşağıda belirtilmiştir:

Blower Sayısı : 2+1
Blower Kapasitesi : 2000 Nm³/sa



Şekil 3.10. Blower istasyonu

3.2.2.4. Son Çökeltim Havuzu Dağıtım Yapısı

Dağıtım yapısı, havalandırma biriminde arıtılmış atıksuyu iki adet son çökeltim tankına dağıtmak için kullanılmaktadır. Herhangi bir arıza durumunda, son çökeltim tanklarından birinin izole edilebilmesi için dağıtım kanalının her çıkışı motorlu kapaklarla desteklenmiştir. Aynı yükseklik ve uzunlukta konumlandırılan savaklar, son çökeltme tanklarına eşit miktarda atıksu akışı sağlamaktadır.



Şekil 3.11. Son çökeltim havuzu dağıtım yapısı

3.2.2.5. Son Çökeltim Havuzu

Bu ünite, biyolojik arıtma işlemi sonrasında elde edilen arıtılmış atıksu ile havalandırma ünitesinden gelen çamurun ayrıştırılmasını sağlar ve atıksuyun belirlenen deşarj kriterlerine uygun olmasını sağlar. Havalandırma ünitesinden gelen atıksu, çekim etkisiyle son çökeltme tanklarına alınır ve tanka dağıtılır. Siverek atıksu arıtma tesisinde iki adet sıyrıcılı dairesel son çökeltme tankı bulunmaktadır. Bu tanklar, PLC kontrollü yarım köprülerle donatılmıştır ve yüzey köpük giderim sistemi, köprüye bağlı olarak çalışır. Son çökeltme ünitesinin genel özellikleri şunlardır:

Çizelge 3.1. Çökeltme ünitesinin özellikleri

Son Çökeltme Ünitesi Parametreleri	Birim
Tank Sayısı	2 adet
Tank Çapı	27,7 m
Atıksu Debisi	1482 m ³ /sa
Bekletme Süresi (max debi)	3,8 sa
Geri Devir Oranı	%75

Dağıtım merkezinde toplanan çamurun yaklaşık %70'i, prosesin durumuna bağlı olarak havalandırma havuzuna geri verilirken geri kalan kısmı çamur binasına yönlendirilir. Çamur binasına gönderilen son çökeltim çamurlarının katı madde oranı yaklaşık olarak %3 seviyelerindeyken, mekanik yoğunlaştırma makineleri aracılığıyla ön çökeltim havuzlarından elde edilen çamurun yoğunluğu %6'lara çıkarılır. Bu işlem, digesterda daha homojen bir karışım elde edilerek daha verimli biyogaz üretimini sağlamak içindir.



Şekil 3.12. Son çökeltim havuzu

3.2.2.6. Geri Devir Pompa İstasyonu

Son çökeltme biriminde çökelen çamur, geri devir pompa istasyonundan havalandırma tankına aktarılır. Her bir son çökeltim tankı, otomatik olarak kontrol edilebilen teleskopik vanayla donatılmıştır. Bu teleskopik vanalar, son çökeltim tankının dibinde bulunan çamur akışını ayarlamak için sabit bir dikey boru içinde yukarı-aşağı hareket eden bir borudan oluşur. Geri devir, 2+1 pervaneli geriye dönebilen çamur pompasıyla sağlanır. Bu, pompalama istasyonunda bulunan seviye transmidi yardımıyla kontrol edilir. İkinci aşamada, ek bir pompa daha sağlanmıştır. Fazla çamur pompaları, çamuru mekanik yoğunlaştırma ekipmanına pompalar. Bu pompalar, operatör tarafından manuel olarak ayrı ayrı çalıştırılabilir.

Geri Devir Pompa Sayısı	: 2+1 Adet, 750 m ³ /sa
Fazla Çamur Pompa Sayısı	: 1+1 Adet, 36 m ³ /sa
Auma Oransal Teleskopik Vana	: 2 Adet



Şekil 3.13. Geri devir pompa istasyonu

3.2.2.7. Çıkış Suyu

Son çökeltme tankından toplanan arıtılmış atıksu, cazibeli çıkış debi ölçüm kanalından geçerek klor temas tankına taşınır. Klorlama tankından çıkan su, Hacı Hıdır Baraj Gölü'ne boşaltılır.



Şekil 3.14. Çıkış suyu

3.2.2.8. Servis Suyu Sistemi

Son çökeltme biriminden çıkan ve dezenfekte edilen suyun bir kısmı, servis suyu olarak kullanılmaktadır. Servis suyu pompaları, arıtılmış suyun ızgara preslerinin temizlenmesinde, boruların temizlenmesinde, polimer seyreltilme işleminde, mekanik yoğunlaştırma ve çamur susuzlaştırma işlemlerinde ve iç-dış mekanların temizliğinde kullanılmaktadır. Bu sistemde üç adet pompa bulunmaktadır. Genel özellikleri aşağıda belirtilmiştir:

Pompa Sayısı :2+1 Adet
Kapasite :30 m³/sa



Şekil 3.15. Servis suyu istasyonu

3.2.2.9. İçme Suyu ve Yangın Suyu Pompa İstasyonu

Tesis içinde temiz su olarak kullanılmak üzere 170 m³ hacimli bir depo bulunmaktadır. Bu depo, içme suyu pompaları ve yangın suyu pompalarının yerleştirildiği bir alan içermektedir.

İçme Suyu Pompa Sayısı	:1+1 Adet
Kapasite	:5 m ³ /sa (hidrofor)
Yangın Suyu Pompa Sayısı	: 3 (1+1+ jockey)
Kapasite	: (1+1) 114 m ³ /sa – (jockey) 3 m ³ /sa)



Şekil 3.16. İçme suyu ve yangın suyu pompa istasyonu

3.2.3. Çamur Arıtma

3.2.3.1. Graviteli Çamur yoğunlaştırma

Ön çökeltim çamuru, ikinci aşamadaki çamur kapasitesini yönetmek için yeterli hacme sahip yerçekimsel yoğunlaştırıcıya pompalanır. Bu yoğunlaştırıcı, dairesel bir tank içinde sabit beton bir köprüye sahiptir ve dönen mekanik bir çamur karıştırma ekipmanına sahiptir. Çamur, tankın merkezinden köprüünün alt merkezine kadar devam eden ve pompalanan birincil çamuru taşıyan bir boru yoluyla aktarılır. Yoğunlaşan çamur, tankın dibindeki bir bölümden pompalar yardımıyla mix çamur tankına aktarılır. Savaklanan üst faz suyu ise süzüntü suyu pompa istasyonuna cazibeyle yönlendirilir. Herhangi bir koku rahatsızlığını önlemek için tank örtülüdür ve koku giderim ünitesine bağlanmıştır.

Tank Çapı	: 7 m
Tank Hacmi	: 180 m ³
Ön Çamur Debisi	: 114 m ³ /g
Ön Çamur Katı Madde Muhtevası	: %2,5
Yoğunlaşmış Çamur Debisi	: 47 m ³ /g
Yoğunlaşmış Katı Madde Muhtevası	: %6
Yoğunlaşmış Ön Çamur Pompaları	: (1+1) Adet
Kapasite	: 6 m ³ /sa



Şekil 3.17. Graviteli çamur yoğunlaştırma

3.2.3.2. Mekanik Yoğunlaştırma Ünitesi

Fazla çamur pompalarıyla gelen çamur, iki adet mekanik yoğunlaştırıcı makine (tamburalı yoğunlaştırıcılar) yardımıyla işlenir. Bu makineler aynı anda çalışmaz; biri çalışırken diğeri bekleme modundadır. Çamurun işlenmesi için polimer kullanılır. Yoğunlaşan çamur, yerçekimi etkisiyle mix çamur tankına akar. Ayrıca, üst faz suyu yerçekimiyle süzüntü suyu pompa istasyonuna yönlendirilir.

Fazla Çamur Debisi	: 405 m ³ /g
Fazla Çamur Katı Madde Muhtevası	: %0,95
Yoğunlaşmış Çamur Debisi	: 64 m ³ /g
Yoğunlaşmış Katı Madde Muhtevası	: %6
Mekanik Yoğunlaştırıcı	: (1+1) Adet
Kapasite	: 44 m ³ /sa
Polimer Dozlama Ünitesi	: 1 Adet
Kapasite	: 1000 l/s
Polimer Dozlama Pompası	: 2(1+1)
Kapasite	: 160 l/s



Şekil 3.18. Mekanik yoğunlaştırma ünitesi

3.2.3.3. Mix Çamur Tankı

Mekanik olarak yoğunlaştırılmış fazla çamur, yerçekimi etkisiyle mix çamur tankına aktarılırken, graviteli yoğunlaştırıcıda yoğunlaştırılmış olan ön çamur, yoğunlaşmış çamur pompaları aracılığıyla pompalanır. Hem birincil yoğunlaştırılmış çamur hem de mekanik olarak yoğunlaştırılmış çamur, mix çamur tankında karıştırılır. Yoğunlaştırılmış ve karıştırılmış çamur, çürütücü besleme pompaları aracılığıyla anaerobik çürütücülere taşınırken, çürütücü besleme pompalarının önünde

parçalayıcılar bulunmaktadır. Mix çamur tankı, ikinci aşamanın kapasitesi göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır. Tankın üzeri kapatılmış ve koku giderim ünitesi sistemine bağlanmıştır.

Tank Hacmi	: 47 m ³
Çürütücü Besleme Pompaları	: 3 (2+1)
Kapasite	: 6 m ³ /gün
Parçalayıcı	: 3 (2+1)
Kapasite	: 6 m ³ /gün
Auma Oransal Vana	: 2 adet



Şekil 3.19. Mix çamur tankı

3.2.3.4. Anaerobik Çürütme Ünitesi (Digester)

Anaerobik çürütme işlemi, iki ayrı tankta mezofilik sıcaklık aralığında ve anaerobik ortam koşullarında gerçekleştirilir. Çürütme tankları içinde organik maddeler, anaerobik bakteri kültürünün yardımıyla parçalanarak biyogaz oluşumu sağlanır. Ön yoğunlaştırma ve mekanik yoğunlaştırma ünitelerinden gelen çamurun katı madde içeriği %4,0 ila %6,0 arasında değişir ve bu çamur, her bir çürütücünün eşanjörüne giden boru hatlarına pompalar yardımıyla aktarılır. Çamur, eşanjörlerin

hemen önünde sirküle edilen çamur ile karıştırılarak üstten anaerobik çürütücülere iletilir. Çürütme tankları, 35-37 °C mezofilik sıcaklık aralığında ve 20 ila 30 gün arasındaki bekleme sürelerine göre tasarlanmıştır. Sıcaklık, eşanjörlerin çıkışındaki sirkülasyon pompalarının basınç hattındaki ısı ölçerlerle kontrol edilir. Çürütme tanklarında sürekli (24 saat) karıştırma işlemi yapmak için merkezi bir karıştırıcı kullanılır, bu da sirkülasyonu ve homojen dağılımı sağlar.

Çamur sirkülasyon pompaları, sürekli çalışır ve çamurun sürekli dolaşımını sağlayarak ısıtma işlevini yerine getirir. Yedek pompalar, iki çürütücüye de hizmet verecek şekilde tasarlanmıştır ve gerektiğinde manuel olarak seçilebilirler.

Ünite Sayısı	: 2Adet
Toplam Ünite Hacmi	: 2810 m ³ (1405x2)
Bekletme Süresi	: 20-30 gün
Çürütücü Besleme Sıcaklığı	: 35-37 °C
Sıcak Su Pompa Sayısı	: 3 Adet
Sirkülasyon Pompa Sayısı	: 3(2+1) Adet
Kapasite	: 15 m ³ /sa
Çürütücü Karıştırıcı Sayısı	: 2 Adet
Pnömatik Vana	:2 Adet



Şekil 3.20. Digester

Digester ünitesinde, besleme sırasında seviyeye bağlı olarak çalışan teleskopik vanalar, eski çamurun alınmasını sağlar. Ayrıca, gaz basıncı belirlenen maksimum seviyeyi aştığında gaz emniyet valfi devreye girerek digesterdeki gazı tahliye eder. Gaz tutucu tertibatı ise olası bir yanma durumunda hattaki alevin yayılmasını önleyerek güvenliği sağlar. Bunun yanı sıra, digesterdeki seviyeyi ölçmek için ultrasonik seviye sensörü kullanılır.

3.2.3.5. Çürütülmüş Çamur Depolama Ünitesi

Çürütülmüş çamur depolama birimi, iki anaerobik çürütücüden gelen çamuru alır. Çamur depolama tanklarına çekici güçle akar ve tank içinde çamurun çökmesini önlemek için mikserle karıştırılır. Ardından, çamur susuzlaştırma dekantörlerine iki pompa yardımıyla aktarılır.

Ünite Sayısı	: 1Adet
Ünite Hacmi	: 144 m ³
Bekletme Süresi	: 1,3 gün



Şekil 3.21. Çürütülmüş çamur depolama tankı

3.2.3.6.Çamur Susuzlaştırma Ünitesi

Anaerobik ortamda stabilize olan çamur, çürütülmüş çamur depolama biriminden borular aracılığıyla santrifüj besleme pompalarına taşınır. Buradan, çamur sentrat suyu süzüntü suyu pompa istasyonuna doğal cazibe ile aktarılırken, susuzlaştırılmış çamur konveyörler yardımıyla dışarı atılır. Santrifüjler, tamamen paket sistemler olup iki hat olarak tasarlanmıştır. Besleme pompaları, boru sistemleri aracılığıyla çamuru depo tankından çeker. Çamur depolama birimindeki seviye, susuzlaştırma ekipmanlarının günlük çalışma süreleriyle ayarlanır. Pompa basınç hattında bulunan debi ölçer, polimer hazırlama ve depolama sistemiyle bağlantılıdır. Her bir pompa, bir santrifüjü besler. Çamur susuzlaştırma biriminin bazı özellikleri aşağıda belirtilmiştir:

Çamur Susuzlaştırma Ünite Sayısı	: 2 adet, Alfa Laval Marka
Çamur Susuzlaştırma Ünite Kapasitesi	: 12 m ³ /sa
Susuzlaştırılmış Çamur Katı Madde Yüzdesi	: % 25 KM
Dekantör Besleme Pompaları	: 2(1+1)
Kapasite	: 12 m ³ /sa
Polimer Hazırlama Ünitesi	: 2(1+1)
Kapasite	: 2000 l/s
Polimer Dozaj Pompa Sayısı	: 1+1 Adet
Kapasitesi	: 477 l/s



Şekil 3.22. Çamur susuzlaştırma ünitesi

3.2.3.7. Süzüntü Suyu Pompa İstasyonu

Mekanik yoğunlaştırıcı, graviteli yoğunlaştırıcı ve dekantörden gelen süzüntü suları, süzüntü suyu pompa istasyonunda bir araya getirilir. Bu istasyonda süzüntü suyu için dalgıç pompa kullanılır ve toplamda iki adet pompa bulunur. Her bir pompanın kapasitesi 60 m³/sa'dir.



Şekil 3.23. Süzüntü suyu pompa istasyonu

3.2.3.8. Biyogaz Ünitesi

Anaerobik çürütücülerde üretilen ve toplanan biyogaz, desülfürizasyon ünitesinden veya biriminden geçerek biyogaz depolama birimine yönlendirilir. Bu birimlerin önünde, biyogaz kondensasyonu gerçekleşir.

Hidrojen sülfür (H_2S) içeriğini azaltmak için desülfürizasyon birimi kullanılır. Siverek Atıksu Arıtma Tesisi'nin ikinci aşaması, günlük ortalama gaz üretimine göre öngörülerek tasarlanmıştır.

Biyogaz depolama birimi, düşük basınçlı membran sistemlerinden oluşur ve betonla kaplanmıştır. Membran tabakaları arasında basınçlı hava bulunur ve gaz

basıncını sabit tutmak için iki kompresör yerleştirilmiştir. Biyogaz depolama ünitesinin belirli özellikleri şunlardır:

Biyogaz Depolama Ünitesi Hacmi	: 1500 m ³
Desülfürizasyon Ünite Kapasitesi	: 110 m ³ /sa



Şekil 3.24. Biyogaz ünitesi

3.3.2.3.9. Desülfürizasyon Ünitesi

Hidrojen sülfürün (H₂S) giderimi için kullanılan ünitenin çalışma prensibi, su ile birlikte biyolojik akışkan yataklı bir ortamda H₂S'i çözünmüş fazda tutmak ve ardından Thibacillus ve Sulfolobus bakterileri tarafından oksitlenerek arıtılmasını sağlamaktır. Bu süreç, sülfürsüzleştirme tesisi tarafından gerçekleştirilir ve gazın motorlarda kullanılabilmesi için H₂S miktarının 500 ppm'nin altında olması gerekmektedir. Biyolojik sızma yataklı reaktör, mikroorganizmaların çoğalması için PP malzemesiyle

doludur ve gazın H_2S içeriği bu reaktör tarafından emilir, sıvı fazda çözünür ve ardından mikroorganizmalar tarafından sindirilir. Bu tesisin çalışması sırasında, biyolojik çözeltinin pH seviyesinin stabilize edilmesi için temiz su veya suni gübre eklenir. Oksijen, biyogaz akışına hava eklenerek sağlanır ve bu oksijen miktarı, biyogaz akış hızı ile H_2S konsantrasyonuna ve mikroorganizma popülasyonuna bağlı olarak ayarlanır. Desülfürizasyon biriminin teknik özelliklerinden bazıları aşağıda verilmiştir:

Kapasitesi	: 110 m ³ /sa
Tank Hacmi	: 27,5 m ³
Gübre İçin Stok Tankı	: 200 Litre
Giriş H_2S Konstantrasyonu	: 5000 ppm
Çıkış H_2S Konsantrasyonu	: <500 ppm
İşletme Şartları Minimum pH	: 1,5 – 2,0
İşletme Sıcaklığı	: 30-31°C



Şekil 3.25. Desülfürizasyon ünitesi

3.2.3.10. Kojenerasyon (CHP) Ünitesi

Siverek Atıksu Arıtma Tesisi'nin ısıtması, kombine ısı ve elektrik üretimi (CHP) binasındaki CHP ünitesinde üretilen ısıyla sağlanmaktadır. Bu CHP birimleri biyogazla çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca, CHP ünitesinin bakımı sırasında ısı üretimi için iki ısıtıcı da biyogazı kullanabilir. Bu ısıtıcılar, alternatif olarak dizel yakıtla da çalışabilir.

Gaz Motoru	: Guascor-Alternatif Power (2 Adet)
Kapasitesi	: 261 kWe
Biyogaz Kazanları	: Viessmann 2(1+1) Adet
Kapasite	400 KW



Şekil 3.26. Kojenerasyon (CHP) ünitesi

3.2.3.11. Dizel Jeneratör Ünitesi

Siverek Atıksu Arıtma Tesisi'nde bir adet ALİMAR marka 350 kVA dizel jeneratör bulunmaktadır. Bu jeneratör, tesisin elektrik kesintisi durumunda kesintisiz çalışmasını sağlamak için sürekli olarak hazır ve çalışır durumda tutulmaktadır.



Şekil 3.27. Dizel jeneratör ünitesi

3.3. Siverek Atık Su Arıtma Tesisi Biyogaz Üretimi

Siverek atık su arıtma tesisine biyogaz üretimi 2 adet digester ünitesindeki çamurun kojenerasyon sisteminden veya boyler kazanlarından elde edilen ısı enerjisiyle boru tipi eşanjörler vasıtasıyla ısıtılarak ve digesterlerin üzerinde bulunan karıştırıcılarla karıştırılarak yapılmaktadır. Sürekli ısıtılan ve karıştırılan çamur yaklaşık 20 gün olan fermente süresi geçmesinin ardından gaz oluşumu başlamaktadır. Kojenerasyon sisteminden elde edilen ısı enerjisi motorun soğutma suyundaki ısının

plaka tipi eşanjörler vasıtasıyla ve egzost atık ısısının egzost boyleri vasıtasıyla iletilmesiyle sağlanmaktadır.

3.4. Çalışma İçin Kurulan Water Scrubber Sistemi

Biyogazın saflaştırılmasında ilk adım olan H_2S giderim prosesi ŞUSKİ Genel Müdürlüğü tesislerinde mevcuttur. Desülfürizasyon ünitesi kurulu olduğu için biyogazın saflaştırılmasındaki ilk adım atlanmış olup direkt olarak CO_2 giderimine yönelik sistem kurulmuştur.

Çalışmada gerekli olan gaz ve su analizleri ŞUSKİ Genel Müdürlüğü tesislerinin laboratuvarlarında yapılmıştır. Bu nedenle analiz ve cihaz alımı gibi ek maliyetlere ihtiyaç duyulmamıştır. Ayrıca tesislerde şimdiye kadar yapılmış gaz ölçüm sonuçları proje kapsamında kullanılmıştır.

Daha sonra sürekli olarak gaz saflaştırma işlemi uygulanmış ve süre ile verim arasındaki bağlantı ortaya çıkarılmıştır. Proje kapsamında iki yöntem ile farklı basınçlar altında sistemin çalışma verileri kaydedilmiş ve optimum şartlar belirlenmiştir.

Tezin gerçekleşmesinde gerekli olan Biyogaz ve su ile ilgili analizler için ŞUSKİ Genel Müdürlüğü'nün laboratuvarları ve ekipmanları kullanılmıştır.

Ölçümlerde kullanılan analiz standartları ve yöntemleri şu şekildedir.

KOİ: Açık reflaks – Titrimetrik Metot, TS-2789

Alkalinite: Titrimetrik Metot, SM-2320

pH Tayini: Elektromanyetik Yöntem, TS-EN-ISO-10523

Gaz Ölçümleri: Drager-7000 katalitik pellistör algılama, Volumetrik Metot

Artılmış atıksu için yapılan KOİ, Alkalinite ve pH ölçüm cihazlarının kalibrasyonu, ŞUSKİ Genel Müdürlüğü tarafından yılda bir akredite olan yetkili servislere yaptırılmaktadır. Ayrıca gaz analizleri için kullanılan Drager-7000 portatif gaz ölçüm cihazı bu proje kapsamında yeni olarak alınmış tez çalışması süresini kapsayan süre içerisinde kalibrasyonu yetkili servise gönderilerek şahit gazlar ile yaptırılmıştır. Ayrıca tez çalışması esnasında Mersin Su ve Kanalizasyon İdaresinden aynı cihaz getirtilmiş ve karşılaştırma testleri yapılmıştır. Karşılaştırma test sonuçları %1'den daha düşük bir hata payı ile aynı sonuçları vermiştir. Kalibrasyon sertifikaları aşağıda verilmiştir.

KALİBRASYON SERTİFİKASI 

Müşteri	MESEC	Sonraki Servis Tarihi	18.12.2019
Sipariş No		Sertifika Tarihi	18.06.2019 16:37:16
Dräger Sipariş No:			
(Kalibrasyon sertifikası No)	180588		

Cihaz	X-am 7000	Cihaz Part No	8317400	Software version	2.10W
Seri Numarası	ARKB0259				
Konfigürasyon	Datalogger - Mevcut				

	IR-Sensor Kanal No 1	IR-Sensor Kanal No 2	EC-Sensor Kanal No 3	EC-Sensor Kanal No 4	EC-Sensor Aktif Değil
Gaz Türü	CH4	CO2	CO	H2S	
Part No	6810460	6810599	6809105	6809180	
Seri Numarası	ARKD0027	ARKA0041	ARKA0045	ARKA0005	
Ölçüm Aralığı	100,00 Vol%	100,00 Vol%	500,00 ppm	1000,00 ppm	
Son Kal. Tarihi	18.06.2019	18.06.2019	18.06.2019	18.06.2019	
Kalibrasyon Gazı	CH4	CO2	CO	H2S	
Kal. Gaz Konsantrasyonu	50,00 Vol%	50,00 Vol%	50,00 ppm	15,00 ppm	
Alarm 1 seviyesi (A1)	0,88 Vol%	1,00 Vol%	30,00 ppm	10,00 ppm	
Alarm 2 seviyesi (A2)	1,76 Vol%	3,00 Vol%	60,00 ppm	20,00 ppm	
Hijyen modu	Not Active	Not Active	Not Active	Not Active	
Ortalama zaman aralığı	15 dk	15 dk	15 dk	15 dk	
STEL	0,00 Vol%	2,00 Vol%	60,00 ppm	10,00 ppm	
TWA	0,00 Vol%	0,50 Vol%	30,00 ppm	10,00 ppm	
Vardiya süresi	480 dk	480 dk	480 dk	480 dk	

Sıfır Kalibrasyon Sonuçları (Tarih / Saat) (18.06.2019 15:31:32)

Gaz Silindiri	Nitrogen	Nitrogen	Nitrogen	Nitrogen	-
Kalibrasyon Gazı Seri No	1060	1060	1060	1060	-
Hedef Değer	0,00 Vol%	0,00 Vol%	0,00 ppm	0,00 ppm	-
Ölçüm (önce)	0,00 Vol%	0,00 Vol%	0,00 ppm	0,00 ppm	-
Ölçüm (sonra)	0,00 Vol%	0,00 Vol%	0,00 ppm	0,00 ppm	-
Sonuç	OK	OK	OK	OK	-

Span Kalibrasyon Sonuçları (Tarih / Saat) (18.06.2019 16:35:37)

Gaz Silindiri	CH4	CO2	CO	H2S	-
Kalibrasyon Gazı Seri No	1334	1540	1647	1647	-
Hedef Değer	50,00 Vol%	50,00 Vol%	50,00 ppm	15,00 ppm	-
Ölçüm (önce)	48,00 Vol%	49,00 Vol%	50,00 ppm	18,00 ppm	-
Ölçüm (sonra)	50,00 Vol%	50,00 Vol%	50,00 ppm	15,00 ppm	-
Sonuç	OK	OK	OK	OK	-

Yukarıda belirtilen DRÄGER Safety AG & Co. KGaA ürünü cihaz, aşağıda açıklanan koşullar çerçevesinde teknik servisimiz tarafından kalibre edilmiştir. Sensörler izlenebilir kalibrasyon gazları ile kalibre edilmiştir. Kalibrasyonda üretici firma tarafından sağlanan yönergeler ve / veya uygun cihazlarda servis bilgisayar yazılımları kullanılmıştır. Kalibrasyonun geçerliliği cihazın kitabında ve sensör teknik veri formlarında belirtilen kullanım, bakım ve saklama koşulları ile sınırlıdır.

Dräger Safety AG & Co. KGaA
Service Technician
Signature


DRÄGER SÜPER-ÖLÇÜM TEKNOLOJİLERİ
Kontrol ve Kalibrasyon Hizmetleri
Tic. Sic. No: 274900 / Şişli / İstanbul
Tic. Sic. No: 274900 / Şişli / İstanbul
Tic. Sic. No: 274900 / Şişli / İstanbul

Dräger Safety Koruma Tekn. A.Ş. Konrad Adenauer Cd. No:54/A-B Yıldız-Çankaya / ANKARA Telefon +90 312 491 06 66 Telefax +90 312 450 13 14 İnternet http://www.draeger.com	Teknik Servis Erciyes İyileşim Sitesi 201. Caddesi No: 60 Macunköy Yenimahalle - ANKARA Telefon +90 312 394 64 79 Telefax +90 312 394 24 39	İstanbul Ofis Tezcan Cad. No: 47 Mürred Sanayi Sitesi Yukarı Dudulu, Ümraniye - İSTANBUL Telefon +90 216 313 26 64 (3 Hat) Telefax +90 216 313 26 67
---	---	--

KALİBRASYON SERTİFİKASI **Dräger**

Müşteri	ADANA ÇEVRE MERKEZİ	Sonraki Servis Tarihi	28.03.2020
Sipariş No Dräger Sipariş No: (Kalibrasyon sertifikası No)	186958	Sertifika Tarihi	27.09.2019 16:10:39
Cihaz Seri Numarası Konfigürasyon	X-am 7000 ARKB0259 Datalogger : Mevcut	Cihaz Part No	8317400
		Software version	2.10W

	IR-Sensor Kanal No 1	IR-Sensor Kanal No 2	EC-Sensor Kanal No 3	EC-Sensor Kanal No 4	EC-Sensor Aktif Değil
Gaz Türü	CH4	CO2	CO	H2S	
Part No	6810460	6810599	6809105	6809180	
Seri Numarası	ARKD0027	ARKA0041	ARKA0045	ARKA0005	
Ölçüm Aralığı	100,00 Vol%	100,00 Vol%	500,00 ppm	1000,00 ppm	
Son Kal. Tarihi	27.09.2019	27.09.2019	27.09.2019	27.09.2019	
Kalibrasyon Gazı	CH4	CO2	CO	H2S	
Kal. Gaz Konsantrasyonu	50,00 Vol%	50,00 Vol%	50,00 ppm	15,00 ppm	
Alarm 1 seviyesi (A1)	0,88 Vol%	1,00 Vol%	30,00 ppm	10,00 ppm	
Alarm 2 seviyesi (A2)	1,76 Vol%	3,00 Vol%	60,00 ppm	20,00 ppm	
Hijyen modu	Not Active	Not Active	Not Active	Not Active	
Ortalama zaman aralığı	15 dk	15 dk	15 dk	15 dk	
STEL	0,00 Vol%	2,00 Vol%	60,00 ppm	10,00 ppm	
TWA	0,00 Vol%	0,50 Vol%	30,00 ppm	10,00 ppm	
Vardiye süresi	480 dk	480 dk	480 dk	480 dk	

Sıfır Kalibrasyon Sonuçları (Tarih / Saat) (27.09.2019 16:03:47)

Gaz Silindiri	Nitrogen	Nitrogen	Nitrogen	Nitrogen	-
Kalibrasyon Gazı Seri No	1060	1060	1060	1060	-
Hedef Değer	0,00 Vol%	0,00 Vol%	0,00 ppm	0,00 ppm	-
Ölçüm (önce)	0,00 Vol%	0,00 Vol%	7,00 ppm	-2,00 ppm	-
Ölçüm (sonra)	0,00 Vol%	0,00 Vol%	0,00 ppm	0,00 ppm	-
Sonuç	OK	OK	OK	OK	-

Span Kalibrasyon Sonuçları (Tarih / Saat) (27.09.2019 16:10:09)

Gaz Silindiri	CH4	CO2	CO-H2S	CO-H2S	-
Kalibrasyon Gazı Seri No	1334	1539	1697	1697	-
Hedef Değer	50,00 Vol%	50,00 Vol%	50,00 ppm	15,00 ppm	-
Ölçüm (önce)	55,00 Vol%	49,00 Vol%	49,00 ppm	14,00 ppm	-
Ölçüm (sonra)	50,00 Vol%	50,00 Vol%	50,00 ppm	15,00 ppm	-
Sonuç	OK	OK	OK	OK	-

Yukarıda belirtilen DRÄGER Safety AG & Co. KGaA ürünü cihaz, aşağıda açıklanan koşullar çerçevesinde teknik servisimiz tarafından kalibre edilmiştir. Sensörler izlenebilir kalibrasyon gazları ile kalibre edilmiştir. Kalibrasyonda üretici firma tarafından sağlanan yönergeler ve / veya uygun cihazlarda servis bilgisayar yazılımları kullanılmıştır. Kalibrasyonun geçerliliği cihazın kitabında ve sensör teknik veri formlarında belirtilen kullanım, bakım ve saklama koşulları ile sınırlıdır.

Dräger Safety AG & Co. KGaA
Service Technician
Signature

Dräger Safety Koruma Tekn. A.Ş.
Konrad Adenauer Cd. No:54/A-B
Yıldız-Çankaya / ANKARA
Telefon +90 312 491 06 66
Telefax +90 312 490 13 14
Internet http://www.draeger.com

Teknik Servis
Erciyes İylerleri Sitesi
201. Cadde No: 60
Macunköy Yenimahalle - ANKARA
Telefon +90 312 394 64 79
Telefax +90 312 394 24 39

İstanbul Ofis
Tezcan Cad. No: 47
Mürdet Sanayi Sitesi
Yukarı Dudulu, Ümraniye - İSTANBUL
Telefon +90 216 313 26 64 (3 Hat)
Telefax +90 216 313 26 67

Şekil 3.288. Gaz ölçüm cihazı kalibrasyon sertifikaları

Çizelge 3.2. Analiz Planı

GAZ ANALİZLERİ		SU ANALİZLERİ		
Numune Alma Noktası				
Numune Basıncı	Absorpsiyon Kulesi Çıkışı	Absorpsiyon Kulesi İçi		
Atmosfer Basıncı	CO ₂ , H ₂ S ve CO ₄ / Beş Tekrar	10 Bar Basıncı Altında	pH, Alkalinite ve KOİ / Beş Tekrar	10 Lt Biyogaz Akışı Sonrası
3 Bar	CO ₂ , H ₂ S ve CO ₄ / Beş Tekrar		pH, Alkalinite ve KOİ / Beş Tekrar	1.000 Lt Biyogaz Akışı Sonrası
10 Bar	CO ₂ , H ₂ S ve CO ₄ / Beş Tekrar		pH, Alkalinite ve KOİ / Beş Tekrar	2.500 Lt Biyogaz Akışı Sonrası
13 Bar	CO ₂ , H ₂ S ve CO ₄ / Beş Tekrar		pH, Alkalinite ve KOİ / Beş Tekrar	4.000 Lt Biyogaz Akışı Sonrası

Çalışma esnasında gaz ile ilgili CO₂, H₂S ve CO₄ parametreleri yukarıdaki metotlar kullanılarak sırasıyla 0, 3, 10 ve 13 bar basınç altında yapılmıştır. En ideal saflaştırma basıncı 10 Bar olarak tespit edilmiş ve ikinci aşamada; suda pH, Alkalinite ve KOİ parametreleri analizleri yapılmıştır. Üç parametre için en ideal çalışma süresi olan 4 saatten sonra tank içerisindeki su doygunluğa ulaşmış olup, daha sonraları gözardı edilecek kadar az değişimler olduğundan toplam işletme süresi 6.5 saat olarak belirlenmiştir.

Tezin gerçekleşmesi aşamasında biyogazın saflaştırılması için 5 -20 bar basınçta çalışabilen Kimyasal Gaz Yıkama/Absorpsiyon Kolonu (Scrubber), hassas gaz debimetresi, bağlantı boruları kullanılmıştır.



Şekil 3.29. Tez çalışmaları için kurulan water scrubber

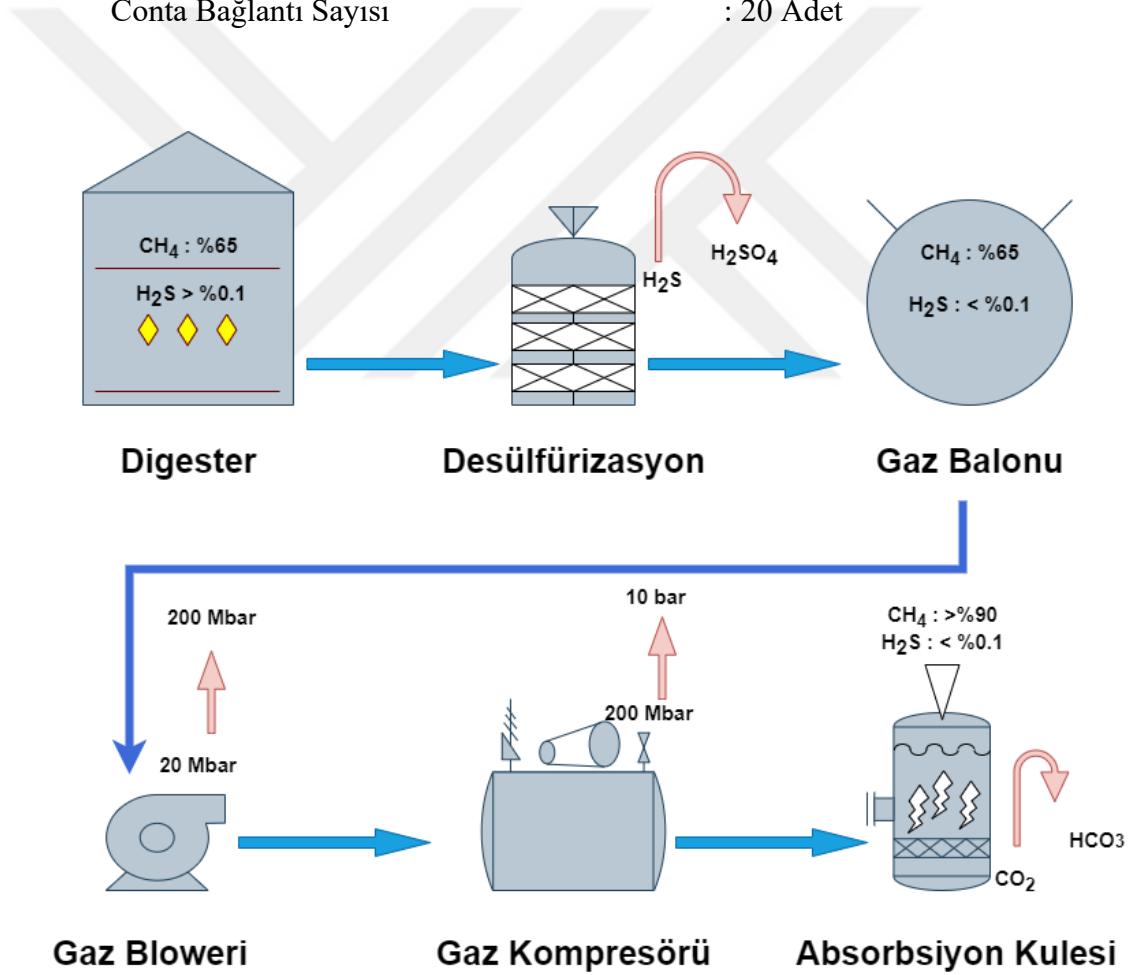


Şekil 3.30. Çalışmada kullanılan absorpsiyon kulesi

Hazırlanan absorpsiyon kulesi iki ayrı parçadan oluşturulmuştur. Bu parçalar çelik flanş ve kauçuk conta kullanılarak birleştirilmiştir. Ayrıca tankın içerisi korozyona maruz kalmaması için epoksi boya ile 4 kat boyanmıştır. Su girişi için tankın alt tarafına, çıkışı için de üst tarafına 20 mm iç çapına sahip giriş-çıkış hattı ve vanası takılmıştır. Su numuneleri için bu vanalar kullanılmaktadır. Yine aynı hatların

yanına biyogaz giriş ve çıkışı için 20 mm iç çapa sahip hat ve vana takılmıştır. Tankın genel özellikleri şunlardır:

Tankın Total Hacmi	: 350 lt
Tankın Sıvı Kullanım Hacmi	: 300 lt
Materyal	: Paslanmaz Çelik/Krom
Tankın Boş Ağırlığı	: 120 kg
Gaz Hacmi	: 50 lt
Basınç Dayanım Kapasitesi	: 20 bar
Giriş-Çıkış Hat Sayısı	: 4 Adet
Tahliye Hattı	: 1 Adet
Conta Bağlantı Sayısı	: 20 Adet

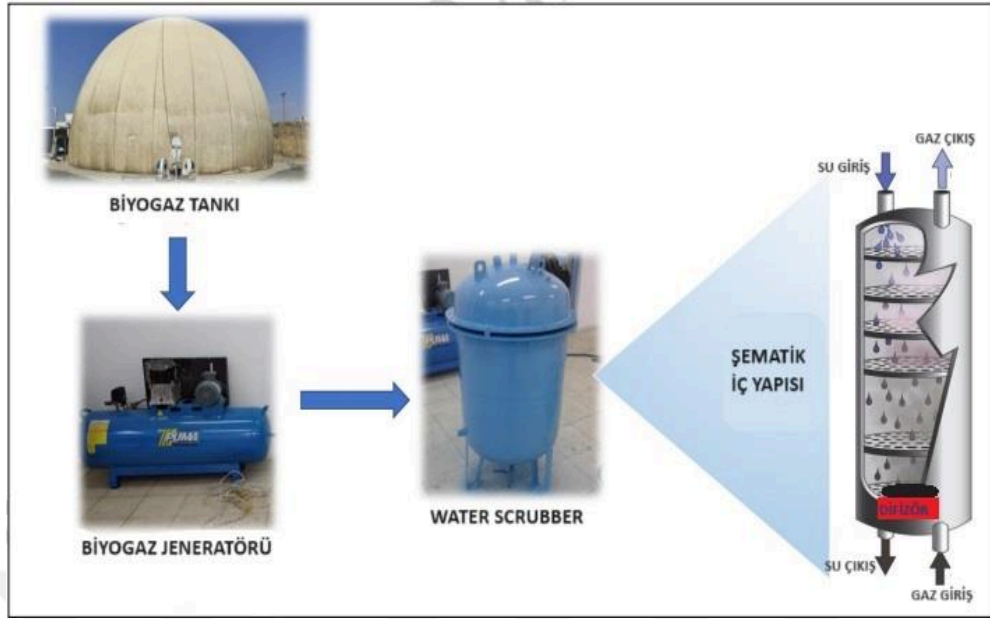


Şekil 3.31. Biyogaz saflaştırma genel akış şeması



Şekil 3.32. Debimetrelili vana ile biyogaz debi ayarlaması

Çalışma esnasında basınç ölçümünü tespit edebilmek için tankın üst tarafına bir adet manometre takılmıştır. Ayrıca biyogaz debisinin hassas ölçümünü sağlayabilmek adına gaz klor dozaj sistemlerinde kullanılan bilye şeklinde işaretleyiciye sahip gaz debimetresi kullanılmıştır. Gaz ölçümleri bu vana çıkışından yapılmaktadır. Sistem birinci aşamada ideal saflaştırma basıncının tespiti için sırasıyla 0,3,10 ve 13 bar basınç altında çalıştırılmış, ikinci aşamada ideal saflaştırma basıncı olan 10 bar basınç altında; sırasıyla 10, 1000, 2500 ve 4000 litre biyogaz saflaştırıldıktan sonra sudaki Ph, KOİ ve alkalinite değişimleri ölçülmüştür. Her bir işletme şartı değişikliğinde 5 tekrarlı olarak analiz çalışmaları yapılarak ortalamaları alınmış ve grafikler oluşturulmuştur. Tez çalışması maksadıyla kurulan bu sistem toplamda 3 ay kullanılmıştır.



Şekil 3.33. Water scrubber sistemine ait akış şeması

3.5. Aquaflex PTFE Kaplı Membran Difüzör

Çalışmanın gerçekleştirilebilmesi için oluşturulan 300 litre sıvı hacmine sahip absorpsiyon kulesinin; İç alt kısmına biyogazın homojen dağılımını sağlamak için aşağıda özellikleri verilen aquaflex difüzör takılmıştır.



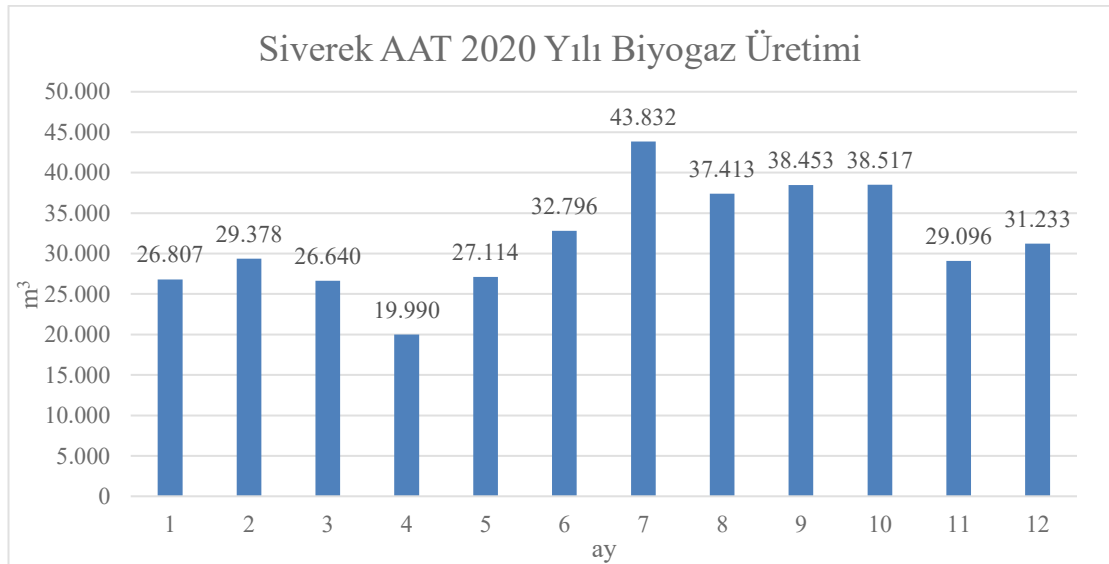
Şekil 3.34. Aquaflex PTFE kaplı membran difüzör

Aquaflexin içeriğine arge araştırmaları neticesinde PTFE kaplı membran difüzör ilave edilmiştir. Bu difüzörün amacı tesislerdeki enerji kaybını en düşük dereceye düşürmektir. PTFE kaplı difüzörler aşağıdaki önemli özelliklere sahiptir;

- Esnek ve kaygan bir yapıya sahiptir
- Üst düzey bakteri tutmama
- İç ve dış basınçlara karşı yüksek dayanıklılık
- Kimyasal mukavemet
- Hava akışı vasıtasıyla kendi yüzeyini temizleme
- Farklı difüzör tiplerinde kullanılmaktadır.

4. BULGULAR

Siverek atık su arıtma tesisinin 2019 yılındaki toplam biyogaz üretimi 337 556 m³, 2020 yılındaki toplam biyogaz üretimi 381 269 m³, 2021 yılındaki toplam biyogaz üretimi 360 095 m³, 2022 yılındaki toplam biyogaz üretimi 264 469 m³ ve 2023 yılı ağustos ayına kadarki toplam üretilen biyogaz miktarı 147 211 m³'tür. Bu verilere göre Siverek AAT'de en yüksek biyogaz üretimi 2020 yılında yapılmıştır. Yıllara göre biyogaz üretimindeki değişim yıl içerisindeki kanalizasyon sistemi bakım onarım faaliyetlerine, yeraltı suyunun kanalizasyon sistemine bağlanmasına ve yağışlı gün sayısına göre değişmektedir. Yağışlı gün sayısı ve diğer faaliyetler atıksuyun organik yükünü etkiledikleri için biyogaz üretim miktarını da değiştirmektedir.



Şekil 4.1. Siverek AAT 2020 yılı aylara göre biyogaz üretimi

Şekil 4.1' ye bakıldığında 2020 yılında en yüksek biyogaz üretiminin temmuz ayında yaklaşık olarak 43 000 m³ olduğu, en düşük biyogaz üretiminin nisan ayında yaklaşık olarak 20 000 m³ olduğu görülmektedir. En yüksek biyogaz üretimi yapılan temmuz ayını sırasıyla eylül ekim ve ağustos ayı takip etmektedir. Yıl içerisindeki biyogaz veriminde atıksu organik yüküne ek olarak hava sıcaklığı da önemli rol oynamaktadır. Yaz aylarından digester ısıları daha stabil olduğundan üretim verimi de yüksektir.

Arıtılmış atıksuyun saflaştırmada kullanımından sonra karakterindeki değişimleri gözlemlemek için su üzerinde; kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), alkalinite ve pH analizleri yapılmıştır. Bunların 10L/dk debideki sonuçlarının grafikleri aşağıda verilmiştir. Bu grafiklerde basıncın absorpsiyon verimine etkisi net bir şekilde 4.1.'de görülmektedir. Çalışmanın birinci aşamasında en ideal absorpsiyon basıncı belirlenmiş, ikinci aşamada tespit edilen bu basınç sabit tutularak tankın içerisindeki suyun pH, alkalinite ve pH parametrelerindeki değişimler incelenmiştir.

Şekil 4.1.'de 20 °C sabit sıcaklıkta 300 lt sabit su hacmi içerisinde; 10 L/dk sabit gaz debisinde toplam 10 dk boyunca ve 0 ile 13 bar basınç aralığında CH₄, CO₂, ve H₂S'in absorpsiyonu verilmiştir. Ölçümler sistem 10 dakika çalıştıktan sonra yapılmış olup her seferinde tank içerisindeki sıvı yenilenerek 5 tekrar yapılmıştır. Basıncın absorpsiyon verimi üzerindeki etkisi aşağıdaki şekildedir;

Çizelge 4.1. Atmosfer basıncında saflaştırma performansı

ANALİZ NO	BASINÇ (BAR)	% CH ₄	% CO ₂	% H ₂ S
1	ATMOSFER BASINCI	59.1	39.1	<1
2		60.7	39.0	<1
3		58.6	40.9	<1
4		61.4	42.8	<1
5		59.5	37.2	<1
ORTALAMA		60.2	3.8	<1
STANDART SAPMA		±2.4	±1.9	-

Çizelge 4.2. 3 Bar basınçta saflaştırma performansı

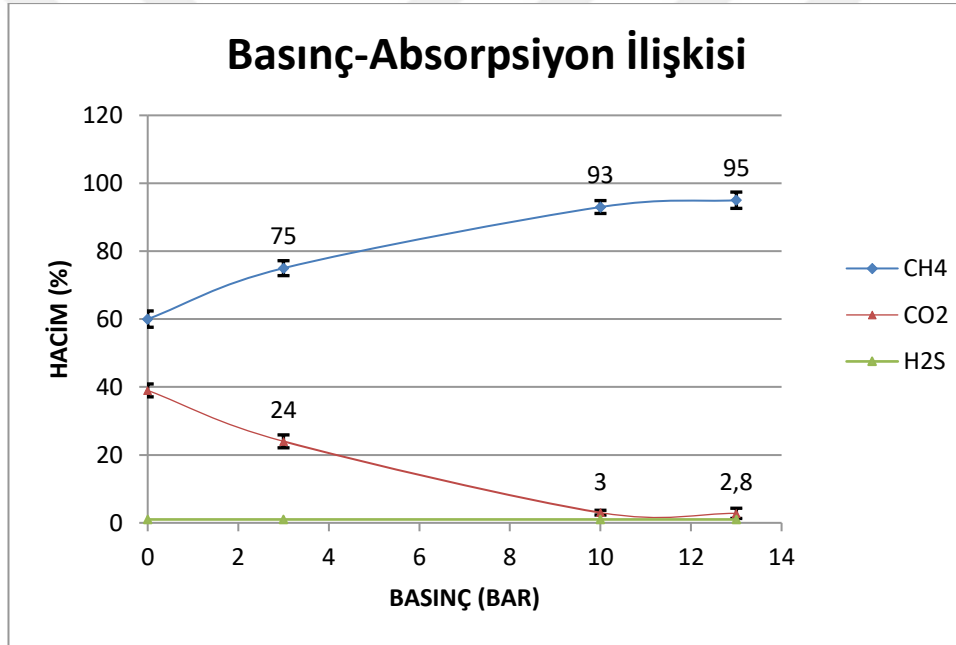
ANALİZ NO	BASINÇ (BAR)	% CH ₄	% CO ₂	% H ₂ S
1	3 BAR	75.6	23.8	<1
2		73.5	23.5	<1
3		73.1	24.7	<1
4		74.9	24.1	<1
5		76.4	24.3	<1
ORTALAMA		74.9	23.9	<1
STANDART SAPMA		±2.2	±1.9	-

Çizelge 4.3. 10 Bar basınçta saflaştırma performansı

ANALİZ NO	BASINÇ (BAR)	% CH ₄	% CO ₂	% H ₂ S
1	10 BAR	95.5	3.9	<1
2		93.2	3.1	<1
3		92.8	5.8	<1
4		96.3	5.2	<1
5		94.9	4,4	<1
ORTALAMA		95	4.4	<1
STANDART SAPMA		±1.9	±0.7	-

Çizelge 4.4. 13 Bar basınçta saflaştırma performansı

ANALİZ NO	BASINÇ (BAR)	% CH ₄	% CO ₂	% H ₂ S
1	13 BAR	96.2	3.5	<1
2		95.1	3.6	<1
3		95.4	3.9	<1
4		94.9	3.8	<1
5		94.7	4	<1
ORTALAMA		60.2	3.8	<1
STANDART SAPMA		±2.4	±1.5	-

Şekil 4.2. % CH₄, CO₂, H₂S konsantrasyonları (20 °C, 10 L/dk)

CH₄ konsantrasyonuna bakıldığında absorpsiyon veriminin 0-3 bar basınç aralığındayken yaklaşık %60'ta en düşük seviyede olduğu görülmektedir. Basınç yaklaşık 9 bar basınca çıkıncaya kadar CH₄ absorpsiyon veriminin lineer olarak artış gösterdiği görülmektedir. Yaklaşık 10 bar basınçtan sonra ise basınç arttıkça CH₄ veriminin yine lineer olarak fakat daha düşük bir eğimde artış gösterdiği tespit edilmiştir.

CO₂ konsantrasyonuna bakıldığında absorpsiyon veriminin 0-3 bar basınç aralığındayken yaklaşık %40'ta en yüksek olduğu görülmektedir. Yaklaşık 8 bara kadar basınç arttıkça CO₂'ün absorpsiyon veriminin azalma göstererek yaklaşık olarak %3'lere kadar düştüğü tespit edilmiştir. Sonrasında ise basınç değeri arttıkça CO₂ absorpsiyon veriminin %3'lerden sonraki zamanda daha yavaş düştüğü gözlemlenmiştir. En ideal saflaştırma basıncı 10 bar olarak görülmektedir. Sisteme giren kütle dengesini hesaplarsak; 20 c derecede atmosfer basıncında 1000 litre ham biyogaz 398 litre CO₂ gazı içermektedir. Bu gaz 10 bar basınç altında saflaştırmaya tabi tutulduğunda %97'si su içerisinde çözülmemektedir. Yani sisteme 386 litre CO₂ gazı dahil olmaktadır. Bu gaazın mol sayısını hesaplarsak;

İdeal gaz yasasını kullanarak CO₂ gazının mol sayısını hesaplayabiliriz:

İdeal Gaz Yasası:

$$PV = nRT$$

- P: Basınç (Pascal)
- V: Hacim (metreküp)
- n: Mol sayısı
- R: İdeal gaz sabiti (8.314 J/mol·K)
- T: Sıcaklık (Kelvin)

Verilenler:

- V: 386 litre = 0.38 metreküp (1 litre = 0.001 metreküp)
- T: 20 °C = 293.15 K (Celsius'tan Kelvin'e dönüştürmek için 273.15 eklenir)
- P: Atmosfer basıncı = 101325 Pascal

Mol sayısını (n) hesaplamak için formülü uygularsak:

$$n = PV / RT$$

$$n = (101325 \text{ Pa} * 0.386 \text{ m}^3) / (8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K} * 293.15 \text{ K})$$

$$n \approx 17.6 \text{ mol Sonuç:}$$

20 °C'de atmosfer basıncında 386 litre CO₂ gazı yaklaşık 17.6 mol'dür.

1000 litre ham biyogaz saflaştırıldığında sisteme 17.6 mol CO₂ dahil olmaktadır. Sisteme dahil olan bu CO₂ sistem çıkışında açık kanal ile deşarj noktasına doğru giderken atmosfer basıncı ve akışın verdiği hareket ile 1 dakika gibi kısa bir sürede tekrar gaz olarak atmosfere geçmektedir. Yani 10 bar basınç altında karbonik asit olarak su ortamında tutulan CO₂ atmosfer basıncına çıktığı zaman hızlıca gaz formuna geçerek sistemi terketmektedir.

H₂S konsantrasyonuna bakıldığında ise; biyogaz, saflaştırılmadan önce desülfürizasyon ünitesinde H₂S bakımından arıtıldığı için içeriğindeki H₂S oranı çok eser miktarda olduğundan Şekil 4.1.'de herhangi bir absorpsiyon verimi değişimi gözlemlenmemiştir. Ölçüm cihazı bütün analizlerde <%1 sonucu vermiştir. H₂S

konsantrasyonu tesiste desülfürizasyon ünitesi bulunduğu için absorpsiyon girişinde <%1 çıkışında da <%1 olarak okunmuştur. Bu yüzden H₂S üzerinde zaten eser miktarda bulunduğu için herhangi bir değişim tespit edilememiştir.

Yapılan ölçümler neticesinde elde edilen sonuçlara göre; Şekil 4.1’de de görüldüğü üzere en ideal işletme basınç değeri 10 bar olarak belirlenmiştir. 10 Bar basınçta biyogaz içerisindeki CH₄ konsantrasyonu doğalgaz içeriğindeki oranı yakalamakta olup, elde edilen gaz sıkıştırılarak (Bio-CNG) taşıt yakıtı olarak kullanılabilir hale gelmektedir.

Analiz sonuçları ANOVA (Varyans Analizi) testine tabi tutulduğunda çıkan sonuçlar ve varyansın anlamlı olup olmadığı aşağıdaki şekilde çıkmaktadır;

Çizelge 4.5. Biyogaz Saflaştırma Verileri

Basınç(BAR)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	H ₂ S (%)
0	60	39.0	0.0
3	75	24.0	0.0
10	93	3.0	0.0
13	95	2.8	0.0

Çizelge 4.6. ANOVA Test Sonucu

F-Value	P-Value
37.2711	0.000044

ANOVA test sonuçlarına göre; F değeri: 37.271, P değeri: 0.000044 çıkmıştır. Elde edilen P değeri (0.000044), kabul edilen 0.05 seviyesinden çok daha küçük olduğu için, işletim koşullarının analiz edilen parametreler üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu sonucuna varılmaktadır. Değişen işletim koşullarının CH₄, CO₂ ve H₂S konsantrasyonları üzerindeki etkisi istatistiksel olarak anlamlıdır.

Öte yandan Biyogaz sistemi olan atıksu arıtma tesislerinin işletme ve bakım onarım giderlerinin en büyük maliyete sahip olan ekipmanları biyogaz motorlarıdır. Bu motorları en fazla yıpratın ve bakım periyotlarını kısaltan faktörlerden biri ise yakılan biyogaz içerisindeki CO₂ ve H₂S gazlarıdır. Bu gazlar motor içerisindeki yanma odaları ve piston yataklarında aşırı korozyona sebebiyet vermektedir. Biyogaz saflaştırıldıktan sonra bu motorlarda yakılırken ham biyogaza göre çok daha az zararlı olmakla birlikte bakım ve onarım maliyetlerini de düşürecektir. Ayrıca arıtma tesisi yakınlarından geçen bir doğalgaz hattının bulunması halinde elektrik üretiminin artırılması amacı ile doğalgaz ile harmanlanarak da kullanılabilir.

Bu çalışmada; sıcaklık 20 C⁰ 'de ve deney için kullanılan biyogaz debisi 10L/dk olarak devamlı sabit tutulmuştur. Çalışma absorpsiyon kulesi içindeki su hacmi sabit tutularak gerçekleştirilmiş ve zamanla absorpsiyon kulesindeki su ve çıkış gazındaki değişimler gözlemlenmiştir. İlk adımda tank içerisindeki suyun değişimi gözardı

edilerek sadece 0 ile 13 bar basıncın biyogaz üzerindeki saflaştırma verimi üzerinde durulmuş ve 10 bar ideal basınç olarak belirlenmiştir. İkinci adımda ise ideal basınç şartlarında zamanla tank içerisindeki suda oluşan değişiklikler araştırılmıştır.

4.1. pH

Suda pH parametresinin düşük olması, metal borularda, kanallarda ve diğer yüzeylerde korozyona ve kırılmalara neden olduğu için takip edilmesi en önemli parametrelerden birisidir. (Kadam ve Panwar, 2017) Buna ek olarak biyogaz içerisindeki CO₂ gazının absorpsiyon kulesindeki su içerisinde absorbe olması neticesinde karbonik asit oluştuğundan ortamın pH'ını düşürmektedir. pH parametresinin takibi aynı zamanda absorpsiyon kulesinin çalışma verimini göstermesi açısından önemli bir göstergedir. (Shao ve ark., 2012) Kule çıkışında eğer pH'da düşüş gözlemlenmediyse ya da fark azalmaya başladıysa; muhtemelen sistemde bir tıkanıklık veya kompresör, su pompaları gibi ekipmanlarda bir arıza olduğuna işaret etmektedir. pH parametresi diğerlerine göre kolay ölçülebilen bir parametre olduğu için işletme esnasında işletme verimliliğinin takibi açısından en kolay ve en net gösterge olacaktır. (Andriani ve ark., 2014)

Çizelge 4.7. 10 litre biyogaz absorpsiyonu sonrası pH değerleri

ANALİZ NO	BİYOĞAZ HACMI	pH
1	10 LİTRE	7,8
2		7,6
3		7,7
4		7,5
5		7,9
ORTALAMA		7.7
STANDART SAPMA		±0.3

Çizelge 4.8. 1000 litre biyogaz absorpsiyonu sonrası pH değerleri

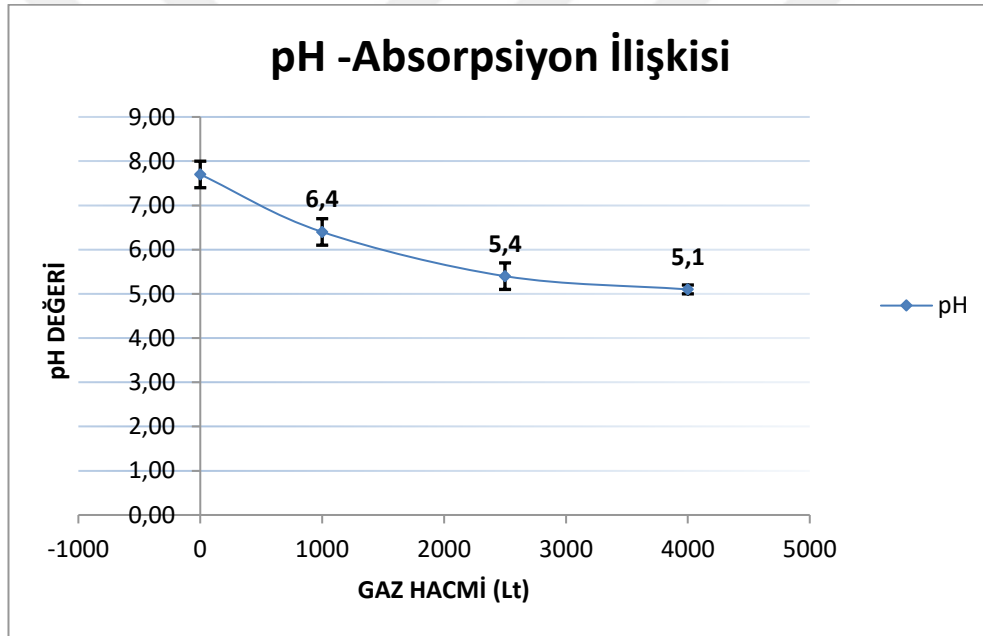
ANALİZ NO	BİYOĞAZ HACMİ	pH
1	1000 LİTRE	6.3
2		6.5
3		6.6
4		6.4
5		6.2
ORTALAMA		7.7
STANDART SAPMA		±0.3

Çizelge 4.9. 2500 Litre biyogaz absorpsiyonu sonrası pH değerleri

ANALİZ NO	BİYOĞAZ HACMI	pH
1	2500 LİTRE	5.5
2		5.3
3		5.6
4		5.2
5		5.4
ORTALAMA		7.7
STANDART SAPMA		±0.3

Çizelge 4.10. 4000 Litre biyogaz absorpsiyonu sonrası pH değerleri

ANALİZ NO	BİYOĞAZ HACMİ	pH
1	4000 LİTRE	5.0
2		5.2
3		5.15
4		5.1
5		5.0
ORTALAMA		5.1
STANDART SAPMA		±0.1



Şekil 4.3. pH değişim grafiği

Şekil 4.3.'de 20 °C sabit sıcaklıkta ve 0 ile 4000 litre hacim aralığında pH değerleri verilmiştir. Grafikteki pH değerlerine bakıldığında en yüksek değerin 500 litre su civarında yaklaşık olarak 7,7 olduğu görülmektedir. Sonrasında su hacmi yaklaşık 2500 litreye çıkıncaya kadar pH değeri düşüş göstermiştir 2500 litreden sonra

ise hacim arttıkça pH değerinde daha düşük hızda azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. En düşük değer ise 3500 litrede yaklaşık 5 olarak tespit edilmiştir.

4.2. Alkalinite

Alkalinite, suyun asitleri nötralize etme veya asitliğe neden olan değişikliklere karşı koyma ve pH değerini sabit tutma kabiliyetinin bir ölçüsüdür. Bir su numunesinin alkalinitesini ölçmek için titrasyon kullanılır ve pH değeri 8 veya daha yüksek olan su alkali olarak kabul edilir. Suyun alkalinitesini ölçmek için pH ölçeği kullanılır. pH değeri 8 ila 10 arasında olan su hafif alkali olarak kabul edilirken, pH değeri 10+ olan su çok alkali olarak kabul edilir. pH'ı 7 olan nötr, 7'den düşük olan ise asidik olarak kabul edilir. (<https://www.wwdmag.com/home/article/21384197/what-is-alkalinity>) Water sucrubber sistemi kurulacak olan tesiste pH parametresi üzerinden işletme takibi yapılacağından ve alkalinite pH değişimine karşı belirleyici bir parametre olduğundan takibi önem arz etmektedir.

Çizelge 4.11. 10 Litre biyogaz absorpsiyonu sonrası alkalinite değerleri

ANALİZ NO	BİYOGAZ HACMI	ALKALİNİTE
1	10 LİTRE	308.5
2		315
3		328
4		302
5		321.5
ORTALAMA		315
STANDART SAPMA		13

Çizelge 4.12. 1000 Litre biyogaz absorpsiyonu sonrası alkalinite değerleri

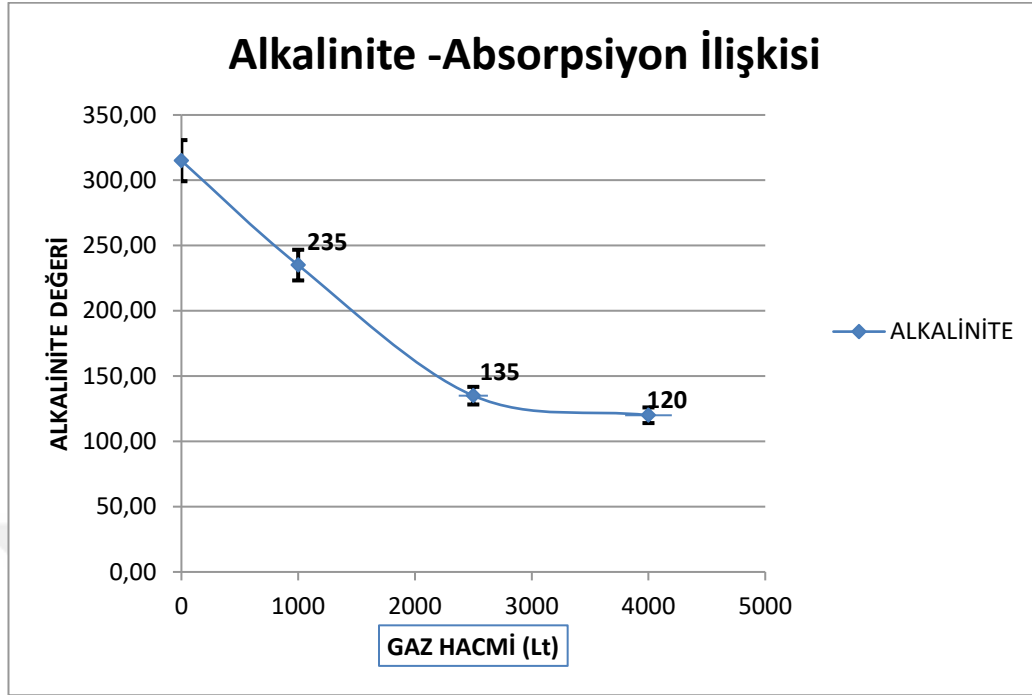
ANALİZ NO	BİYOGAZ HACMI	ALKALİNİTE
1	1000 LİTRE	247
2		224
3		241
4		231
5		229
ORTALAMA		235
STANDART SAPMA		12

Çizelge 4.13. 2500 Litre biyogaz absorpsiyonu sonrası alkalinite değerleri

ANALİZ NO	BİYOĞAZ HACMI	ALKALİNİTE
1	2500 LİTRE	124
2		149
3		136
4		129
5		139
ORTALAMA		135
STANDART SAPMA		13

Çizelge 4.14. 4000 Litre biyogaz absorpsiyonu sonrası alkalinite değerleri

ANALİZ NO	BİYOGAZ HACMI	ALKALİNİTE
1	4000 LİTRE	117
2		120
3		124
4		112
5		129
ORTALAMA		120
STANDART SAPMA		11



Şekil 4.4. Alkalinite değişim grafiği

Şekil 4.4.'de 20 °C sabit sıcaklıkta ve 0 ile 4000 litre hacim aralığında atık suyun alkalinite değerleri verilmiştir. Grafiğe bakıldığında atık suyun alkalinite değerinin 700 litrede en yüksek olup yaklaşık olarak 330 olduğu görülmektedir. Yaklaşık 2500 litreye kadar bu değer düşüş göstererek yaklaşık olarak 140'lara kadar düşmüştür. Sonrasında ise hacim arttıkça daha düşük hızda azalma göstermiş olup en düşük değere ise 3500 litrede 130'a düştüğü gözlemlenmiştir.

4.3. Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ)

Genellikle mg/L veya g/L cinsinden oksijen tüketimi cinsinden ifade edilen, kimyasal oksidanlarla ısıtma koşulu altında hammaddenin oksitlenmesi ile tüketilen

oksijen miktarını ifade eder. En yaygın kullanılan oksidan potasyum dikromat veya potasyum permanganattır. Potasyum dikromat oksidan olduğunda ölçülen KOİ değeri kısaca KOİ-Cr veya KOİ olarak adlandırılır ve potasyum permanganat oksidan olduğunda ölçülen değer CODMn veya potasyum permanganat indeksi olarak adlandırılır. KOİ, kimyasal olarak oksitlenebilen organik maddelerin miktarını ve hammaddekteki az miktarda inorganik maddenin yanı sıra hammaddekteki maksimum kimyasal enerjiyi temsil eder. Yaygın test yöntemleri arasında potasyum dikromat yöntemi, coulomb yöntemi, hızlı kapalı katalitik sindirim yöntemi (fotometrik yöntem dahil), enerji tasarruflu ısıtma yöntemi, klor gazı düzeltme yöntemi vb. yer alır. (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater)

Çizelge 4.15. 10 Litre biyogaz absorpsiyonu sonrası KOİ değerleri

ANALİZ NO	BİYOGAZ HACMI	KOİ
1	10 LİTRE	38.7
2		41.5
3		39.2
4		37.8
5		43.1
ORTALAMA		40
STANDART SAPMA		3.4

Çizelge 4.16. 4000 Litre biyogaz absorpsiyonu sonrası KOİ değerleri

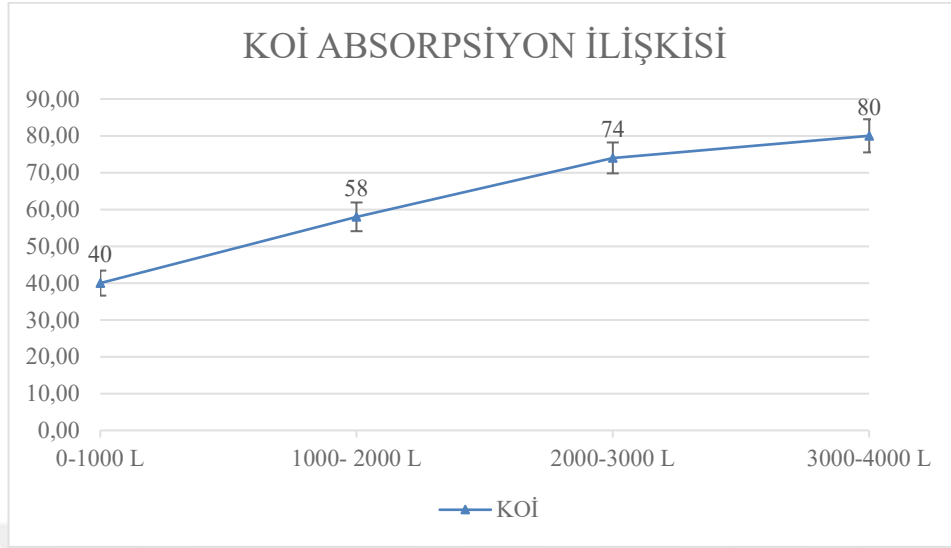
ANALİZ NO	BİYOĞAZ HACMİ	KOİ
1	1000 LİTRE	56.2
2		61.1
3		57.5
4		54.6
5		58.8
ORTALAMA		58
STANDART SAPMA		3.9

Çizelge 4.17. 4000 Litre biyogaz absorpsiyonu sonrası KOİ değerleri

ANALİZ NO	BİYOĞAZ HACMİ	KOİ
1	2500 LİTRE	70.8
2		75.3
3		78.1
4		71.6
5		73.9
ORTALAMA		74
STANDART SAPMA		4.2

Çizelge 4.18. 4000 Litre biyogaz absorpsiyonu sonrası KOİ değerleri

ANALİZ NO	BİYOGAZ HACMI	KOİ
1	4000 LİTRE	78.2
2		83.1
3		77.3
4		81.9
5		79.6
ORTALAMA		80
STANDART SAPMA		4.5



Şekil 4.5. 300 L su hacmi, 10 bar sabit basınçta 10 L/dk debi çalışıldığında çıkan sonuçlar. (20 °C, 10 L/dk)

Şekil 4.5.'de atık suyun 20 °C sabit sıcaklıkta, 10 bar sabit basınçta ve 10 L/dk sabit debide KOİ değerleri verilmiştir. Grafiğe bakıldığında sudaki KOİ değerinin yaklaşık olarak 40'tan başlayarak hacim arttıkça arttığı görülmektedir. En düşük KOİ değeri 500 litrede yaklaşık olarak 40 olduğu tespit edilmiştir. En yüksek KOİ değerinin ise yaklaşık 3300 litrede takriben 80 olduğu görülmektedir.

Şekil 4.5.'te görüldüğü üzere 300 lt'lik sabit sıvılı absorpsiyon sistemine 10L/dk sabit debi ile verilen biyogaz miktarı 2.500 lt'ye geldikten sonra tank içindeki su doygunluğa gelmekte ve saflaştırma verimi düşmeye başlamaktadır. Bu grafiklerden de anlaşılabacağı üzere; 300 lt su 10 bar sabit basınçta 2.500 lt ham biyogazı saflaştırabilmektedir. KOI parametresinde ki yükseliş su içerisinde çözünmüş olan karbonik asitteki karbon miktarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Kentsel atıksu arıtım tesislerinden ikincil arıtmaya ilişkin deşarj limitleri tablo 1'e göre atıksu arıtma tesisi çıkış KOI sınır değeri 125 mg/l'dir. Bu sınır değeri göz

önünde bulundurularak tesis çıkış değerlerinde yasal sınırı aşmamak adına absorpsiyon kulesi çıkışında 80 mg/l değerini aşmamak emniyetli olacaktır.



5. TARTIŞMA

5.1. Suyla Yıkama (Washing With Water)

Biyogazın su yıkama ve ardından biyometan sıkıştırma yoluyla iyileştirilmesi çevreye zarar vermeyen bir süreçtir. Biyometan sürdürülebilirliği üzerinde ilişkili etkileri olan çeşitli güç gereksinimleri ile karakterize edilen çeşitli tesis konfigürasyonları kullanılarak elde edilebilir.

Biyogaz sıkıştırma için ilgili güç gereksinimi ile yıkama basıncını yükselterek CO₂'nin çözünürlüğünü arttırmak yerine, CO₂ atmosfere yakın koşullar altında yıkanabilir. Atmosfere yakın basınçlı su ile yıkama (NAPWS) biyogaz sıkıştırma ve soğutma gerektirmez, bu nedenle CO₂ yıkama ile ilişkili güç gereksinimini azaltır. Buna ek olarak, düşük basınçlı kolonlar daha ucuzdur ve bu da NAPWS yükseltme tesislerinin sermaye harcamalarını ve işletme giderlerini azaltmaktadır. Ancak NAPWS, düşük basınç koşulları altında CO₂'nin sudaki çözünürlüğünün azalması nedeniyle çok daha yüksek bir sıvı-gaz oranı gerektirmektedir. Buda çok fazla su gereksinimi anlamına gelmektedir. İhtiyaç duyulan su arıtılmış su kullanılarak karşılanabileceğini çalışmamızda ortaya konulmuştur.

Buzianowski ve arkadaşları (2016) bir dizi su yıkama seçeneğinin güç gereksinimlerini araştırmışlardır. Çalışmalarında iki tür suyla yıkama yöntemini analiz etmişlerdir: Bunlar sırasıyla yüksek basınçlı suyla yıkama (HPWS) ve atmosferik

basınca yakın suyla yıkama (NAPWS). Bir su yıkama tesisi modeli oluşturmuşlar, deneysel olarak doğrulanmış ve yedi yükseltme tesisi konfigürasyonu için simüle etmişlerdir. Simülasyon sonuçları, HPWS tesislerinde biyogaz yükseltme işleminin güç gereksiniminin esas olarak biyogaz sıkıştırma ile ilişkili olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, NAPWS tesislerinde ana güç su pompalama için gereklidir. Her iki tesiste de biyometanın atmosferik basınçtan 20 MPa'ya sıkıştırılmasına önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. En düşük spesifik güç gereksiniminin su rejenerasyonu olmayan bir NAPWS tesisi için elde edilebileceğini ortaya koymuşlardır (0,24 kW h/Nm³ ham biyogaz). Ancak bu tesisin, örneğin bir kanalizasyon arıtma tesisinden veya nehirden gelen çıkış suyu gibi ucuz su kaynağı gerektirdiğini de ifade etmektedirler. Ucuz su temini bu metodun dezavantajı olarak görülmektedir (Budzianowski ve ark., 2017).

Hem kendi çalışmamızın sonuçları hem de suyla yıkama tekniği üzerine yapılan çalışmaların sonuçları biyogaz saflaştırma yöntemlerinden suyla yıkama yöntemleri içinde dahi rejenerasyonsuz olanın en ekonomik yöntem olduğunu ortaya koymaktadır. Çalışmamızda arıtılmış ve rejenerasyona gerek duyulmayacak şekilde su kullanılmasıyla yukarıda bahsedilen dezavantajların ortadan kaldırılacağını göstermiştir.

Biyogaz saflaştırmada kullanılan CO₂ yüklü suyun dinlendirme havuzlarında bekletilmesiyle CO₂'in uzaklaştırılması Şanlıurfa iklim şartları nedeniyle kolaylığı ve maliyet gerektirmediği de önemli avantajlardandır.

5.2. Maliyet Analizi

Çizelge 5.1. Çalışma için kurulan pilot ölçekli absrpsiyon kulesi maliyet tablosu

Ekipman	Maliyet
Absorpsiyon Tankı Maliyeti (€)	1.800
Debimetreli Gaz Vanası (€)	50
Borulama (€)	90
300 lt 12 Bar Kompresör (€)	1.537
Biyogaz Basınçlandırma Maliyeti (€/m ³)	0.84
Diğer Bağlantı Ekipmanları Maliyeti(€)	45
Bakım Maliyeti (€/yıl)	450

Bu tez çalışması için kurulan pilot prosesin işletme ömrü on yıl olarak öngörülmüştür. Çizelge 5.1’de belirtilen maliyet tablosundaki verilere göre sistemin toplam yatırım ve on yıllık işletme maliyeti: 12.356 €’dur. (<https://www.e-makine.com/pb4900-3004>), (<https://www.alibaba.com/product-detail/OEM-quality-valve-flow-meter>), (<https://turkish.alibaba.com/product-detail/Food-Grade-Sanitary-Vertical-Stainless-Steel>)

Prosesin on yıllık saflaştırma kapasitesi 51.600 m³ olduğu için birim biyogaz saflaştırma maliyeti: 0.239 €/m³ çıkmaktadır. Tez çalışması için pilot ölçekte kurulan saflaştırma ünitesi düşük kapasitede olduğu için birim saflaştırma maliyeti literatürdeki gerçek ölçekli saflaştırma sistemlerine göre yüksek çıkmaktadır. Literatürde 1000 m³/saat kapasitesinde gerçek ölçekli kurulan bir sistemin birim saflaştırma maliyeti: 0.0174 €/m³ olarak belirtilmiştir. Saflaştırma kapasitesi büyüdükçe birim saflaştırma maliyeti daha düşük olmaktadır. (Khan ve ark., 2021)

Çizelge 5.2. Farklı biyogaz saflaştırma teknolojilerinin karşılaştırılması (Khan ve ark., 2021)

Parametre	Membran Ayırma	Suyla Saflaştırma	Kimyasal Saflaştırma
Çalışma Basıncı (bar)	6-8	7-10	Atmosferik
Çıkış Basıncı (bar)	4-6	7-10	4-5
Isı İhtiyacı	Yok	Yok	100-180 °C
Enerji İhtiyacı (€/yıl)	29,240	39,560	23,220
İşletme Maliyeti (€/yıl)	81,750	78,000	134,500
Yıllık Yatırım Maliyeti (€/Yıl)	15,533	17,666	23,533
Bakım Maliyeti (€/yıl)	25,000	15,000	59,000
Birim Saflaştırma Maliyeti (€/m ³)	0,0176	0,0174	0,0279

Biyogaz saflaştırma metotları kurulum, işletme ve bakım maliyetleri açısından kıyaslandığında, en çok uygulanan water scrubber yönteminin yatırım maliyeti olarak membran ile saflaştırmaya göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Fakat bakım maliyeti açısından daha düşük maliyetlidir. İşletme maliyeti açısından membran ile saflaştırmaya göre yıllık yaklaşık 30.000 € daha yüksektir. Water scrubber yönteminin dezavantajlarından olan ve işletme maliyetini yükselten en önemli sebeplerden biri olan aşırı su tüketim maliyeti ortadan kalktığı için işletme maliyeti olarak membran ile saflaştırma yöntemi ile aynı seviyelere gelmektedir. Çizelge 5.2'deki veriler

1000m³/saat kapasitedeki bir tesis için hesaplanmıştır, bu kapasitede bir water scrubbing tesisinin yıllık su tüketim miktarı 32.000 € maliyet oluşturmaktadır. (Khan ve ark., 2021) Su maliyeti düşürüldükten sonra metreküp birim saflaştırma maliyeti hesaplandığında; çizelge 5.2'deki verilere göre metreküp başına birim saflaştırma maliyeti: 0.0174 €/m³'dür. Bu maliyet diğer uygulanan metotlara göre en düşük seviyededir. Bu tezde uygulanan yöntem sayesinde su tüketim maliyeti ortadan kaldırılarak, water scrubbing yönteminin dezavantajları asgariye indirilmiş ve daha kolay uygulanabilir bir yöntem olarak ortaya koyulmuştur.

Türkiye'de günümüzde biyogaz saflaştırma sistemi henüz kullanılmaya başlanmadığı için ilk yatırım maliyeti ve bakım faaliyetlerinin giderleri ilke etapta bir miktar daha yüksek olacaktır. Fakat önümüzdeki zaman zarfında ülkemizde de diğer ülkelerde olduğu gibi biyogazın saflaştırılarak taşıt yakıtı olarak kullanımı yaygınlaşacaktır. Bu yaklaşım çevre, ekonomi ve dünyada en fazla ihtiyaç duyulan ucuz enerji kaynağı elde etme konusunda uygulayıcının elini güçlendirecektir.

6. SONUÇLAR

Su, yeryüzündeki tüm canlıların yaşamını devamı için ihtiyaç duyduğu sınırlı ve stratejik doğal kaynaklardan biridir. Su krizi, Kuzey Afrika ve Orta Doğu gibi bölgelerde pekçok ülkenin karşılaştığı en önemli problemlerden birisidir. Dünya genelindeki artan su ihtiyacı, temiz su kaynakları yerine alternatif su kaynaklarının kullanılmasına yönelik çalışmaların artmasına sebep olmuştur. Alternatif su kaynaklarının en önemlilerinden birisi, atıksuların ileri arıtma teknolojileri kullanılarak arıtılması ve yeniden kullanılması olarak görülmektedir. Genel olarak arıtılmış atıksular tarım ve tarım dışı sulamalarda (park, bahçe, yeşilalanlar, golf sahası, yol kenarları vb.), sanayi sektöründe (soğutma, yıkama, kazan besleme) ve yangın söndürme işlemlerinde tercih edilmektedir. Su kıtlığını kısmen hafifletmek için tarım ve sanayide içilebilecek su yerine geri dönüştürülmüş su kullanılabilmektedir (Demir, Yıldız, Sercan, ve Arzum, 2017).

Ülkemizdeki atık suların yeniden kullanım örneklerine bakıldığında, arıtılmış atık suların tarımda doğrudan ya da dolaylı şekilde kullanıldığı örnek şehirler arasında Aksaray, Kayseri, Eskişehir, Muğla, Konya ve İzmir gibi şehirler yer almaktadır. (Kaplan, 2010). Arıtılmış atık suyun yeniden kullanımının önde gelen örneklerinden birisi Konya atık su arıtma tesisidir. Ortalama olarak 140.000 m³'lük atık su arıtma kapasitesine sahip tesiste 3.600 m³'lük miktarı geri kazanım tesisine aktarılmakta ve 3200 ha yeşil alanın sulanması sağlanmaktadır.

Atık suların arıtıldıktan sonra yeniden kullanım yerlerine yeni bir alan bu çalışma ile eklenmektedir. Genel olarak yukarıda da bahsedildiği gibi arıtılmış sular tarım ve tarım dışı sulamalarda ve su kullanımı gerektiren bazı sanayii proseslerinde kullanılmaktadır. Çalışmamız neticesinde arıtılmış suyun biyogaz saflaştırma ve yükseltme işlemlerinde rahatlıkla kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca biyogaz saflaştırma işleminde kullanılan atık sudaki CO₂ gazı kendiliğinden suyu terkettiği için yukarıda söz konusu edilen atık su kullanım alanlarında herhangi bir yeniden arıtma işlemi gerekmeksizin kullanılabileceği de düşünülmektedir.

Biyogaz saflaştırma veya yükseltme teknolojileri arasında su ile yıkama en uygulanabilir ve uygun maliyetli teknoloji olarak görülmektedir. İyi geliştirilmiş, kolay ve basit bir teknolojidir ve dünya çapında giderek daha fazla kabul görmekte ve uygulanmaktadır. Buna rağmen, ilgili literatür, biyogazdan maksimum CO₂ giderimi elde etmek için su yıkama teknolojisinin performansını etkileyen işletme ve tasarım faktörlerinin etkisi hakkında çok az bilgi sunmaktadır. Dünyada ve Türkiye’de biyogaz saflaştırma uygulamalarını arttırmak adına bu çalışma da farklı bir bakış açısı oluşturmuştur.

Biyogaz saflaştırıldıktan sonra doğalgazın kullanıldığı bütün sektörlerde kullanılabilir hale gelecektir. Doğalgaz sadece belli yeraltı rezervlerinde elde edilebilen ve kilometrelerce boru hattı ile kullanım alanlarına taşınabilen bir enerji kaynağı olmasına karşın biyogaz yerel olarak birçok bölgede üretilmektedir. Bitkisel üretim, hayvansal üretim veya Belediyelerin atık yönetimi neticesinde bol miktarda üretilmektedir. Yerel olarak üretilen bu gazın saflaştırılarak doğalgaz şebekesine deşarjı ya da sıkıştırılarak taşıt yakıtı olarak kullanımı mümkündür. Böylelikle ucuz bir enerji kaynağı oluşturmakla birlikte yaşanabilecek enerji krizlerinin risk faktörü minimuma indirilebilecektir.

Saflaştırılan biyogaz, taşıt yakıtı olarak kullanılabilir duruma getirildiğinde, doğal gazın bir alternatifi olarak hizmet verebilecektir. Biyogazın taşıt yakıtı olarak kullanılabilmesi için aşağıdaki adımlar izlenmektedir:

6.1. Üretim

Biyogaz, organik atıkların anaerobik parçalanması (oksijensiz bir şekilde kesilmiş mikroorganizmalar tarafından parçalanması) sonucu üretilmektedir. Bu işlem genellikle atık su arıtma tesislerinde, çöp sahalarında veya biyogaz tesislerinde yapılmaktadır.

6.2. Saflaştırma

Üretilen ham biyogaz, metan (CH_4) ve karbonhidratlar (CO_2) başta olmak üzere çeşitli gazlar içerir. Biyogazın taşıt yakıtı olarak kullanılabilmesi için saflaştırılması, yani karbondioksit, su buharı, hidrojen sülfür (H_2S) ve diğer kirleticilerin uzaklaştırılması gerekir. Bu işlem sonucunda metan içeriği %90-98'e çıkar.

6.3. Sıkıştırma (CNG) veya Sıvılaştırma (LNG)

Saflaştırılmış biyogaz, sıkıştırılmış doğal gaz (CNG) olarak kullanılabilir. Bu süreçte gaz yüksek basınç altında (genellikle 200-250 bar) depolanır ve taşınır. Buna

ek olarak alternatif olarak biyogaz sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) olarak ta kullanılabilir. Bu süreçte gaz, -162°C 'ye kadar soğutulularak sıvılaştırılır. LNG, taşımada ve depolamada kolaylık sağlamaktadır.

6.4. Depolama ve Dağıtım

Sıkıştırılmış veya sıvılaştırılmış biyogaz, uygun depolama tanklarında saklanabilmektedir. Bu tanklar, araçlarda kullanılmak üzere özel olarak tasarlanmıştır. Biyogazın araçlara ulaştırılması için dolum istasyonlarına gönderilmektedir. Bu istasyonlar, saflaştırılmış biyogazı araçların CNG depolarına aktarmaktadır.

Biyogaz bu işlemlerden sonra, CNG için uyarlanmış motorlarda kullanılabilir. Biyo-CNG (Biyometandan Üretilen Sıkıştırılmış Doğal Gaz), araçlarda kullanılmak üzere biyogazın saflaştırılıp sıkıştırılmasıyla elde edilen bir yakıttır. Biyo-CNG'nin araçlarda yakıt olarak kullanımının avantajları şunlardır;

Düşük Karbon Emisyonları: Biyo-CNG, fosil yakıtlara göre çok daha az karbon dioksit (CO_2) emisyonu üretir. Bu, iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir katkı sağlamaktadır.

Azaltılmış Hava Kirliliği: Biyo-CNG, fosil yakıtlara göre daha az zararlı hava kirleticisi (örneğin, azot oksitler, partikül madde) üretir. Bu, hava kalitesini iyileştirmeye yardımcı olmaktadır.

Yenilenebilir Kaynak: Biyo-CNG, organik atıkların fermantasyonu yoluyla elde edilir, bu da onu yenilenebilir bir enerji kaynağı yapar. Bu, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltır.

Daha Düşük Yakıt Maliyeti: Biyo-CNG, fosil yakıtlara göre daha düşük maliyetli olabilmektedir, özellikle yerel olarak üretilbildiği için nakliye maliyetleri düşmektedir. Bu durum araçlarda kullanım için önemli bir maliyet tasarrufu sağlamaktadır.

Yerel Ekonomiye Destek: Biyo-CNG üretimi, yerel iş yaratılması için ve bölgesel ekonomik büyümeye katkıda bulunacaktır.

Mevcut Altyapı ile Uyumlu: Biyo-CNG, mevcut doğal gaz altyapısıyla uyumludur, bu da araçlarda yakıt olarak kullanım için geçişi kolaylaştırmaktadır. Biyo-CNG, güvenli ve verimli bir yakıttır ve mevcut doğal gaz motorlarında kullanılabilir.

Biyo-CNG'nin taşıtlarda kullanılmasının bazı dezavantajları şunlardır;

Yakıt Altyapısı: Biyo-CNG'nin taşıtlarda kullanılabilmesi için özel bir yakıt altyapısına ihtiyaç vardır. Bu altyapının yeniden kurulması ve işletilmesi ek maliyet oluşturacaktır.

Depolama ve Taşıma: Biyo-CNG gaz hali olduğu için depolanması ve taşınması için yeni kurulan sistem için ayrı güvenlik tedbirleri alınması gerektiğinden bu durum yeni eğitimler ve prosedürler gerektirmektedir.

Verimlilik: Biyo-CNG bazen motor verimliliğini olumsuz etkileyebilmektedir. Biyo-CNG'nin saflığı ve kalitesi değişkenlik gösterebilir, bu da motorda daha düşük bir yanma sürecine neden olabilmektedir. Bu durumun gerçekleşmemesi için işletme koşulları çok titiz bir şekilde takip edilmelidir.

Altyapıya Uyum Süreci: Mevcut taşıtların çoğunluğu benzin veya dizel yakıtla çalıştığı için, bu taşıtları Biyo-CNG ile çalışacak şekilde dönüştürmek veya yeni taşıtlar tasarlamak gerekmektedir. Bu da ek maliyet ve zaman gerektireceğinden bir dezavantaj olarak değerlendirilmektedir. (Yebo Li ve Samir Kumar Khanal)

Bütün bunlara rağmen, bu dezavantajlar üzerinde çalışılarak aşılabılır ve Biyo-CNG'nin çevre dostu ve sürdürülebilir bir alternatif yakıt seçeneği olabileceği düşünülmektedir.

7. ÖNERİLER

Siverek atıksu arıtma tesisinde 2020 yılında en yüksek biyogaz üretiminin temmuz ayında gerçekleştiği ve yaklaşık olarak 43.000m^3 olduğu belirtilmektedir. Buna göre tesisin ürettiği en fazla biyogaz için aylık $43.000/0.3 = 143.333\text{ m}^3$ arıtılmış atıksuya ihtiyaç duyulmaktadır. Günlük; $143.333/30 = 4.777\text{ m}^3$ arıtılmış atıksu ihtiyacı oluşmaktadır. Tesis günlük 20.500m^3 atıksu arıtma kapasitesine sahip olduğundan, üretilen biyogazın saflaştırılması için ihtiyaç duyulan su miktarı arıtılan toplam su miktarının $(20.500/4.777 = 4.29)$ %23'üne tekabül etmektedir.

Bu su kütlesinin de deşarj edildikten sonra içeriğindeki CO_2 'yi atmosfere geri verdiği bilindiğinden dolayı tamamiyle sürdürülebilir bir sistem kurmak mümkün görünmektedir. Biyogaz ünitesi bulunan atıksu arıtma tesislerinde arıtılan suyun %23'ü kullanılarak ham biyogaz saflaştırılabilecektir. Böylece hem gayet pahalı olan biyogaz motorlarının bakım maliyetlerinden kurtulmuş olunacak, hem de saflaştırılmış biyogaz doğalgaz niteliği taşıdığı için çok geniş bir kullanım alanına sahip olacaktır. Diğer taraftan tesislerde ilk yatırım maliyeti düşürülmek istendiğinde biyogaz motorlarından vazgeçilerek üretilen gazın doğalgaz şebekesine direk enjeksiyon ile satılması veya yine belediyelerin kullandığı CNG'li otobüslerin yakıtı olarak kullanımı mümkün olacaktır. Bu sayede saflaştırılmış biyogaz ile çalışan araçlarda yakıt tüketimi %70'lere kadar düşecek, saflaştırılmış biyogaz geleneksel yakıtlara nazaran daha temiz bir yakıt olması sebebiyle motorda yakıtı bağlı olumsuz etkiler azalacak bu da bakım ve onarım maliyetlerini düşürecektir. Ayrıca CO_2 salınımı geleneksel yakıtlara göre %40'lara kadar düşecektir. CNG sistemi adapte edilmiş otobüs kamyon vs. araçların CNG ve motorin ortak kullanımı sonucu menzili bir depoda 650 km'ye kadar daha ileriye taşımak mümkün olacaktır.

Yüksek CH₄ geri kazanımı, sermaye ve işletme maliyetlerinin azaltılması ve biyogaz iyileştirme tesislerinin enerji tüketimi için su yıkama kolonlarının proses ve tasarım parametrelerinin optimizasyonu aktif bir araştırma alanıdır.

Basınç, akış hızı ve gaz sıcaklığı gibi operasyonel proses parametreleri, gerekli büyük miktarlardaki suyu, biyogaz sıkıştırma maliyetini ve su pompalamayı azaltmak için optimize edilmelidir. Verimli, çevre dostu su kullanımı ve geri dönüşümü yöntemleri de araştırmaya değer alanlardır. Çalışmamızda en iyi performans/verim 20°C sıcaklık, 10 L/dk debi ve 10 bar basınçta elde edilmiştir.

Biyogaz saflaştırma için water scrubbing sisteminin ülkemizde yaygın kullanılması için, devlet tarafından ve özel sektör tarafından desteklenmelidir. Öncelikle bir tesis pilot bölge olarak seçilmeli burada en ideal yöntemler belirlenmeli, belli süreler işletme verileri takip edilmeli ve detaylı maliyet analizleri yapılmalıdır. Bundan sonra Türkiye'deki atıksu arıtma tesisleri ve katı atık depolama tesislerinde sistemin yaygınlaştırılması sağlanmalıdır. Biyogaz saflaştırma sistemi ayrıca hayvansal ve bitkisel atık üreten diğer tesislerde de uygulanabilecektir. Mümkün olan her bölgede sistemin yaygınlaştırılması enerji bağımlılığı ve ekonomik zorluklar konusunda yerel bölgeleri güçlendirecektir.

Biyometanın depolama kabiliyeti, üretim ve kullanımın yerel ve zamansal olarak ayrıştırılması ve çeşitli kullanım yollarında uygulanabilirlik açısından esneklikleri, biyometanın benzersiz özelliğini oluşturmaktadır. Biyogaz saflaştırma ile ilgili olarak gelecekte yüksek verimli ve daha az zararlı yeni teknolojilerin geliştirilmesi önem arz etmektedir. Fiyat seviyelerine (özellikle doğal gaz için), mevcut altyapıya ve ulusal yasal çerçeve koşullarına bağlı olarak, biyometan en umut verici yenilenebilir enerji taşıyıcılarından biri haline gelebilir bir konuma sahiptir.



KAYNAKLAR

- AHMED, S., RAHMAN, M.M., TARANNUM, K., CHOWDHURY, A., RAFA, N., NUZHAT, S., PONNUSAMY, S., VO, DAI-V., LICHTFOUSE, E., MAHLIA, T.M.I. (2021). Biogas upgrading, economy and utilization: a review. *Environmental Chemistry Letters*.
- ALEXANDER STERN, S. (1994). Polymers for gas separations: the next decade. *Journal of Membrane Science*, 94(1), 1-65. doi:[https://doi.org/10.1016/0376-7388\(94\)00141-3](https://doi.org/10.1016/0376-7388(94)00141-3)
- AMON, T., AND BOXBERGER, J. (1999). *Organic wastes for co-digestion in agricultural biogas plants: guidelines and legal conditions in Austria. Proceedings of IEA Paper presented at the Bioenergy Workshop: Hygienic and Environmental Aspects of Anaerobic Digestion: Legislation and Experiences in Europe*, Stuttgart-Hohenheim, Germany, II, .
- ANDRIANI, D., WRESTA, A., ATMAJA, T. D., AND SAEPUDİN, A. (2014). A review on optimization production and upgrading biogas through CO₂ removal using various techniques. *Appl Biochem Biotechnol*, 172(4), 1909-1928. doi:10.1007/s12010-013-0652-x
- ANGELIDAI, I. (2002). Environmental Biotechnology 12133. Environment and Resources DTU, Danmarks Tekniske Universitet, Lyngby, Denmark.
- ANGELIDAKI, I., KARAKASHEV, D. B., HOLDT, S. L., PEDERSEN, P. M., DAS, D., MISHRA, H. N., SELVENDRAN, D. (2011). *High rate algal biomass production for food, biochemicals and Biofuels: An Indo-Danish collaboration project*. Paper presented at the 4th Congress of the International Society for Applied Phycology, Halifax, Canada.
- ARYAL, N., OTTOSEN, L. D. M., KOFOED, M. V. W., and PANT, D. (2021). *Emerging Technologies and Biological Systems for Biogas Upgrading*. London: Academic Press.
- AWE, O. W., ZHAO, Y., NZIHOU, A., MINH, D. P., LYCZKO, N. J. W., and VALORIZATION, B. (2017). A review of biogas utilisation, purification and upgrading technologies. 8, 267-283.
- BACIOCCHI, R., CARNEVALE, E., COSTA, G., LOMBARDI, L., OLIVIERI, T., PARADISI, A., and ZINGARETTI, D. (2013). Pilot-Scale Investigation of an Innovative Process for Biogas Upgrading with CO₂ Capture and Storage. *Energy Procedia*, 37, 6026-
- BACKMAN, M., and ROGULSKA, M. (2016). Biomethane use in Sweden. *The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji*, 71(1), 7-20. doi:10.14669/AM/99390
- BAENA-MORENO, F. M., RODRÍGUEZ-GALÁN, M., VEGA, F., VILCHES, L. F., NAVARRETE, B., and ZHANG, Z. (2019). Biogas upgrading by cryogenic techniques. *Environmental Chemistry Letters*, 17(3), 1251-1261. doi:10.1007/s10311-019-00872-2
- BALUSSOU, D. (2018). *An analysis of current and future electricity production from biogas in Germany*. (Ph.D. thesis), Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Retrieved from <http://dx.doi.org/10.5445/IR/1000084909>
- BASU, S., KHAN, A. L., CANO-ODENA, A., LIU, C., and VANKELECOM, I. F. J. (2010). Membrane-based technologies for biogas separations. *Chemical Society Reviews*, 39(2), 750-768. doi:10.1039/B817050A

- BATLLE-VILANOVA, P., PUIG, S., GONZALEZ-OLMOS, R., VILAJELIU-PONS, A., BALAGUER, M. D., and COLPRİM, J. (2015). Deciphering the electron transfer mechanisms for biogas upgrading to biomethane within a mixed culture biocathode. *RSC Advances*, 5(64), 52243-52251. doi:10.1039/C5RA09039C
- BAUER, F., PERSSON, T., HULTEBERG, C., and TAMM, D. (2013). Biogas upgrading – technology overview, comparison and perspectives for the future. 7(5), 499-511. doi:https://doi.org/10.1002/bbb.1423
- BUDZIANOWSKI, W. M., WYLOCK, C. E., and MARCINIAK, P. A. (2017). Power requirements of biogas upgrading by water scrubbing and biomethane compression: Comparative analysis of various plant configurations. *Energy Conversion and Management*, 141, 2-19. doi:10.1016/j.enconman.2016.03.018
- BURMEISTER, F., ERLER, R., GRAF, F., KÖPPEL, W., PETZOLD, S., and SENNER, J. (2009). Stand des DVGW-Forschungsprogramms Biogas. *Energie | wasser-praxis*, , 66–71.
- BURTON, T. (2009). A Review of the Potential of Marine Algae as a Source of Biofuels in Ireland. *Sustainable Energy Ireland, Dublin, Ireland*.
- CARROLL, J. J., SLUPSKY, J. D., and MATHER, A. E. (1991). The Solubility of Carbon Dioxide in Water at Low Pressure. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 20(6), 1201-1209. doi:10.1063/1.555900 %J Journal of Physical and Chemical Reference Data
- CAVENATI, S., GRANDE, C., and RODRIGUES, A. (2005). Upgrade of Methane From Landfill Gas by Pressure Swing Adsorption. *Energy and Fuels - ENERG FUEL*, 19. doi:10.1021/ef050072h
- CHANDRA, R., VIJAY, V. K., SUBBARAO, P. M. V., and KHURA, T. K. (2011). Performance evaluation of a constant speed IC engine on CNG, methane enriched biogas and biogas. *Applied Energy*, 88(11), 3969-3977.
- CLEVER, H. L., and YOUNG, C. L. (1987). *Solubility Data Series, Methane*. . Oxford: Pergamon Press.
- ÇİFTÇİ, B., TUNÇ, N., KARAGÖZ, M., DENİZ, E., ve SARIDEMİR, S. (2017). Bıyogaz saflaştırma işlemlerinde ponza taşı kullanılabilirliğinin deneysel incelenmesi. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi* 6(2), 72-77
- DEMİR, Ö., YILDIZ, M., SERCAN, Ü., ve ARZUM, C. Ş. (2017). Atıksuların geri kazanılması ve yeniden kullanılması. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 2, 1-14.
- EDER, B., and SCHULZ, H. (2006). *Biogas Praxis, Grundlagen-Planung-AnlagenbauBeispiele-Wirtschaftlichkeit*. Staufen bei Freiburg, : Ökobuch Verlag.
- FARZANEH-GORD, M., and BRANCH, S. J. J. T. A. M. S. (2011). Real and ideal gas thermodynamic analysis of single reservoir filling process of natural gas vehicle cylinders. *41*(2), 21-36.
- FARZANEH-GORD, M., DEYMI-DASHTEBAYAZ, M., and RAHBARI, H. R. (2011). Studying effects of storage types on performance of CNG filling stations. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 3(1), 334-340. doi:https://doi.org/10.1016/j.jngse.2011.02.001

- FAVOINO, E. (2002). *Drivers for separate collection in the EU, optimization and cost assessment of high capture schemes*. Paper presented at the Proceedings of EC Conference on Biological Treatment of Biodegradable Waste, Brussels, Belgium.
- GAVIN, T., AND SINNOTT, R. (2013). *Chemical engineering design: principles, practice and economics of plant and process design*. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- GEORGIOU, D., PETROLEKAS, P. D., HATZIXANTHIS, S., and AIVASIDIS, A. (2007). Absorption of carbon dioxide by raw and treated dye-bath effluents. *Journal of hazardous materials*, 144, 369-376. doi:10.1016/j.jhazmat.2006.10.044
- GÜLŞEN, H., YENİGÜN, İ., ÇELİK, NURİ. (2021) Adıyaman İlinin Katı Atık Ve Enerji Potansiyeli Analizi. Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi, 6(özel sayı): 40-48
- HENIS, J. M., and TRIPODI, M. K. (1983). The developing technology of gas separating membranes. *Science*, 220(4592), 11-17. doi:10.1126/science.220.4592.11
- HORN, H., NEWTON, L., and KUNKLE, W. (1997). Ruminant Nutrition from an Environmental Perspective: Factors Affecting Whole-Farm Nutrient Balance. *Journal of animal science*, 74, 3082-3102. doi:10.2527/1996.74123082x
- HOUGHTON, R. (2007). *Emergency characterization of unknown materials*: CRC Press.
<https://turkish.alibaba.com/product-detail/Food-Grade-Sanitary-Vertical-Stainless-Steel-1601001651860.html?spm=a2700.7724857.0.0.2d451904SgEgKO>
<https://turkish.alibaba.com/product-detail/Food-Grade-Sanitary-Vertical-Stainless-Steel-1601001651860.html?spm=a2700.7724857.0.0.2d451904SgEgKO>
- İLKILIÇ, C., ve DEVİREN, H. (2011). Biyogazın Oluşumu ve Biyogazı Saflaştırma Yöntemleri. *Symposium A Quarterly Journal In Modern Foreign Literatures*, 16-18.
- JONSSON, S., and WESTMAN, J. (2011). *Cryogenic Biogas Upgrading Using Plate Heat Exchangers*. (Master's thesis within the Sustainable Energy Systems Master's Programme), Chalmers University of Technology, , Goteborg, Sweden.
- KADAM, R., and PANWAR, N. L. (2017). Recent advancement in biogas enrichment and its applications. *J. Renewable Sustainable Energy Reviews*, 73, 892-903.
- KAO, C.-Y., CHIU, S.-Y., HUANG, T.-T., DAI, L., HSU, L.-K., and LIN, C.-S. (2012). Ability of a mutant strain of the microalga *Chlorella* sp. to capture carbon dioxide for biogas upgrading. *Applied Energy*, 93. doi:10.1016/j.apenergy.2011.12.082
- KAPDI, S. S., VIJAY, V. K., RAJESH, S. K., and PRASAD, R. (2005). Biogas scrubbing, compression and storage: perspective and prospectus in Indian context. *Renewable Energy*, 30(8), 1195-1202.
- KESTIN, J., SOKOLOV, M., WAKEHAM, W. A. J. J. O. P., and DATA, C. R. (1978). Viscosity of Liquid Water in the Range - 8 C to 150 C. 7, 941-948.
- KHAN, U. M., LEE, J. T. E., BASHIR, M. A., DISSANAYAKE, P. D., OK, Y. S., TONG, Y. W., SHARIATI, M. A., WU, S., AHRING, B. G. (2021) Current status of biogas upgrading for direct biomethane use: A review. *Renewable and*

- Sustainable Energy Reviews, 149(111343), 1321-1364
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111343>
- KIM, S., KİM, H.-T., and CHOİ, B.C. (2004). Optimization of CO₂ Absorption Process with MEA Solution. *Studies in Surface Science and Catalysis - STUD SURF SCI CATAL*, 153, 429-434. doi:10.1016/S0167-2991(04)80291-X
- KİTİŞ, Y. E. (2009). *Çukurova bölgesi turuncgil bahçelerinde canlı ve cansız malç uygulamalarının entegre yabancı ot kontrolü açısından değerlendirilmesi*. (Doktora Tezi), Çukurova Üniversitesi, Adana.
- KRICH K, A. D., BATMALE J., BENEMANN J., RUTLEDGE B., and SALOUR D. (2005). Chapter 3: Upgrading Dairy Biogas to Biomethane and Other Fuels. Biomethane from Dairy Waste A Sourceb Prod Use Renew Nat Gas Calif Clear Concepts 1, 7-21.
- KRICH, K., AUGENSTEIN, D., BATMALE, J. P., BENEMANN, J., RUTLEDGE, B., and SALOUR, D. (2005). Biomethane from dairy waste. *A Sourcebook for the Production and Use of Renewable Natural Gas in California: Kathleen Reuter*.
- KUGLARZ, M., and MROWIEC, B. (2009). Co-digestion of municipal biowaste and sewage sludge for biogas production.
- KURTKULAK, H. (2014). *Kentsel atıksuların geri kazanımı ve yeşil alanların sulanmasında yeniden kullanımı: Konya kenti örneği*. . (Yüksek Lisans Tezi), Selçuk Üniversitesi, Konya.
- LAI, Z., BONILLA, G., DIAZ, I., NERY, J., SUJAOTI, K., AMAT, M., .and VLACHOS, D. (2003). Microstructural Optimization of a Zeolite Membrane for Organic Vapor Separation. *Science (New York, N.Y.)*, 300, 456-460.
- LÄNTELÄ, J., RASI, S., LEHTINEN, J., and RINTALA, J. (2012). Landfill gas upgrading with pilot-scale water scrubber: Performance assessment with absorption water recycling. *Applied Energy*, 92, 307-314. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.10.011>
- LIM, C., KIM, D., SONG, C., KIM, J., HAN, J., and CHA, J.-S. (2015). Performance and emission characteristics of a vehicle fueled with enriched biogas and natural gases. *Applied Energy*, 139, 17-29.
- LIN, S. H., and SHYU, C. T. (1999). Performance characteristics and modeling of carbon dioxide absorption by amines in a packed column. 19, 255-262. doi:10.1016/s0956-053x(99)00135-x
- MATHAI, R., MALHOTRA, R. K., SUBRAMANIAN, K. A., and DAS, L. M. (2012). Comparative evaluation of performance, emission, lubricant and deposit characteristics of spark ignition engine fueled with CNG and 18% hydrogen-CNG. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(8), 6893-6900.
- MENGÜ, G. P., ve AKKUZU, E. (2008). Küresel su krizi ve su hasadı teknikleri. [Global Water Crisis and Water Harvesting Techniques]. *Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 5(2), 75-85.
- MERKEL, T. C., FREEMAN, B. D., SPONTAK, R. J., HE, Z., PINNAU, I., MEAKIN, P., and HILL, A. J. (2002). Ultraparmerable, reverse-selective nanocomposite membranes. *Science*, 296(5567), 519-522. doi:10.1126/science.1069580
- MOLINO, A., MIGLIORI, M., DING, Y., BIKSON, B., GIORDANO, G., and BRACCIO, G. (2013). Biogas upgrading via membrane process: Modelling of

- pilot plant scale and the end uses for the grid injection. *Fuel*, 107, 585-592. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.10.058>
- MURPHY, J., BRAUN, R., WEILAND, P., and WELLINGER, A. (2011). *Biogas from crop digestion*. Paper presented at the IEA bioenergy task.
- NIE, H., JIANG, H., CHONG, D., WU, Q., XU, C., and ZHOU, H. (2013). Comparison of Water Scrubbing and Propylene Carbonate Absorption for Biogas Upgrading Process. *Energy and Fuels*, 27, 3239–3245. doi:10.1021/ef400233w
- OFORI-BOATENG, C., and KWOFIE, E. (2009). Water Scrubbing: A Better Option for Biogas Purification for Effective Storage. *World Appl. Sci. J.*, 5.
- OSORIO, F., and TORRES, J. C. (2009). Biogas purification from anaerobic digestion in a wastewater treatment plant for biofuel production. *Renewable Energy*, 34(10), 2164-2171. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.02.023>
- PATTERSON, T., ESTEVES, S., DINSDALE, R., and GUWY, A. (2011). An evaluation of the policy and techno-economic factors affecting the potential for biogas upgrading for transport fuel use in the UK. *Energy Policy*, 39, 1806-1816. doi:10.1016/j.enpol.2011.01.017
- PERSSON, M., JONSSON, O., and WELLINGER, A. (2007). Biogas upgrading to vehicle fuel standards and grid. *IEA Bioenerg*, 1–32.
- PETERSSON, A., and WELLINGER, A. (2009). Biogas Upgrading Technologies – Developments and Innovations. *IEA Bioenergy Task 37-Energy From Biogas and Landfill Gas*, 37.
- PETRONELA, C., GHINEA, C., MAMALIGA, I., WUKOVITS, W., FRIEDL, A., and GAVRILESCU, M. (2013). Environmental Impact Assessment of High Pressure Water Scrubbing Biogas Upgrading Technology. *CLEAN - Soil Air Water*, 41. doi:10.1002/clen.201200303
- PETRONELA, C., WUKOVITS, W., MAMALIGA, I., FRIEDL, A., and GAVRILESCU, M. (2013). Analysis and modelling of the solubility of biogas components in water for physical absorption processes. *Environmental Engineering and Management Journal*, 12, 147-162. doi:10.30638/eemj.2013.017
- PETRONELA, C., WUKOVITS, W., MAMALIGA, I., FRIEDL, A., and GAVRILESCU, M. (2014). Modeling and simulation of high pressure water scrubbing technology applied for biogas upgrading. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17. doi:10.1007/s10098-014-0787-7
- RETTICH, T. R., HANDA, Y. P., BATTINO, R., and WILHELM, E. J. T. J. O. P. C. (1981). Solubility of Gases in Liquids. 13. High-Precision Determination of Henry's Constants for Methane and Ethane in Liquid Water at 275 to 328 K. 85, 3230-3237.
- RICHARDSON, J. F., HARKER, J. H., BACKHURST, J. R., and COULSON, J. M. (2002). *Coulson and Richardson's chemical engineering. Vol. 2, Particle technology and separation processes*. In.
- RULKENS, W. (2008). Sewage Sludge as a Biomass Resource for the Production of Energy: Overview and Assessment of the Various Options. *Energy and Fuels*, 22(1), 9-15. doi:10.1021/ef700267m
- RUTZ, D., JANSSEN, R., HOFFSTEDE, U., BEIL, M., HAHN, H., KULISIC, B., and PAWLAK, P. (2011). *Organic waste for biogas production in urban areas*.

- Proceedings of 19th European Biomass Conference and Exhibition, Berlin, Germany, 2125–2131, DOI: 10.5071/19thEUBCE2011-VP3.4.27.*
- RYAN, F., and CAULFIELD, B. (2010). Examining the benefits of using bio-CNG in urban bus operations. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 15(6), 362-365. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trd.2010.04.002>
- RYCKEBOSCH, E., DROUILLON, M., and VERVAEREN, H. (2011). Techniques for transformation of biogas to biomethane. *Biomass and Bioenergy*, 35(5), 1633-1645. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.033>
- SCHOLZ, M., MELIN, T., and WESSLING, M. (2013). Transforming biogas into biomethane using membrane technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 17, 199-212. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.08.009>
- SHAO, P., DAL-CIN, M., KUMAR, A., LI, H., and SINGH, D. (2012). Design and economics of a hybrid membrane–temperature swing adsorption process for upgrading biogas. *Journal of Membrane Science*, 413–414, 17–28. doi:10.1016/j.memsci.2012.02.040
- SMITH, S. R. (2009). Organic contaminants in sewage sludge (biosolids) and their significance for agricultural recycling. *A Philosophical Transactions of Royal Society A*, 367(1904), 4005-4041. doi:10.1098/rsta.2009.0154
- STEFFEN, R., SZOLAR, O., and BRAUN, R. J. I. O. A. T., University of Agricultural Sciences, Vienna. (1998). Feedstocks for anaerobic digestion.
- STREVETT, K. A., VIETH, R. F., GRASSO, D. J. T. C. E. J., and JOURNAL, T. B. E. (1995). Chemo-autotrophic biogas purification for methane enrichment: mechanism and kinetics. 58, 71-79.
- SUBRAMANIAN, K. A., MATHAD, V. C., VIJAY, V. K., and SUBBARAO, P. M. V. (2013). Comparative evaluation of emission and fuel economy of an automotive spark ignition vehicle fuelled with methane enriched biogas and CNG using chassis dynamometer. *Applied Energy*, 105, 17-29.
- THRÄN, D., BILLIG, E., PERSSON, T., SVENSSON, M., DANIELGROMKE, J., PONITKA, J., SEIFFERT, M., and BALDWIN, J. (2014). Biomethane status and factors affecting market development and trade. IEA Task 40 and Task 37 Joint Study. *IEA Bioenergy*
- TIPPAYAWONG, N., and THANOMPONGCHART, P. (2010). Biogas quality upgrade by simultaneous removal of CO₂ and H₂S in a packed column reactor. *Energy*, 35(12), 4531-4535. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.04.014>
- ULLAH KHAN, I., HAFIZ DZARFAN OTHMAN, M., HASHIM, H., MATSUURA, T., ISMAIL, A. F., REZAEI-DASHTARZHANDI, M., and WAN AZELEE, I. (2017). Biogas as a renewable energy fuel – A review of biogas upgrading, utilisation and storage. *Energy Conversion and Management*, 150, 277-294. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.035>
- VANNINI, C., MUNZ, G., MORI, G., LUBELLO, C., VERNI, F., and PETRONI, G. (2008). Sulphide oxidation to elemental sulphur in a membrane bioreactor: Performance and characterization of the selected microbial sulphur-oxidizing community. *Systematic and applied microbiology*, 31, 461-473. doi:10.1016/j.syapm.2008.07.003
- VIJAY, V. K., CHANDRA, R., SUBBARAO, P. M., and KAPDI, S. S. (2006). *Biogas purification and bottling into CNG cylinders: producing Bio-CNG from biomass for rural automotive applications*. Paper presented at the The 2nd Joint International Conference on “Sustainable Energy and Environment.

- VIJAY, V. K., KAPOOR, R., TRIVEDI, A., and NARALE, P. (2015). Biogas Upgrading and Bottling Technology for Vehicular and Cooking Applications. In N. J. Raju, W. Gossel, and M. Sudhakar (Eds.), *Management of Natural Resources in a Changing Environment* (pp. 135-153). Cham: Springer International Publishing.
- WEILAND, P. (2010). Biogas production: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(4), 849-860. doi:10.1007/s00253-009-2246-7
- WEISS, R. F. (1974). Carbon dioxide in water and seawater: the solubility of a non-ideal gas. *J. Marine Chemistry*, 2, 203-215.
- WELLINGER, A. (2009). Algal biomass. Does it save the World? Short Reflections. *IEABioenergy Task Publication*, 37.
- WELLINGER, A., MURPHY, J., and BAXTER, D. (2013). In: Hughes, S. (Ed.), *The Biogas Handbook: Science, Production and Application*. Woodhead Publishing Series in Energy. Philadelphia, PA.: Woodhead Publishing, .
- WILHELM, E., BATTINO, R., and WILCOCK, R. (1977). Low-Pressure Solubility of Gases in Liquid Water. *Chemical Reviews - CHEM REV*, 77. doi:10.1021/cr60306a003
- WILLMES, A. (2007). *Taschenbuch Chemische Substanzen* (3rd edition ed.). Frankfurt am Main: Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch GmbH.
- XIAO, Y., YUAN, H., PANG, Y., SHULIN, C., ZHU, B., ZOU, D., and LI, X. (2014). CO₂ Removal from Biogas by Water Washing System. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 22. doi:10.1016/j.cjche.2014.06.001
- Yebo Li, Samir Kumar Khanal (2016). Bioenergy: Principles and Application 338-359
- ZAFAR, S. (2008). Anaerobic Digestion of Biomass.
- ZHANG, R., EL-MASHAD, H. M., HARTMAN, K., WANG, F., LIU, G., CHOATE, C., and GAMBLE, P. (2007). Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion. *Bioresour Technol*, 98(4), 929-935. doi:10.1016/j.biortech.2006.02.039
- ZHAO, Q., LEONHARDT, E., MACCONNELL, C., FREAR, C., and CHEN, S. (2010). Purification Technologies for Biogas Generated by Anaerobic Digestion. CSANR Research Report 2010-001. Climate Friendly Farming. Chapter 9. *Compressed Biomethane*, 1-24.