



T.C.

**ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**JEOTERMAL ELEKTRİK ÜRETİMİNDE HİDROJEN SÜLFÜRÜN FENTON
REAKTİFİ KULLANILARAK UZAKLAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BEKİR SİDDİK KOÇUŞAĞI

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. HASAN ARSLANOĞLU

ÇANAKKALE – 2025



T.C.

ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**JEOTERMAL ELEKTRİK ÜRETİMİNDE HİDROJEN SÜLFÜRÜN FENTON
REAKTİFİ KULLANILARAK UZAKLAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BEKİR SİDDİK KOÇUŞAĞI

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. HASAN ARSLANOĞLU

ÇANAKKALE – 2025



T.C.

ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



Bekir Sıddık KOÇUŞAĞI tarafından Doç. Dr. Hasan ARSLANOĞLU yönetiminde hazırlanan ve **30/01/2025** tarihinde aşağıdaki jüri karşısında sunulan “**Jeotermal Elektrik Üretiminde Hidrojen Sülfürün Fenton Reaktifi Kullanılarak Uzaklaştırılması**” başlıklı çalışma, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü **Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı**’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Doç. Dr. Hasan ARSLANOĞLU (Danışman)

.....

Doç. Dr. Ercan AYDOĞMUŞ

.....

Dr. Öğr. Üyesi Hanife ERDEN

.....

Tez No : 10604534

Tez Savunma Tarihi : 30/01/2025

Doç. Dr. Melis ULU DOĞRU

Enstitü Müdürü

.../.../2025

ETİK BEYAN

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi taahhüt ve beyan ederim.

Bekir Sıddık KOÇUŞAĞI

30/01/2025

TEŞEKKÜR

Bu tezin gerçekleştirilmesinde, çalışmam boyunca benden bir an olsun yardımlarını esirgemeyen saygı değer danışman hocam Doç. Dr. Hasan ARSLANOğLU ve çalışma süresince tüm zorlukları benimle göğüsleyen, hayatımın her evresinde bana destek olan değerli aileme ve sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Bekir Sıddık KOUŐAęI
anakkale, Ocak 2025



ÖZET

JEOTERMAL ELEKTRİK ÜRETİMİNDE HİDROJEN SÜLFÜRÜN FENTON REAKTİFİ KULLANILARAK UZAKLAŞTIRILMASI

BEKİR SİDDİK KOÇUŞAĞI

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Kimya Anabilim Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Hasan Arslanoğlu

30/01/2025, 55

Jeotermal elektrik üretimi sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak ilgi görmektedir; ancak bu süreç hidrojen sülfür (H_2S) gibi zararlı gazların salınmasına yol açabilir. H_2S , çevre ve insan sağlığı için tehlikeli olabilen bir gazdır. Bu nedenle, jeotermal enerji santrallerinde H_2S 'nin etkili bir şekilde uzaklaştırılması kritik öneme sahiptir. Fenton reaktifi bu amaç için kullanılan etkili bir yöntemdir ve hidrojen peroksit ve demir tuzları (Fe^{2+}) kullanarak hidroksil radikalleri üretir. Bu radikaller H_2S 'yi daha az zararlı bileşiklere oksitleyerek gazın çevreye verdiği zararı en aza indirir. Fenton reaktifi işlemi, bir demir katalizörünün varlığında hidrojen peroksidin güçlü oksidanlar olan hidroksil radikallerine ayrışmasıyla başlar. Bu radikaller H_2S ile reaksiyona girerek gazı daha zararsız bileşiklere dönüştürür. Bu yöntem, yüksek verimli H_2S uzaklaştırma kapasitesi sunduğu ve çevre dostu olduğu için tercih edilmektedir. Ancak, sürecin verimliliğini artırmak için optimizasyon çalışmaları gerekmektedir. Özellikle demir çamuru gibi yan ürünlerin yönetimi vurgulanmalıdır. Fenton'un reaktifi, jeotermal elektrik üretim süreçlerinde H_2S emisyonlarını azaltarak çevresel etkileri en aza indirir ve enerji üretimini daha sürdürülebilir hale getirmeye katkıda bulunur. Bu teknolojinin daha geniş bir şekilde uygulanması çevresel sürdürülebilirliği artıracaktır.

Anahtar Kelimeler: Jeotermal Enerji, Elektrik Üretimi, Fenton, Hidrojen Sülfür
Giderimi



ABSTRACT

REMOVAL OF HYDROGEN SULFIDE USING FENTON REAGENT IN GEOTHERMAL ELECTRICITY GENERATION

BEKİR SİDDİK KOÇUŞAĞI

Çanakkale Onsekiz Mart University

School of Graduate Studies

Master of Science Thesis in Chemical Engineering Science

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Hasan Arslanoğlu

30/01/2025, 55

Geothermal electricity production is gaining attention as a sustainable energy source; however, this process can lead to the release of harmful gases such as hydrogen sulfide (H₂S). H₂S is a gas that can be dangerous to the environment and human health. Therefore, effective removal of H₂S in geothermal power plants is of critical importance. Fenton's reagent is an effective method used for this purpose and produces hydroxyl radicals using hydrogen peroxide and iron salts (Fe²⁺). These radicals oxidize H₂S to less harmful compounds, thus minimizing the environmental damage of the gas. The Fenton reagent process begins with the decomposition of hydrogen peroxide into hydroxyl radicals, which are strong oxidants, in the presence of an iron catalyst. These radicals react with H₂S and convert the gas into more harmless compounds. This method is preferred because it offers high efficiency H₂S removal capacity and is environmentally friendly. However, optimization studies are required to increase the efficiency of the process. In particular, the management of by-products, such as iron sludge, should be emphasized. Fenton's reagent minimizes environmental impacts by reducing H₂S emissions in geothermal electricity production processes and contributes to making energy production more sustainable. The wider application of this technology will increase environmental sustainability.

Keywords: Geothermal Energy, Electricity Generation, Fenton, Hydrogen Sulfide
Removal



İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
JÜRİ ONAY SAYFASI.....	i
ETİK BEYAN.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	x
TABLolar DİZİNİ.....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii

BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

1.1. Enerji Kaynakları.....	3
1.2. Jeotermal Enerji ve Önemi.....	4
1.3. Jeotermal Akışkanlarda Bulunan Gazlar (NCG).....	7
1.4. NCG Gazlarının Rezervuar Açısından Önemi.....	9
1.5. Fenton Reaktifi ve Hidrojen Sülfür Giderimi.....	10
1.6. H ₂ S Eliminasyon Yöntemleri.....	11
1.6.1. Alkanolamin Prosesi.....	12
1.6.2. Kimyasal Sülfid Oksidasyonu.....	15
1.6.3. H ₂ S'in Hipoklorit ile Oksidasyonu.....	18
1.6.4. Hidrojen Sülfürün Adsorpsiyon ile Uzaklaştırılması.....	20
1.6.5. Demiş Talaş Filtrasyon Yöntemi.....	22
1.6.6. Fenton Reaktifi ve Hidrojen Sülfür Giderimi.....	22

İKİNCİ BÖLÜM

ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

24

2.1. H ₂ S'in Giderilmesine Yönelik Yapılan Çalışmalar.....	24
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM	
MATERYAL YÖNTEM	
3.1. Materyal.....	28
3.1.1. Kullanılan Ekipman ve Özellikleri.....	28
3.2. Yöntem.....	32
3.2.1. Eliminasyon Prosesi.....	32
3.2.2. Alkanolamin Prosesi.....	36
3.2.3. Fenton Prosesi.....	36
DÖRDÜNCÜ BÖLÜM	
ARAŞTIRMA BULGULARI	
4.1. Alkanolamin Prosesi İçin Sonuçlar.....	37
4.2. Fenton Prosesi Sonuçları.....	40
4.3. Endüstriyel Boyuttaki Eliminasyon Sonuçları.....	43
BEŞİNCİ BÖLÜM	
SONUÇ ve ÖNERİLER	
KAYNAKÇA	47

SİMGELER VE KISALTMALAR

%	Yüzde oranı
ULO	Geri Dönüştürülmüş Madeni Yağlar
MJ	Megajoule
Kg	Kilogram
AB	Avrupa Birliği
°C	Santigrat
FT	Fischer-tropsch
m	Metre
Pa	Pascal
s	Saniye
μ	Viskozite
RSM	Yanıt Yüzey Metodolojisi
mm	Milimetre
mg	Miligram
g	Gram
mL	Mililitre
mm ²	Milimetre Kare
cSt	Santistokes
TUBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
NCG	Yoğuşmayan Gazlar
MW	Megawatt
GWh	Gigawatt-saat
DSÖ	Dünya Sağlık Örgütü
SOB	sülfat oksitleyen bakterile
MEA	monoetanol amin
DEA	dietanol amin
DIPA	di-izopropanol amin
MDEA	Nmetil dietanol amin

TABLULAR DİZİNİ

Tablo No	Tablo Adı	Sayfa No
Tablo 1	Dünya Geneline Jeotermal Enerji Üretim Kapasitesi.	7
Tablo 2	Türkiye'deki jeotermal santrallerde açığa çıkan NCG miktarları	8
Tablo 3	Alkanolamin ile asit gazlarının giderilmesi	14
Tablo 4	Kimyasal oksidasyon ajanları.	18
Tablo 5	Tez çalışmasında kullanılan ekipmanlar.	28
Tablo 6	Kullanılan ekipmanlar ve özellikleri.	32
Tablo 7	Elementel analiz sonuçları.	41

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Şekil Adı	Sayfa No
Şekil 1	Enerji Kaynakları	4
Şekil 2	Türkiye’de jeotermal enerjinin önemi	6
Şekil 3	UV ışını ve ozon ile birlikte H ₂ S’in oksidasyonu	17
Şekil 4	Genel gazın arıtılmasında kullanılan proses	19
Şekil 5	Aktif karbon ile gazın arıtılması	21
Şekil 6	İmalat süreci	30
Şekil 7	Tesis içerisinde ekipmanlara ait görseller.	31
Şekil 8	Fenton prosesinin önden görünümü	33
Şekil 9	Fenton prosesinin arkadan görünümü	34
Şekil 10	Fenton prosesinin üstten görünümü	34
Şekil 11	Fenton prosesinin sağdan görünümü	35
Şekil 12	Fenton prosesinin soldan görünümü	35
Şekil 13	Çözelti pH’sına bağlı H ₂ S ve CO ₂ konsantrasyonu.	38
Şekil 14	Filtre kağıdında kalan malzeme.	41
Şekil 15	XRF analiz sonucu.	43
Şekil 16	Fenton prosesi 2. Deneme sonuçları.	44

BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

Jeotermal enerji, dünya genelinde temiz ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelik artan talep nedeniyle önemli bir enerji üretim yöntemi haline gelmiştir. Yeryüzünün derinliklerinden gelen doğal ısının kullanımıyla elektrik üreten jeotermal santraller, fosil yakıtlara kıyasla çok daha düşük karbon salımı sağlamaktadır. Bu özelliği sayesinde jeotermal enerji, enerji güvenliğine katkıda bulunurken çevresel sürdürülebilirliği de destekleyen önemli bir alternatif olarak kabul edilir. Birçok ülke, enerji üretiminde yenilenebilir kaynakların payını artırmak için jeotermal enerjiyi stratejik bir kaynak olarak değerlendirmektedir.

Jeotermal enerji üretimi sırasında, yer altından çıkarılan sıcak su ve buharın yanında bazı doğal gazlar da açığa çıkar. Bu gazlar, Yoğuşmayan Gazlar (NCG) olarak adlandırılan, yoğuşmayan bileşiklerdir. NCG, jeotermal akışkanın bir parçası olarak yer altından çıkar ve jeotermal santrallerdeki buhar çevriminde gaz fazında kalır. Bu gazlar arasında en yaygın olanları karbondioksit (CO_2), hidrojen sülfür (H_2S), azot (N_2), metan (CH_4) ve bazı eser miktarda bulunan diğer gazlardır. Jeotermal kaynakların kimyasal bileşimine bağlı olarak bu gazların oranları değişiklik gösterebilir. Ancak, genellikle NCG'nin büyük bir kısmı karbondioksit (%95-98) iken, hidrojen sülfür oranı daha düşük olup %1-3 arasında değişmektedir.

Jeotermal santrallerde NCG yönetimi, santralin verimliliğini ve çevresel performansını etkileyen önemli faktörlerden biridir. NCG, buharın enerji üretiminde kullanıldığı süreçte yoğuşmadan atmosfere karışan gazlar olarak bilinir ve enerji dönüşüm verimliliğini etkileyebilir. Bu gazların etkin bir şekilde yönetilmesi, santralin operasyonel performansını optimize etmek ve enerji üretim sürecini daha verimli hale getirmek açısından kritik öneme sahiptir. Hidrojen sülfür (H_2S), jeotermal sahalardan çıkan doğal bir bileşendir. Çürük yumurta kokusuyla bilinen H_2S , bazı durumlarda kontrollü şekilde uzaklaştırılmalıdır. Bu gazın çevreye yayılmasını önlemek ve endüstriyel verimliliği

artırmak amacıyla çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Özellikle ileri oksidasyon yöntemleri, bu süreçlerin optimize edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Fenton reaktifi ile gaz halindeki hidrojen sülfürün uzaklaştırılması, su arıtımında yaygın olarak kullanılan bir sürecin gaz fazına uygulanması açısından yeni bir yaklaşımdır. Fenton reaktifi, hidrojen peroksit (H_2O_2) ve demir iyonları (Fe^{2+}) kullanarak güçlü oksidatif reaksiyonlar başlatır ve H_2S 'in zararsız bileşiklere dönüştürülmesini sağlar. Fenton reaksiyonu sırasında oluşan hidroksil radikalleri ($OH\cdot$), H_2S molekülleri ile reaksiyona girerek, sülfat (SO_4^{2-}) gibi zararsız ürünlere dönüşmesini sağlar. Bu süreç, düşük pH değerlerinde çalışmasıyla bilinir ve özellikle su bazlı arıtma işlemlerinde yaygın olarak uygulanmıştır. Ancak, gaz fazındaki H_2S 'in Fenton reaktifi ile giderilmesi üzerine yapılan çalışmalar sınırlıdır ve bu alanda yapılan araştırmalar, önemli bir bilgi boşluğunu doldurmayı amaçlamaktadır.

Bu tez çalışmasında, Fenton reaktifi kullanılarak jeotermal enerji santrallerinde ortaya çıkan hidrojen sülfürün uzaklaştırılması ele alınmış ve bu sürecin etkili olup olmadığını belirlemek için çeşitli parametreler incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, H_2S 'in Fenton reaksiyonu yoluyla etkin bir şekilde oksitlenerek zararsız ürünlere dönüşüp dönüşmediğini değerlendirmektir. Bunun yanı sıra, pH, H_2O_2/Fe^{2+} oranı, sıcaklık gibi parametrelerin süreç üzerindeki etkileri de ayrıntılı olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında saha çalışmalarında ölçekli deneysel bir düzenek geliştirilmiş ve bu düzenek üzerinde çeşitli deneyler yürütülmüştür. Yapılan deneysel çalışmalarla, Fenton reaksiyonunun etkinliği test edilmiş ve bu sürecin verimliliğini artırmak için optimum koşullar belirlenmiştir. Çalışma daha sonra endüstriyel boyutlarda gerçekleştirilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

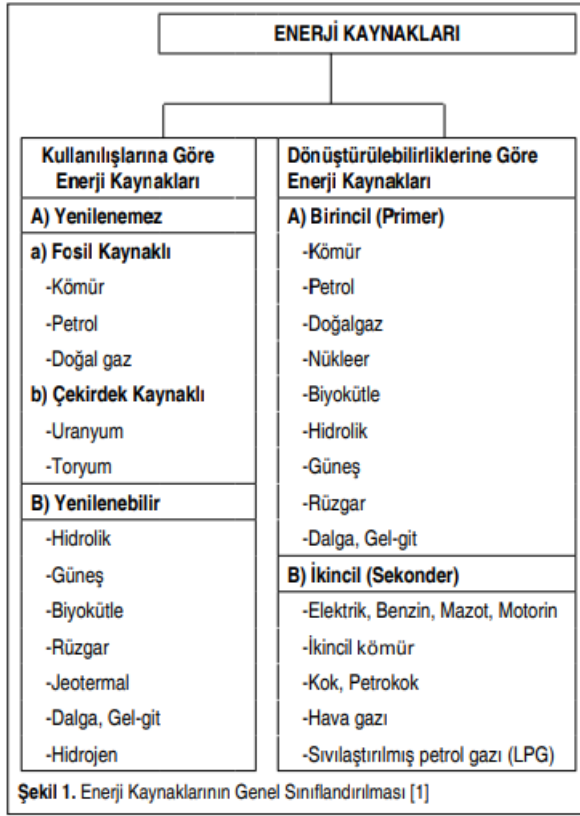
Çevresel mühendislik açısından bakıldığında, gaz halindeki H_2S 'in Fenton reaktifi ile uzaklaştırılması, endüstriyel süreçlerin sürdürülebilirliğini artıracak önemli bir yenilik olarak kabul edilebilir. Ayrıca, Fenton reaktifinin gaz arıtma sistemlerinde uygulanabilirliği ve endüstriyel ölçekli kullanımı açısından daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu

çalışmanın temel motivasyonu, bu bilgi boşluğunu doldurmak ve endüstriyel gaz arıtma teknolojilerine yeni bir bakış açısı getirmektir.

Son olarak, bu çalışmanın sonuçlarının, hidrojen sülfür gibi gazların uzaklaştırılmasında gelecekte uygulanabilecek çevre dostu ve ekonomik çözümler geliştirilmesine katkıda bulunması beklenmektedir. Aynı zamanda, Fenton reaksiyonunun gaz fazındaki kirleticiler üzerindeki etkileri hakkında literatüre yeni bilgiler sunulacak ve bu yöntem, daha büyük ölçekli uygulamalar için potansiyel bir alternatif olarak değerlendirilecektir.

1.1. Enerji Kaynakları

Günümüzde artan kentleşme ve nüfusa bağlı olarak enerjiye olan talepte artmıştır. Artan enerji talebi ise sürdürülebilir ve sürdürülemez enerji kaynaklarından temin edilmektedir. Temel olarak enerji kaynakları kullanım alanlarına göre enerji kaynakları ve dönüştürülebilirliklerine göre enerji kaynakları olmak üzere iki ayrılmaktadır. Şekil 1’de enerji kaynaklarının sınıflandırılmasında da görüldüğü üzere kullanım alanına göre enerji kaynakları yenilebilir ve yenilemez enerji kaynakları olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Enerji kaynağının dönüşüme uğramamış haline birincil enerji kaynağı, dönüşüme uğramış haline ise ikincil enerji kaynağı denmektedir (Koç ve Kaya, 2015). Dünyadaki enerji kaynaklarının %90’nı fosil enerji kaynaklarından oluşmaktadır (Arslan, vd., 2001).



Şekil 1. Enerji Kaynakları (“Koç ve Şenel, 2013”).

1.2. Jeotermal Enerji Ve Önemi

Jeotermal enerji, yer kabuğunun derinliklerinde biriken ısıdan elde edilen yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Bu enerji kaynağı, volkanik aktivite, sıcak su kaynakları ve yeraltındaki magmatik faaliyetlerden oluşan doğal süreçlerle meydana gelir. Dünyanın yüzeyine yakın sıcak kayalar ve buharlaşan su, jeotermal enerjinin temel kaynağıdır ve bu ısıyı kullanarak enerji elde edilmesi mümkün hale gelir. Jeotermal enerji, sürdürülebilir, yenilenebilir ve çevre dostu bir enerji kaynağı olması nedeniyle son yıllarda büyük bir önem kazanmıştır.

Jeotermal enerji santralleri, bu doğal ısıyı kullanarak elektrik üretir ve bu süreç, geleneksel fosil yakıtlı santrallere kıyasla çok daha düşük seviyelerde karbon salınımı gerçekleştirir. Fosil yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan karbondioksit (CO₂) ve diğer zararlı emisyonlar, çevresel tahribatın ve küresel ısınmanın başlıca nedenlerinden biridir.

Ancak jeotermal enerji santralleri, çok daha temiz bir enerji üretim süreci sunar ve bu sayede karbondioksit salınımı büyük ölçüde azaltılır.

Jeotermal enerji, kömür, petrol, doğal gaz ve nükleer enerji gibi sürdürülemez kaynaklara kıyasla rüzgar, güneş enerjisi gibi sürdürülebilir ve tükenmez bir enerji kaynağıdır (Canik vd., 2000). Bütün bunlara ek olarak jeotermal enerji aynı zamanda çevre dostu olması ile de büyük önem arz etmektedir. Diğer enerji türleri ile kıyaslandığında jeotermal enerji uygun maliyetli olması, bu enerji türünü ön plana çıkartmaktadır. Rüzgâr ve güneş enerjisi gibi kaynaklar mevsimsel ve günlük dalgalanmalara maruz kalırken, jeotermal enerji yılın her döneminde kesintisiz enerji sağlayabilir. Bu özellik, jeotermal enerjiyi güvenilir ve istikrarlı bir enerji kaynağı haline getirmektedir.

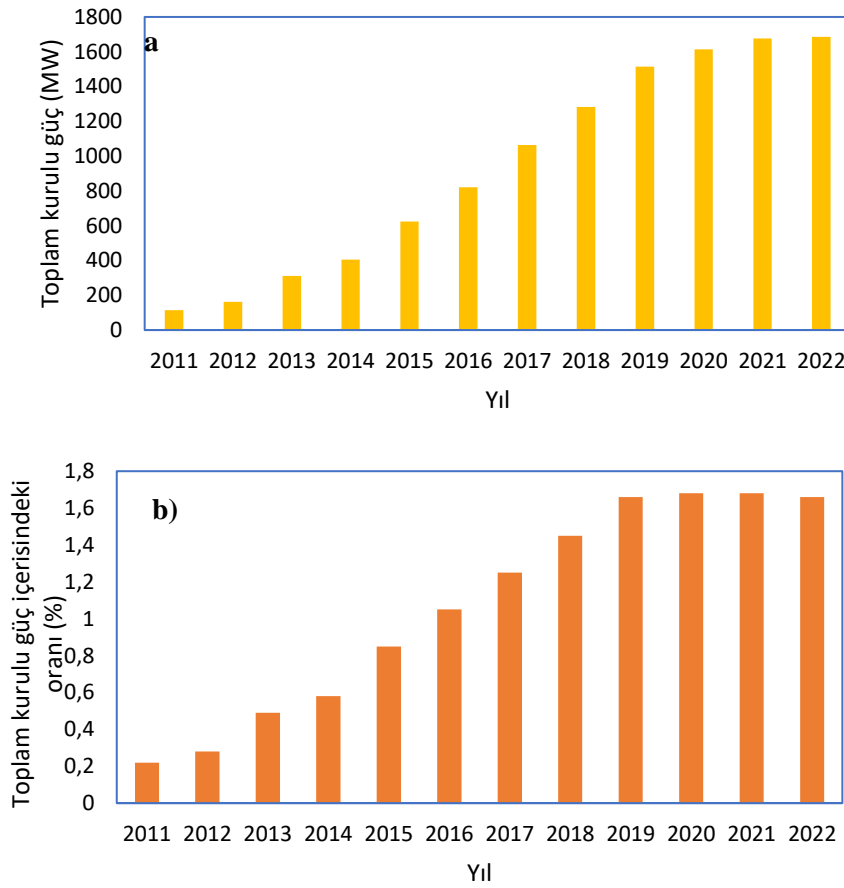
Ayrıca jeotermal enerji, elektrik üretiminin yanı sıra doğrudan ısıtma uygulamalarında da kullanılır. Seraların ısıtılması, konut ve endüstriyel alanların ısıtılması gibi alanlarda jeotermal enerjinin etkin bir şekilde kullanılması mümkündür. Bu kullanım alanları, enerji maliyetlerini azaltmakta ve fosil yakıt tüketimini minimuma indirerek çevresel sürdürülebilirliği desteklemektedir. Özellikle petrole olan bağımlılığın azaltılması ve yerli enerji kaynağının kullanımının artırılması adına günümüzde de bir çok jeotermal enerji santralleri kurulmuştur.

Jeotermal enerji, Türkiye gibi jeotermal potansiyele sahip ülkeler için büyük bir fırsat sunmaktadır. Türkiye, jeotermal enerji açısından dünyanın en zengin ülkelerinden biri olarak, enerji ithalatını azaltmak ve enerji bağımsızlığını artırmak için bu kaynağı etkin bir şekilde kullanmaktadır. Türkiye'nin Ege Bölgesi'nde yer alan jeotermal sahalar, ülkenin enerji ihtiyacının önemli bir kısmını karşılamakta ve enerji güvenliği için stratejik bir rol oynamaktadır.

Sonuç olarak, jeotermal enerji, temiz, yenilenebilir ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak dünya enerji piyasasında giderek daha önemli hale gelmektedir. Hem çevresel hem de ekonomik avantajları göz önüne alındığında, jeotermal enerjinin kullanımı, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak ve iklim değişikliği ile mücadele etmek için kritik

bir çözüm sunmaktadır. Jeotermal enerjiye yapılan yatırımların artması, daha temiz ve yeşil bir enerji geleceğinin inşasında önemli bir rol oynayacaktır.

Türkiye’de jeotermal enerji kaynakları 2011 yılından bu yana artmıştır. Türkiye 2020 yılında 1613 MW toplam kurulu gücüne sahipken 2022 yılında %5 artarak 1686 MW’a ulaşmıştır. Şekil 2.a’da görüldüğü üzere 2011 yılından bu yana jeotermal kurulu gücü artmıştır. Buna karşın Türkiye’deki jeotermal enerjinin durumu, toplam kurulu güç içerisindeki yüzdesi de artmıştır (bkz. Şekil 2.b).



Şekil 2. Türkiye’de jeotermal enerjinin önemi [a) Jeotermal santrallerin toplam kurulu gücü (MW); b) Jeotermal santrallerin toplam kurulu güç içerisindeki oranı] (ETKB, 2022).

Tablo 1’de dünya genelinde jeotermal enerji ve üretim kapasiteleri verilmiştir.

Tablo 1

Dünya Genelinde Jeotermal Enerji Üretim Kapasitesi (MW, 2023).

Ülke	Jeotermal Enerji Kapasitesi (MW)
ABD	3714
ENDONEZYA	2356
FİLİPİNLER	1973
TÜRKİYE	1910
YENİ ZELANDA	1050
MEKSİKA	962
İTALYA	944
KENYA	863
İZLANDA	755
JAPONYA	603

1.3. Jeotermal Akışkanlarda Bulunan Yoğuşmayan Gazlar (NCG)

Jeotermal akışkanlar, yeraltındaki sıcak su ve buharın yanı sıra çeşitli çözülmüş gazlar içerir. Bu gazlar, jeotermal rezervuarların fiziksel ve kimyasal özelliklerini önemli ölçüde etkileyerek enerji üretim süreçlerini ve çevresel koşulları doğrudan etkiler. Bu gazlar, jeotermal enerji santrallerinde enerji üretimi sırasında yoğuşmaması nedeniyle yoğuşmayan gazlar olarak adlandırılır. Yoğuşmayan gazlar, literatürde NCG (Non-Condensable Gases) olarak bilinir. Jeotermal enerji sistemlerinde en sık karşılaşılan gazlar arasında karbondioksit (CO_2), hidrojen sülfür (H_2S), metan (CH_4) ve hidrojen (H_2) yer alır.

Karbondioksit (CO_2): Jeotermal akışkanlardaki en yaygın gazlardan biridir. Karbondioksit, jeotermal enerji santrallerinin en büyük emisyon kaynağı olarak kabul edilir. Ancak, jeotermal santrallerin karbondioksit salınımı, fosil yakıtlarla çalışan santrallere kıyasla oldukça düşük seviyelerdedir.

Hidrojen Sülfür (H₂S): Jeotermal akışkanlarda, karbondioksitten sonra en çok bulunan gazdır. H₂S, çürük yumurta kokusuna sahip korozif bir gazdır. Genellikle yer altındaki kükürt içeren minerallerin parçalanması sonucu oluşur.

Metan (CH₄): Jeotermal akışkanlarda düşük konsantrasyonlarda bulunan bir diğer gazdır. Doğal gazın ana bileşeni olan metan, organik maddelerin yer altındaki yüksek sıcaklık ve basınç altında parçalanması sonucu oluşur. Metan, jeotermal enerji üretim sürecinde doğrudan enerji üretimi açısından büyük bir etkiye sahip olmasa da bazı durumlarda dikkate alınması gereken bir gazdır.

Hidrojen (H₂): Hidrojen, jeotermal akışkanlarda düşük konsantrasyonlarda bulunur. Enerji üretim sürecinde önemli bir rol oynamaz, ancak hidrojen varlığı, jeotermal rezervuarların fiziksel ve kimyasal davranışları hakkında bilgi verebilir.

Bu gazlar, jeotermal enerji üretiminde hem avantajlar hem de zorluklar sunar. Karbondioksit ve hidrojen sülfür gibi gazlar, enerji üretimi sırasında çevreye salındığında belirli riskler taşısa da modern teknoloji bu emisyonları önemli ölçüde kontrol altına alabilmektedir. Jeotermal akışkanlardaki gazların miktarları, rezervuarın derinliği, sıcaklığı ve jeolojik yapısı gibi faktörlere bağlı olarak değişiklik gösterir. Bu nedenle, jeotermal enerji santrallerinin tasarımında ve işletmesinde bu gazların miktarlarının ve özelliklerinin dikkate alınması büyük önem taşır.

Tablo 2’de Türkiye’deki jeotermal santrallerde açığa çıkan NCG gazlarının miktarları verilmiştir.

Tablo 2.

Türkiye’deki jeotermal santrallerde açığa çıkan NCG miktarları (Aksoy, 2014).

Saha	Santralin Adı	Çalışma Gücü, MW	Kaynak Sıcaklığı, °C	NCG Miktarı, kg NCG / kg brine
Kızıldere-Denizli	Kızıldere-I	15	230	0,02-0,044

“Tablo 2’nin devamı”

Salavatlı-Aydın	Dora-I	7,95	170	0,015
Tuzla-Çanakkale	Enda	7,5	165	0,005
Pamukören-Aydın	Çelikler	45,02	170	0,02
Alaşehir-Manisa	Türkerler	24	190	0,034

1.4. NCG Gazlarının Rezervuar Açısından Önemi

Jeotermal santrallerin çevreye saldığı NCG gazlarının birim elektrik üretimine göre kömür santralleriyle karşılaştırıldığında salınan NCG gazları oranı 2-3 kat fazla olduğu belirtilmiştir (Aksoy, 2014). Bu durum göz önüne alındığında çevreci olarak görünen jeotermal santrallerdeki NCG gazlarının bertarafının yada geri kazanımı öneminin dikkate alınması gerektirmektedir. (Aksoy, vd., 2017).

NCG gazları rezervuar için çok önemlidir. Jeotermal çalışma prensibinde basınç farkından faydalanarak buharın yüksek basınçtan yüzeydeki düşük basınçlı ortama kendiliğinden ilerlemesi esas alınır. Bu ilerleme NCG gazlarının akışkanı basınçlandırması ve işletme performansını olumlu etkilemektedir. Zamanla ve dikkatsizlikler sonucunda bu NCG gazlarının azalması basınç farkını azaltmaktadır ve işletme performansı düşmekte ve akabinde devreye sokulacak pompalar işletme maliyetleri artmaktadır.

Sistemde yoğunlaşma ünitesinde çökme ve korozyon gibi sorunlara neden olduğu için NCG gazları blöf yöntemiyle sisteme dahil edilmeden uzaklaştırılmaktadır. Reenjeksiyon yöntemiyle tekrar sisteme dahil edilme konusunda teoride çalışmalar yapılsada henüz pratiğe dökülememiş olması rezervuar stabilitesini bozması, mineral çökmesi yada çözünmesine yol açabileceği ve NCG gazlarını aktif bir şekilde sisteme dahil edebilecek ekonomik yöntem bulunamadığı içindir (Aksoy, 2013).

1.5. Jeotermalde H₂S

Jeotermal santrallerinde elektrik üretimi, CO₂, H₂S, CH₄, NH₃ ve diğer sera gazları gibi yoğuşmayan gazların yüksek emisyonlarının oluşmasına yol açmaktadır (Mazella, vd., 2018). Santralde ortaya çıkan CO₂ ve CH₄ gibi gazların emisyonları genellikle fosil kaynaklı yakıt bazlı santrallerin emisyonları ile karşılaştırıldığında daha düşüktür ancak çevreye ciddi bir tehdit oluşturmaktadır (D'Alessandro vd., 2013). Öyleki bu tarz gazlar iklim değişikliklerine katkıda bulunmaktadır (Peralta, vd., 2013).

H₂S, atık su arıtımı, kağıt endüstrisi, termik santraller, jeotermaller gibi birçok proses sonucunda ortaya çıkan tehlikeli ve toksik bileşenli gazlardır. H₂S'in emilimi için biyofiltrasyon, klor çözeltilerinde emilimi veya alkanolamin çözeltilerinde emilimi gibi birçok teknik kullanılmaktadır (Busca, vd., 2003).

CP-GPP olarak da bilinen Meksika'nın en büyük jeotermal santralının sadece 2011 yılında sahip olduğu 13 elektrik üretim ünitesi sayesinde 180, 220, 220 ve 100 MW'lık bir enerji üretim kapasitesine sahip olduğu bildirilmiştir (Peralta vd., 2013). Buna karşın 2017 yılında 7,0 Gg.yıl⁻¹ H₂S emisyonuna sahip olduğu bildirilmiştir (Katherine, 2018). Jeotermallerde yoğuşmayan gazların soğutma kulelerine yerleştirilen menfezler veya bacalar aracılığıyla atmosfere salınmaktadır ve bu gazların dağılmasını kolaylaştırmaktadır. Bu nedenle CP-GPP santralının 6,7 km güneydoğusunda 16,5 µg.m⁻³ ve santralin 4,3 km doğusunda ise 13,5 µg m⁻³ maksimum H₂S eliminasyonu tespit edildiği bildirilmiştir. Bu seviyelerin gün geçtikçe arttığı ve önüne geçilmesi gerektiği ile ilgili yorumlar mevcuttur (Aguilar-Dodier, vd., 2020).

Dünya da jeotermal enerjiyi ilk kullanan ülke İtalya'dır. İtalya'da sadece 2016 yılında net elektrik üretimi 5871 GWh olarak bildirilmiştir. Genel bazda bakıldığında İtalya'nın toplam elektrik enerjisi kapasitesinin %2'sine karşılık geldiği bildirilmiştir. Oldukça yüksek üretim kapasitesine sahip olan bu enerji santralinde akışkanların yaklaşık %21 ila %10 arasında değişen miktarlarda CO₂, H₂S, CH₄ ve Hg, As, B, Rn, Sb ve NH₃ gibi eser elementleri içeren bir gaza yol açtığı bildirilmiştir (Manzela., 2018). Soğutma

kulelerinde yayılan aerosol parçacıkları içinde katı parçacıkların ve suda çözünmeyen gazların varlığı bildirilmiştir. Diğer yandan ortaya çıkan sera gazlarının fosil kaynaklı santrallere kıyasla sadece %1'i gibi küçük bir değere sahip olduğu bildirilmiştir (Kagel ve Karl, 2005).

Jeotermal enerji santrallerinin akışkandaki gaz konsantrasyonu rezervuar özelliklerine göre değişmektedir. Ancak genel olarak en çok CO₂ ve H₂S gazlarını içerdiğini ve bu gazların sırasıyla NCG gazlarının %95'ini ve %1-2'sini oluşturduğu bilinmektedir (Manzella, vd., 2018).

Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ) tarafından H₂S emisyon 150 µg.m⁻³ kılavuz değerinin altında olması gerekmektedir (Nyairo, vd., 2018).

1.6. H₂S Eliminasyon Yöntemleri

H₂S gibi toplam indirgenmiş kükürt bileşikleri, yol açtıkları kötü kokusu ile oldukça dikkat çeken atık gazlardır ve aynı zamanda çevreye ve insan sağlığına zararlı olmaları nedeniyle eliminasyonu büyük önem arz etmektedir (Devulapelli, 2008).

CO₂ ve H₂S gibi gazlar operasyonel, çevresel ve ekonomik nedenler dolayısıyla akışkanlardan uzaklaştırılması gerekmektedir. Hidrojen sülfür gazının eliminasyonunda fizikokimyasal prosesler ve biyoteknolojik prosesler olmak üzere 2 farklı teknik kullanılmaktadır.

Biyolojik kükürt giderme, düşük ve orta güçte sülfürlü gaz akışı için etkili olduğu için tercih edilmektedir. H₂S'in biyolojik olarak uzaklaştırılmasında genellikle iki adım ile gerçekleşmektedir. Bunlardan ilki alkali çözeltide H₂S'in emilmesi ve bisülfüre (H₂S⁻)'e çözünmesidir. İkinci aşamada ise sülfat oksitleyen bakteriler (SOB) tarafından H₂S'in elementsel kükürte, S⁰ oksidasyonudur (Kennes ve Veiga, 2001). Biyolojik kükürt

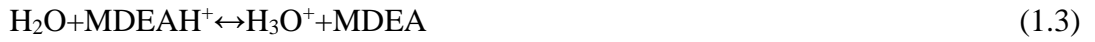
gideriminde yüksek sülfür uzaklaştırmasına rağmen iki önemli sınırlama vardır. Bunlardan ilki sülfür içeriğinin çok düşük olması sonucunda işlemin başarısızlığa yol açmasıdır. İkinci zorluk ise biyolojik sülfürün elementel kükürte oksidasyonu %100 seçici olmaması sonucunda çözülmüş kükürt türlerinin kademeli olarak birikmesi ile başarısız olmasıdır (Kok, vd., 2013).

1.6.1. Alkanolamin Prosesi

Alkanolamin prosesi H₂S eliminiasyonunda kullanılan fizikokimyasal proseslerden biridir. H₂S ve CO₂ gibi çeşitli gazların uzaklaştırılmasında alkanolamine bazlı çözücüler kullanılmaktadır. Asit bileşenlerinin giderilmesinde en sık tercih edilen proseslerden biri olan AP, jeotermal santrallerinde ortaya çıkan H₂S adsorpsiyonunda da kullanılan tekniklerden biridir. Bu proseste asidik bileşenler bir gaz/sıvı kontaktöründe ekzotermik, tersinir bir reaksiyon yoluyla bir alkanolamine absorpsiyon sıvısı ile reaksiyona girer. Bir sonraki işlem adımında asidik bileşenler bir rejeneratörde, genellikle düşük basınç ve/veya yüksek sıcaklıkta, çözücünden uzaklaştırılır (“Aliabad vd., 2009”). En basit tanımıyla AP, bir absorpsiyon kolonunun altından H₂S girmesi ve kolonun üstünden amin konsantrasyonu düşük olan çözelti ile karşılaşması sonucunda H₂S’in absorplanmasıdır. Absorpsiyon kulesinden çıkan zenginleştirilmiş çözelti ısı değiştiriciye beslenir ve amin çözeltisi tarafından ısıtılır. Temiz gaz absorpsiyon kulesinden salınırken, asit gazları zengin asit çözeltisinden ayrılması sağlanır (Türker, 2000).

Endüstriyel olarak en yaygın kullanılan amin çözeltileri aminler, monoetanol amindir (MEA), dietanol amin (DEA), di-izopropanol amin (DIPA) ve Nmetil dietanol amin (MDEA)’dir (Mandal ve Bandyopadhyay, 2005). MEA bua sit bazlarına karşı bilinen en kuvvetli bazdır. DEA, rafinerilerde rafineri çıkış gazlarından H₂S’in eliminasyonu için yaygın olarak kullanılan bir kimyasal emicidir. MDEA ise sulu fazdaki H₂S’in uzaklaştırılmasında tercih edilmektedir (Mandal vd., 2004). MDEA’nın yanı sıra DIPA kimyasalı, H₂S için CO₂ üzerinde MEA veya DEA’dan daha yüksek bir seçicilik sağlamaktadır. H₂S’in gazdan uzaklaştırılması tatlandırma olarak da bilinmektedir (Douglas ve Christina, 1987).

H₂S ve CO₂ MDEA ile reaksiyonları denklem 1.1, denklem 1.2, denklem 1.3, denklem 1.4, denklem 1.5 ve denklem 1.6'da verilmiştir (Cleeton, vd., 2020).



H₂S'in sekonder ve tersiyer aminler arasındaki reaksiyon mekanizması denklem 1.7 ve denklem 1.8 'de verilmiştir (Xue, vd., 2022).



Yapılan araştırmalar sonucunda jeotermal santralleri gibi çeşitli santrallerden kaynaklı ortaya çıkan asidik gazların gideriminde H₂S ve CO₂ birlikte giderildiği çeşitli çalışmalar da mevcuttur. Burada araştırmacılar CO₂ ve H₂S arasında ikincil aminler (engellenmiş aminler) ve üçüncül aminler arasında reaksiyonun farklı olduğunu bildirmişlerdir. Buna ek olarak da H₂S'in engellenmiş amin grubu ile seçiciliğinin daha

yüksek bir kapasiteye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Buradan yola çıkarak her iki gaz türü içinde birlikte absorpsiyon adına çeşitli çalışmalar yürütülmüştür (Xue, vd., 2022).

Literatürde çeşitli üretim sahalarında meydana gelen H₂S kirleticisinin gideriminde kullanılan alkanolamine çözücüleri ve süreçleri hakkında bilgiler derlenmiş ve bunların bir kısmı tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3.

Alkanolamin ile asit gazlarının giderilmesi.

Alkanolamin (A)	İkinci Çözücü	Kullanım Alanı	Kirletici Gaz	Emilim Sıcaklığı (K)	A Konsantrasyonu, mol/L	Absorpsiyon miktarı	Kaynakça.
MEA (%30 ağırlıkça)	EG (%70 ağırlıkça)	Doğalgazdan H ₂ S giderimi	H ₂ S	287,8	-	-	(Dong, vd., 2024)
MDEA (%35 ağırlıkça)	TBEE (%5 ağırlıkça)	Endüstriyel gaz saflaştırılması	H ₂ S	30-60 oC	%10-50	99,79%	(Xue, vd., 2022)
MDEA	-			30 oC	50%	0,10215 g/mL	
TBEE	-			60 oC	50%	0,15055	
MEA	-	asit gazı giderme prosesi simülasyonu	H ₂ S	298-393	Ağırlıkça %30	<0,2	(Wang, vd., 2018)
MDEA	-			313-388	Ağırlıkça %20-48	0-0,988	
MDEA	Sülfolan	Doğalgazdan asit bileşenlerinin ve organik kükürtün giderimi	CO ₂ , CH ₃ SH	273–498	-	-	(Liu, vd., 2021)
AMP ve MDEA	-	Sulu çözeltilerden asit gazların giderimi	H ₂ S	293–313	2–3 kmol/m ³	-	(Mandal, vd., 2004)
MEA	-	Sulu çözeltilerdeki karbondioksit çözünürlüğünü inceleme	CO ₂	315,5	0,183616859 0,278962149	0,562–1,068	(Jung-Yeon, vd., 2002)
AEPD	-	Sulu çözeltilerdeki karbondioksit çözünürlüğünü inceleme	CO ₂	313,15	-	0,632-1,289	(Jung-Yeon, vd., 2002)
MEA	-	Sulu çözeltilerdeki karbondioksit çözünürlüğünü inceleme	CO ₂	298,15 ve 373,15	5	0,289–851	(Lee, vd., 1976)
MEA	-	Sulu çözeltilerdeki karbondioksit çözünürlüğünü inceleme	CO ₂	333,15, 353,15, 373,15	5	0,306–0,646	(Shen, vd., 1992)

“Tablo 3’ün devamı”

DEA	Sulu çözeltilerdeki karbondioksit çözünürlüğünü inceleme	CO2	303-323	2,4	0,445-0,786	(Haji- Sulaiman, vd., 1998)
TEA	Sulu çözeltilerdeki karbondioksit çözünürlüğünü inceleme	CO2	298.15- 353.2	0.5-5	0.034-0.976	(Ghiasi, vd., 2014)

1.6.2. Kimyasal Sülfid Oksidasyonu

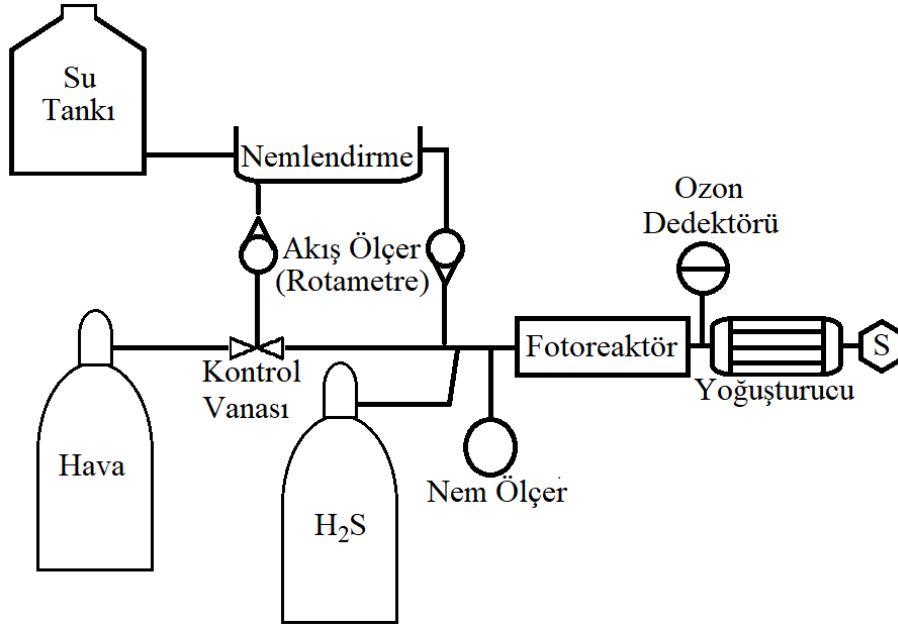
Organik sülfürlerin (tiyoeterler), biyokimyasal dönüşümlerde ve ekosistemimizde önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle sülfür okyanus fitoplanktonları tarafından dimetil sülfür olarak atmosfere salınmaktadır. Kimyasal Sülfid oksidasyonu (KSO), H₂S ‘i Cl₂, O₃, H₂O₂, hipoklorit gibi kuvvetli yükseltgeyicilerle yükseltmektedir. Yüksek sıcaklık ve atmosfer basıncında hidrojen sülfür hava ile yükseltgenebilmektedir. Sülfürlerin sülfoksitlere seçici oksidasyonunda kullanılan çeşitli tekniklere rağmen çok azı yeterince seçicidir (Martin vd., 2001).

Sülfürlerin oksidasyonu için kullanılan önemli bir reaktif olan hidrojen peroksit sülfürün yükseltgenmesinde kullanılmaktadır. Hidrojen peroksit, sülfürün dekontaminasyonu için ideal bir atık önleyici oksidandır. Çünkü su reaksiyonun tek teorik yan ürünüdür. Ek olarak su ve birçok organik çözücüde sergilediği yüksek çözünürlük ile birçok sıvı faz reaksiyonları için de çekici bir oksidandır. Taşıma, işletme ve depolamada güvenli olan bu oksidanın temini de uygun maliyetli olması yönü ile dikkat çekmektedir. Herhangi bir organik çözücü veya katalizör olmaksızın tek başına reaksiyonu, aşırı oksidasyon nedeniyle kontrollü kullanılmalıdır. Bu nedenle organik sülfürlü bileşikler kimi zaman farklı reaksiyon koşulları altında iki oksidasyon ürünü (sülfoksit (RR'SO) ve sülfon (RR'SO₂)) olarak üretilir.

H_2O_2 'deki O-O bağlarının kopması ve S-O bağının oluşması yavaş ilerlediği için oksidasyon yavaş gerçekleşmektedir. Bu nedenle hidrojen peroksit ile reaksiyona giren peroksiboratlara veya borik asit etkili bir aktivatör olarak tercih edilmektedir (Richardson, vd., 2000; Blaschette, vd., 1971)). Örneğin Litvinenko ve arkadaşları mono- ve diperoksoboratlardan sülfürün oksidasyonunu incelemişler ve dimetil sülfoksit asite yükselttiklerini bildirmişlerdir (Litvinenko, vd., 2011). Hidrojen peroksitin, aktivatör yokluğunda yavaş oksitleyici olması nedeniyle birçok çalışmada çeşitli katalizörler önerilmektedir. Bu bağlamda peroksiboratlara ek birçok katalizör ile karşılaşılmaktadır (Smith vd., 2006). Bir diğer örnek olarak hidrojen peroksitin oksidasyonu için bikarbonat iyonu örnek verilebilir. Bikarbonat iyonu ve H_2O_2 arasındaki reaksiyondaki bir reaksiyon sonucunda ortaya çıkan peroksimonokarbonat iyonu (HCO_4^-) olarak tanıtılmıştır. Diğer yandan hidrojen sülfat, dihidrojen fosfat ve üre gibi ajanların da metil sülfürün hidrojen peroksit yardımıyla oksidasyonunda etkili bir katalizör olabileceği bildirilmiştir (Fakharian vd., 2010).

Diğer bir çalışmada ise Seryum tuzlarının öneminden bahsedilmektedir. Araştırmacılar ticari seryum (VI) trifilatı Lewis asit katalizörü olarak kullandıklarını ve tetrahidrofuranda sulu hidrojen peroksit (%50) aracılığıyla sülfidlerin sülfoksitlere seçici oksidasyonu için bir katalizör olarak $Ce(OTf)_4$ 'ü önermişlerdir ("Raju, vd., 2009"). Diğer bir çalışmada ise kanalizasyon atığındaki sülfürün giderimine odaklanmışlardır. Brahma ve Abderafi, %35 hidrojen peroksit kullanarak sülfür gideriminde etkili bir oksidasyon elde ettiklerini bildirmişlerdir (Brahmi ve Abderafi, 2022). Ek olarak

Sülfürün oksidasyonunda kullanılan bir diğer yükseltgeyici ise ozondur. 2,076 V'luk standart bir elektrot potansiyeline sahiptir. Ekonomik olarak uygundur ve metal iyon safsızlıklarını getirmez (Zhang, vd., 2024). Li ve arkadaşları yürüttükleri çalışmada SO_2 'nin $CaCO_3$ parçacıkları üzerinde O_3 tarafından oksidasyonunu incelediklerini bildirmişlerdir (Li vd., 2006). Diğer bir çalışmada ise UV/ O_3 , UV/ H_2O_2 ikili sistemlerin H_2S gideriminde etkinliği incelenmiştir. En etkili yöntemin pH 7'de UV/ O_3 sisteminde gerçekleştiği bildirilmiştir (Popiel, vd., 2008). Bu tarz ileri oksidasyon sistemleri de oksidasyonun geliştirilmesi için incelenmektedir. Şekil 3'de UV ışını ve ozon ile birlikte H_2S 'in oksidasyonu süreci verilmiştir.



Şekil 3. UV ışını ve ozon ile birlikte H₂S'in oksidasyonu ("Gilardi, 2016").

Sülfürün giderimi için yaygın olarak kullanılan yıkma yöntemi bir gaz-sıvı kontaktörü kullanılarak sulu çözeltideki kütle transferi sonucunda kükürtün eliminasyonu gerçekleştirilmektedir. Klor sülfürün yıkanmasında yaygın olarak kullanılan, ağartma, oksidasyon ve dezenfeksiyon alanlarında geniş kapsamı nedeniyle önemli bir ticari değere sahiptir ("Azizi, vd., 2015").

Sülfürün birçok türü bulunmakla birlikte araştırmacılar her tür formunun insan ve çevre üzerindeki olumsuz etkilerini minimize etmek yönünde araştırmalar yürütmektedir. Bu kapsamda birçok yönetmelik üretim sahalarında dikkate alınarak önüne geçilmektedir. Ancak geçmiş tarihimizde sülfürün silah olarak kullanıldığı bir alanına da şahitlik edilmiştir. Geçmişte klor gazı, Yperite olarak da bilinen bir kimyasal savaş silahı kullanılmıştır. Bis-(2-kloretil) sülfür diğer adıyla kükürt hardalı ölümcül bir vezikanttır. Cilde, göze ve solunum yollarına zarar veren bu gaz DNA üzerinde de çeşitli olumsuz etkilere yol açmaktadır. İlk defa 1917 yılında Fransa'nın Ypres kentinde Almanya'nın İngiliz ordusuna karşı kullanılan bu silah, zamanında insanlar üzerinde ciddi bir yıkıma yol açmıştır. Araştırmacılar günümüzde oda şartlarında sıvı formda bulunan gazı zararsız ürünlere dönüştürmek için çeşitli reaktifler kullanmışlardır. Ramakrishna ve arkadaşları çalışmasına göre kullanılan

bütün teknikler arasında hidrolitik ve oksidatif yöntemler kolay ve daha az riskli olması nedeniyle daha pratiktir. Bu bağlamda araştırmacılar hardal gazının oksitlenmesinde ozon gazını önermişlerdir (Ramakrishna, vd., 2016).

Tablo 4’de kimyasal oksidasyon ajanlarının bir kaçı verilmiştir.

Tablo 4.

Kimyasal oksidasyon ajanları.

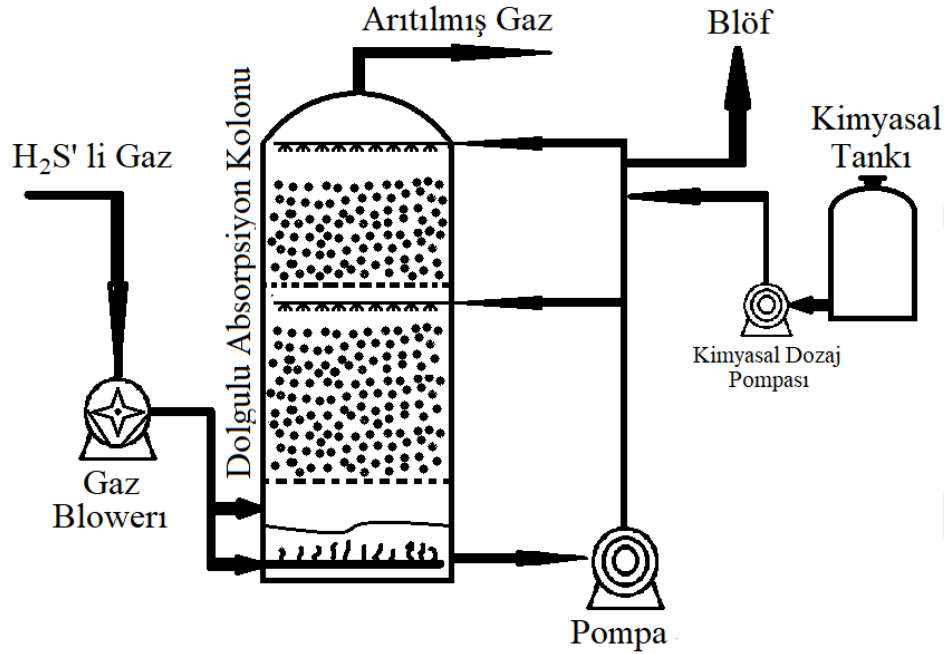
Oksidasyon ajanı	katalizör	
H ₂ O ₂	NaH ₂ PO ₄	(Fakharian, vd., 2010).
	KHSO ₄	
	CO(NH ₂) ₂	
	NaHCO ₃	
O ₃	Seryum (IV) triflat	(Raju, vd., 2009)
	CaCO ₃	(Li, vd., 2006)
İleri Oksidasyon süreçleri		
Preozonlama	O ₃ /H ₂ O ₂	
Foto destekli ozonlama	O ₃ /UVC	
foto-destekli perozonasyon	O ₃ /H ₂ O ₂ /UVC	(Segundo, vd., 2021)
foto-Fenton destekli ozonlama	O ₃ /PF	

1.6.3. H₂S’in Hipoklorit ile Oksidasyonu

Sülfür gideriminde kullanılan yöntemlerden kullanılan oksidasyon prosesleri havalandırma (katalizörlü, katalizörüz), klorlama, ozonlama, potasyum permanganat, hidrojen peroksit ve hipoklorit muamelesidir. Bütün bu süreçlerin sonunda nihai ürün kükürt, thiosülfat ve sülfattır (“Türker, 2000”).

Sülfürün (H₂S) eliminasyonunda kullanılan temizleme sistemlerinde kirleticilerin gaz fazından sulu faza transfer olmasına dayanır. Bu nedenle Henry yasası ile de tanımlanan gazların uçuculuğu burada önemli bir parametredir. Arıtma, gaz fazı ve su fazı arasındaki

temasının nebulizerler tarafından maksimize edildiği bir kolondan oluşur. Tüm bileşikler suda güçlü bir çözünürlüğe sahip değildir. Bu nedenle giderim verimliliğini arttırmak için, oksidatif artıma veya pH ayarı (alkali artırılarak uygulanabilir) ile çözünürlüğün artırılması gerekir (Gilardi, 2016). Genel olarak sülfürün giderilmesinde kullanılan kolon şekil 4’de verilmiştir.

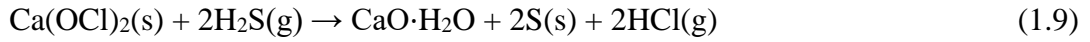


Şekil 4. Genel gazın arıtılmasında kullanılan proses (“Gilardi, 2016”).

Gazdaki hidrojenin uzaklaştırılmasında kullanılan yöntemlerden olan alkali hipoklorit ile muamelede genel kükürt gideriminde kullanılan kolon sistemine oldukça benzerdir. Bu yöntemde H₂S içeren gaz kolona alttan beslenir ve kolonun üstünden ise alkali hipoklorit çözeltisi beslenir. Bu sayede gaz ile hipoklorit çözeltisi üzerine sülfür absorblanır. Dolgu kolonun altından terk eden sıvı sabi yataklı bir reaktöre beslenir ve H₂S katalitik olarak hipoklorit tarafından yükseltgenir (“Türker, 2000”).

Sülfonyum tuzlarının alkoksi grubu alkoksitlere dönüşebilmektedir ancak alkoller nötr ortamda ve oda sıcaklığında yavaş dönüşüm gerçekleştirmektedir. Bu nedenle katalizör ile reaksiyonlar desteklenmektedir. Run ve arkadaşları, hipoklorit iyonu (OCl⁻), hipokloröz asit ve alkil hipoklorit üzerine sülfürün oksidasyonunu incelemişlerdir. Araştırmaları

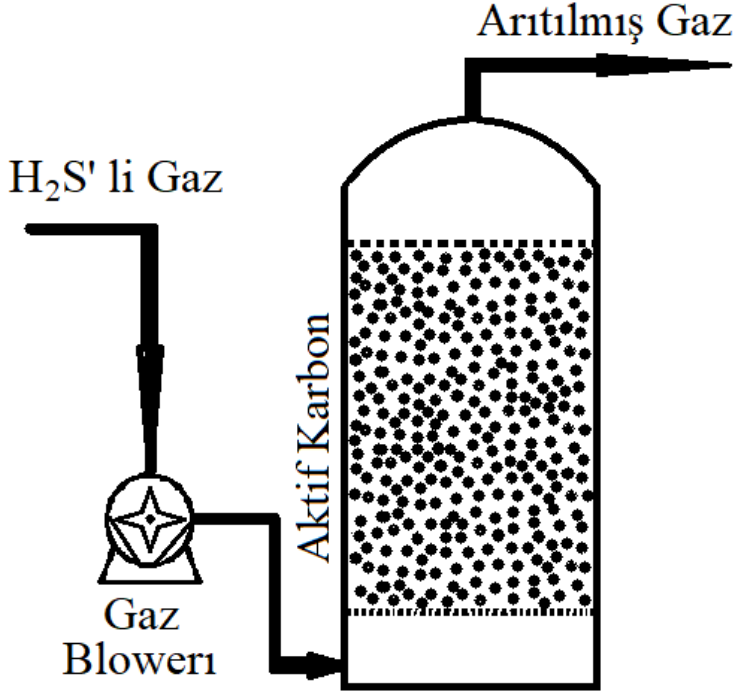
sonucunda OCl^- anyonunun oksijen transferlerinde sülfürleri sülfoksitler ve sülforsitleri sülfonlara dönüştürdüğünü bildirmişlerdir (Ruff, vd., 2013).



Bu reaksiyon, gaz giderme sisteminde elde edilen gazın kuruluşuna bağlı olarak esasen su buharı yokluğunda gerçekleştirilir. Yan ürün sülfür ve kalsiyum oksit toprak için gübre olarak kullanılabilir; siyanürik asit veya hidantoin kullanıldığında, yan ürün herbisit olarak kullanılabilir (Gallup, 2003).

1.6.4. Hidrojen Sülfürün Adsorpsiyon ile Uzaklaştırılması

Sülfürün tutunmasında kullanılan diğer bir Teknik ise sülfürün adsorban ile eliminasyonudur. Literatürde bir çok adsorban mevcuttur. Bunlar içerisinde en yaygın kullanılan aktif karbondur. Aktif karbonlar kolay eldesi ve uygun maliyetli olması nedeniyle en çok tercih edilen adsorbandır. Düşük maliyetli, dayanıklılığı ve yüksek aktivitesi nedeniyle aktif karbonlar H_2S eliminasyonunda tercih edilmektedir. İşlemden H_2S doğrudan element kükürdüne veya sülfürik aside dönüştürülür ve ek işlem gerektiren ikincil atık üretmez. Burada adsorpsiyon sülfürün kirleticinin gaz fazından katı faza transferine dayanır. Adsorpsiyon kapasitesi, adsorban yatağının kütlesi başına maksimum çıkarılabilir kütlesi arasındaki orandır. Rejeneratif bir kurumdaki adsorbanın çalışma kapasitesi, taze adsorbanınkinden daha düşüktür (“Gilardi, 2016”). H_2S 'in adsorpsiyon süreci şekil 5’de verilmiştir.



Şekil 5. Aktif karbon ile gazın arıtılması (“Gilardi, 2016”).

Literatürde bilindiği üzere aktif karbonlar yüksek yüzey alanları ve gelişmiş gözenek hacimleri ile dikkat çekici bir H₂S adsorpsiyonu sağlamaktadır. Örneğin hindistan cevizi kabuğundan elde edilen aktif karbonun H₂S gideriminde etkili bir performans sergilediği bildirilmiştir (Sreeramamurthy, vd., 1975). Ancak koku giderme sürecinde etkili olmadığı da belirtilir. Bu nedenle araştırmacılar bu sorunu çözmek amacıyla, esas olarak emdşrmeye dayalı kimyasal modifikasyonları mutlaka kullanırlar. Özellikle kostiklerle (NaOH ve KOH) emdirilmiş karbonlar, H₂S gideriminde kullanılmaktadır (Bandosz, vd., 1998).

H₂S adsorpsiyonu için sabit yataklı kule ile aktif karbon kullandıklarını bildirmişlerdir. Kulenin girişinde 4 L/dk kirletici gazın beslendiği, aktif karbonun ise 36 g kullanıldığı ve katalizör olarak 1M KOH ile %94 H₂S adsorpsiyonunu sağladıklarını bildirmişlerdir (Calderon, vd., 2022).

1.6.5. Demir Talaşı Filtresi Yöntemi

Demir Talaşı filtresi (Iron Sponge) yöntemi bilinen en eski yöntemlerden biridir. Demir oksitler çözünmez demir sülfür oluşturarak hidrojen sülfürü giderir. İçeriye elemental sülfür oluşturulur ve demir oksit rejenere edilerek prosesin varlığı uzaltılır. Rejenerasyon süreci çok fazla ısı kullanılmaktadır. Tek kolonlu bir sistemde rejenerasyon kolonu %1-5 hava enjekte edilerek gerçekleştirilmektedir. Ancak yükü iki kolonlu bir sisteme kıyasla kısıtlıdır (Kasulla, vd., 2021).

Türker yürüttüğü çalışmada demir talaş filtresi yöntemi için ya küçük gaz tesislerinde ya da büyük tesislerde gazın arıtılmasından sonra nihai temizleme olarak kullanıldığını bildirmiştir. Bu kapsamda demir oksitin (H_2S içeren) odun talaşları ile en son temizlendiğini bildirmiştir ve aşağıdaki reaksiyonlar ile açıklamıştır (Türker, 2000). Demir Talaşı yönteminin reaksiyon mekanizması denklem 1.10 ve denklem 1.11’de verilmiştir.



1.6.6. Fenton Reaktifi ve Hidrojen Sülfür Giderimi

Fenton reaktifi, demir (Fe^{2+}) ve hidrojen peroksit (H_2O_2) kullanarak maddelerin oksidasyonunu sağlayan bir yöntemdir. Ancak bu teknoloji, gaz fazındaki bileşiklerin giderimi için yaygın olarak kullanılmamaktadır. Fenton reaktifi ile H_2S giderimi üzerine yapılan bazı deneysel çalışmalar, sulu ortamlarda başarılı sonuçlar göstermiş olsa da bu uygulamalar genellikle laboratuvar düzeyinde kalmıştır (Yousefi, 2019). Gaz fazındaki bileşiklerin giderilmesi için daha karmaşık süreçler gerekmektedir.

Hidrojen sülfür, jeotermal enerji santrallerinde en yaygın bulunan gazlardan biridir. H₂S giderimi için yaygın olarak kullanılan yöntemler arasında fizikokimyasal süreçler yer alır, ancak Fenton reaktifi bu tür gaz arıtma yöntemlerinde yaygın olarak kullanılmamaktadır. Fenton reaktifi, daha çok organik kirliliklerin arıtımı amacıyla kullanılır. H₂S'in Fenton reaktifi ile giderilmesine yönelik yapılan araştırmalar, gaz arıtma sistemlerinde bu teknolojinin nasıl entegre edilebileceğini araştırmaya devam etmektedir.

H₂S'in giderilmesi için daha çok alkanolamin prosesleri ve biyoteknolojik yöntemler tercih edilmektedir. Bu yöntemler H₂S'in oksidasyonuna ve çevreye salınımının azaltılmasına odaklanır. Fenton reaktifi, teorik olarak H₂S'in etkili bir şekilde oksitlenmesini sağlayabilir, ancak endüstriyel ölçekli uygulamalar henüz araştırma aşamasındadır.

Fenton reaktifi ile H₂S giderimi, gelecekte jeotermal santrallerde uygulanabilirliği olan bir teknoloji olabilir ancak şu an için laboratuvar çalışmaları ve pilot projelerle sınırlıdır. Bu süreçlerin endüstriyel düzeye çıkarılması için daha fazla araştırma ve teknik geliştirme gerekmektedir (Yousefi, 2019).

İKİNCİ BÖLÜM

ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. H₂S'in Giderilmesine Yönelik Yapılan Çalışmalar

Tez çalışmamızın bu bölümünde H₂S giderimi hakkında literatür çalışmalarına detaylı olarak incelenmektedir. H₂S gazının arıtılması çevre ve insan sağlığı açısından çok önem arz etmektedir. Santral çevresinde bu kirleticiler hava kirliliğine, asit yağmurlarına ve yakın çevrede çalışan insanlara solunum ve temas yoluyla bulaşan kirleticiler hastalık ve ölüm gibi riskler taşımaktadır. Santrallerden çıkan toksik maddelere maruz kalınması sonucu olası sağlıksal ve genetiksel riskleri saptaması üzerine yaptığı çalışmada toksisiteye maruz kalanların kontrol grubuna göre DNA onarım oranının daha düşük olduğunu belirlemiştir (Durmaz, 2009).

Santral uygulamalarını göz önünde bulundurduğumuzda H₂S giderim yöntemleri genellikle gazı dorudan kullanan tesislerde kullanılmaktadır. Biyogaz gibi oluşan anaerobik üretim sonucunda elde edilen gaz karışımında bulunmakta olan H₂S gazı kullanılan ekipman ve parçalara ciddi zararlar verdiği için arıtılmak zorunda kalınmıştır. Biyogaz tesislerinde H₂S gazı adsorpsiyon ve biyolojik arıtma kuleleri sayesinde arıtılmaktadır ancak ortaya çıkan atığın bertarafı konusunda çalışmalar devam etmekte ancak ekonomik ve çevreci bir sonuç bulunamamıştır. Yeni yapılacak araştırmalarda bu konunun üzerine yoğunlaşılması gerekmektedir.

Jeotermal santrallerde blöf yöntemi ile ekipmana zarar vermeden bu gazları uzaklaştırabilmesi nedeniyle arıtma yöntemleri araştırma kısmından uygulama kısmına henüz geçilememiştir. Bu nedenle geliştirilen yöntemin ekonomik ve kolay uygulanabilir olması üzerine çalışmaların hızlandırılması gerekmektedir.

Yangxian Liu ve diğ. (2019) yaptıkları bir çalışmada fenton reaktifini kullanarak bir püskürtme kulesinde H₂S gazını uzaklaştırmak için yaptıkları sistematik çalışmada 0,4 mL H₂O₂ ve 1000 ppm H₂S ile yaptıkları sıcaklık belirleme çalışması için 20 ile 70 °C arasında

yaptıkları H₂S giderimi çalışmasında 40 °C nin optimum olduğuna karar vermişlerdir. pH değerini 3.52; sıvı/gaz oranını 3 olduğu denemede Fe²⁺ konsantrasyonunun 0 dan 0.16 mol/L ye getirdikleri çalışmada arıtma veriminin %10,8 den % 91,9 a arttığını belirlemişlerdir. Bu fenton reaktifi için belirledikleri optimum şartlar sayesinde % 83,5 verim elde ettiklerini belirtmişlerdir (Yangxian Liu, vd., 2019).

Hirai ve diğ. (2001) yaptıkları çalışmada ise H₂S giderimi için aktif çamuru yerleştirdikleri inorganik taşıyıcı sistemi biyofiltrasyona tabi tutmuşlardır. Yaptıkları çalışmada 220 °C sıcaklıkta ve pH değeri 2'nin üzerinde olan NaHCO₃(Sodyum karbonat) sıvı besin ilavesini günde 40 mL olarak yapmışlar ve aktif çamurun biyolojik olarak isteme alışmasını sağlamak için 800 ppm H₂S gazı ile 12 gün boyunca uygulamışlardır. Bu sistem sayesinde 42 L/sa olarak besledikleri gaz için yapılan arıtmada 487 g/m³*sa H₂S gidermeyi başarmışlardır (Hirai, vd., 2001).

Jin ve diğ. (2005) yaptıkları çalışmada reçine üretimi yapan işletmeden aldıkları biyolojik çamuru aşı olarak kullanarak ön alıştırmaya ihtiyaç duymadan denemeye geçilmiştir. Sodyum tiyosülfat içeren besin tuzu ortamlarında zenginleştirilmiş çamur rasching halkalarına tutturulmuş ve damlatmalı olacak şekilde mikroorganizmaların bulunduğu ortama yerleştirilmiştir. Sisteme saatte 300-420 L biyogaz verilerek pH değeri asidik ortam olan 2-7 aralığında tutulmuştur. Besin ihtiyacı saatte 2,5-12 L aralığında verilerek giderilmiştir. Bu şartlar altında saatlik H₂S giderimi 22,5 g olarak gerçekleşmiştir (Jin, vd., 2005).

Termik santrallerin en büyük sorunu haline gelmiş yakma işlemi sonrasında kalan taban külleri de gaz arıtımda kullanılabilirliği yapılan araştırmalar ile desteklenmektedir. Mostbauer ve diğerleri (2014) yaptıkları çalışmada evsel atıkların yakımı sonucunda elde edilen külün H₂S gazı arıtımı verimini incelemişler ve çalışmayı İtalya'nın Tuscany bölgesinde santralde saatlik 3,7 Nm³ gaz geçişinin H₂S arıtımında en etkili akış olarak belirlemiş ve H₂S giderimini %99,5-99 olarak tespit etmişlerdir (Mostbauer, vd., 2014).

Sarperi ve diğ. (2014) yaptıkları çalışmada çelik endüstrisinden elde ettikleri kalsiyum ve demir oksitleri içeren çamur kullanarak arıtma deneyleri yapmışlar ve giderim denemeleri sonucunda kapasiteyi 1 kg çamur ile 63 g CO₂ ve 140 g H₂S gidermeyi başarmışlardır (Sarperi, vd., 2014).

Krischan ve diğ. (2012) alkali oksidatif gaz yıkayıcı ile yaptıkları desülfürizasyon sistemi için sürekli gaz yıkama ve karıştırıcılı tankla H₂S arıtmayı denemişlerdir. Çalışmada NaOH, NaHCO₃ ve H₂O₂ içeren kimyasal karışım ile jeotermal santrallerde açığa NCG gazına benzer CO₂ oranı yüksek H₂S giderimi yapmak için karışıma pH'nın etkisi kimyasal karıştırmanın ve redoks potansiyelinin absorpsiyon üzerine etkisi ve kimyasal kullanım miktarına etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları endüstriye uygun gaz yıkayıcı kolonuna saatte 180 m³ biyogaz besleyerek %97' lik H₂S giderim verimi elde etmişlerdir (Krischan, vd., 2012).

Vakili ve diğ. (2012) sülfürü geri kazanmak için sulu ortamlarda H₂S i kullanmayı denemişlerdir. Proses verimini incelediklerinde düşük basınç ve yüksek sıcaklığın prosesin verimine olumlu etki edeceğine karar vermişler ve H₂S ve demir sülfatı arasında oluşan reaksiyonun derecesinin 1. Derece kinetiğe uyduğu kanısına varmışlardır. Düşük konsantrasyonlarda H₂S in absorpsiyon hızı demir sülfat konsantrasyonuyla doğru orantılı olarak artmaktadır. Bu yöntemin düşük konsantrasyonlarda daha etkili olduğu gözlemlenmiş ve yüksek konsantrasyonlarda verim düştüğü tespit edilmiştir. Demir sülfat konsantrasyonu ve viskozitesi arttıkça absorpsiyon hızı, difüzyonu ve çözeltinin çözünürlüğü azalmakta olduğunu belirlemişlerdir (Vakili, vd., 2012).

Deshmukh ve diğ. (2012) H₂S gidermek için demir şelatı kullanarak oksidatif absorpsiyonu denemişler ve pH 6'da sıcaklık 40 °C ve 10000 ppm demir konsantrasyonunda demir/şelat oranı ½ olacak biçimde denemeler yapmışlardır. H₂S gideriminde Demir-Nitriлотriasetik asit çözeltisinin diğ. (2012) ile kıyasladıklarında daha verimli olduğuna karar vermişlerdir. Çeşitli konsantrasyonlarda H₂S miktarı ile yaptıkları denemeler sonucunda düşük konsantrasyon içerenlerin gideriminin bu yöntemle daha verimli olacağına karar vermişlerdir (Deshmukh, vd., 2012).

Huertas ve diğeri (2011) biyogazdan H₂S ve CO₂ giderimi için amin absorpsiyonu ile yaptıkları çalışmada saatte 7,6 m³ lük debi ile besledikleri biyogazın içerisindeki H₂S miktarını girişte 5000 ppm çıkışta ise 100 ppm in altında olacak şekilde tasarlamışlardır. Amin absorpsiyonunda kullanılmak üzere metildietanolamin, monoetanolamin ve dietanolamin kimyasallarını farklı su oranlarıyla seyreltip debiye bağlı olarak giderim verimlerini araştırmışlardır. %7,5 luk konsantrasyon ile %98 lik H₂S giderimine ulaşabildikleri belirtmişler ve kullanılan aminlerin kg başına 5,37 g H₂S giderebildiğini tespit etmişlerdir. Biyogaz motorlarının egzoz ısılarını kullanarak aminlerin rejenerasyonu için yaptıkları çalışmada aminleri 95 °C ye ısıtarak H₂S giderim verimini %95-98 seviyelerine getirmişlerdir (Huertas, vd., 2011).



ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Kullanılan Ekipman ve Özellikleri

Tez çalışmamız için tesis ölçekli kurduğumuz sistemde kullandığımız ekipmanların marka ve özellikleri Tablo 5’te verilmiş olup uygulama alanındaki görselleri aşağıda sıralanmıştır.

Tablo 5.

Tez çalışmasında kullanılan ekipmanlar

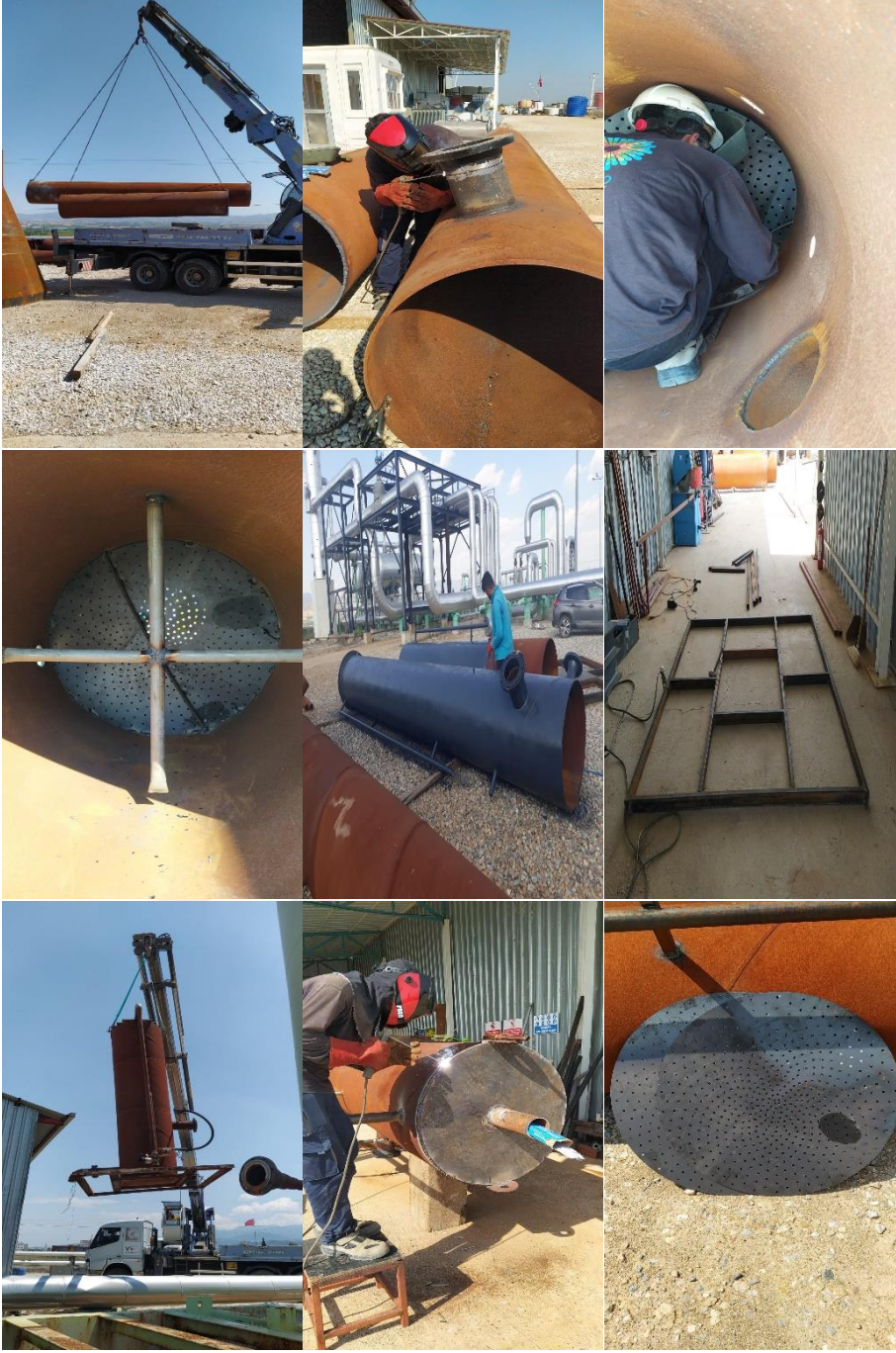
Sayı	Ekipman	Marka	Özellik	Adet
1	Pompa	Grundfos	5,8 m ³ /sa	2
2	Blower	Seko	120 m ³ /sa	1
3	Akış Metre	Rosemount	-	2
4	IBC	-	1 m ³	6
5	Tank	-	2,5 m ³	1
6	Karıştırıcı	-	-	2
7	Dalgıç Pompa	-	-	1
8	Gaz Ölçüm Cihazı	MRU OPTİVA 7	-	1
9	Soğutma Kolonu	-	30” 3 metre	1
10	Absorpsiyon Kolonu	-	34” 7 metre	1
11	Adsorpsiyon Kolonu	-	34” 5 metre	1
12	Savak	-	-	1

Jeotermalden çıkan NCG gazları sıcaklığı yüksek sıcaklıkta olduğu için önce soğutma kulesine gönderilir oradan diğer işlemlere tabi tutulur. Soğutma kolonu 30” genişliğinde 3 metre yüksekliğinde ve 1,37 m³ hacme sahip olacak şekilde dizayn edilmiştir. Soğutma kolonunda 1 tanesi gaz girişinde 7 tanesi üst kısımda olacak şekilde 8 adet spring kullanılmıştır. Gaz giriş ve çıkışı 4” olacak şekilde eşit büyüklükte dizayn edilmiştir. Soğutmak için kullanılacak olan su için 2 adet 2” lik ve 1 adet 1” lik olacak şekilde üç adet soğuk su girişi konulmuş ve bir adet 4” lik çıkış konulmuştur.

Absorpsiyon kolonu 34" genişliğinde, 7 metre uzunluğunda ve hacmi 4,1 m³ olacak şekilde dizayn edilmiştir. Gaz girişi için alttan 22" lik giriş ve üst kısımdan 4" lik bir çıkış olacak şekilde ve absorbansın girişi için oluşacak sıvı giriş kısmı büyüklüğünü 2" lik üstten püskürtme ile alttan ise pompalara geçişinin rahatlığı için 4" lik çıkış olacak şekilde ayarlanmıştır. Tabandan sıvı süzülmesi için 50 cm'lik boşluk olacak şekilde elek yerleştirilmiş ve bir metre yükseklikte ise difüzör konumlandırılmıştır. Tank içerisinde toplam 9 adet spring kullanılmıştır.

Adsorpsiyon kolonu tasarımı 34" genişliğinde 5 metre yükseklikte ve 2,93 m³ hacimde olacak şekilde dizayn edilmiştir. Tank içerisinde 8 adet spring kullanılmış ve gaz girişi için kolonun alt tarafından 2" lik gaz girişi için giriş yapılmıştır. Alt kısımda 1 metre yükseklikte adsorbent tutucu raf onun 50 cm altında ise gaz girişi ve dağılması için blower basma hattı ve difüzör mevcuttur. Gaz çıkışı kolon genişliğinde son hali ile doğaya salınacağı için gaz çıkış bölümü olarak üst kısım komple açık bırakılmıştır ve 34" tir.

Jeotermal tesisinden çıkan yoğuşmayan gazların eliminasyonu için kurulan ve fenton / alkolamin prosesinin tasarımı sırasında süreç ile ilgili çeşitli görseller verilmiştir. Kolonlara su ve absorbans için kullanılacak olan pompa, gaz girişi için blower, çıkan gazın içeriğini tespit etmek için kullanılmış olan MRU marka gaz ölçüm cihazı ve diğer ekipmanların ve kolon sisteminin görselleri aşağıda verilmiştir. Prosesin imalat sürecinde çekilen bazı kareler ise şekil 6'da verilmiştir. Burada imalat süreci görülmektedir.



Şekil 6. İmalat süreci

Şekil 7’de tesis içinden görseller veirlmiştir.



Şekil 7. Tesis içerisinde ekipmanlara ait görseller.

3.2. Yöntem

3.2.1. Eliminasyon Prosesi

Jeotermalden enerji eldesi sonucunda ortaya çıkan hidrojen sülfürün eliminasyonu kapsamında bir proses oluşturuldu. Oluşturulan proses sistemi 4 kısımdan oluşmaktadır. Bunlardan ilki gazın 50°C'nin altına düşürülmesi için soğutma kolonudur. İkinci aşamada gaz karışımından H₂S'in sıyırılacağı sprej reaktörlerdir. Üçüncüsü aşamada gaz havalandırma kolonuna girer. Üçüncü aşamada ise koagülasyon ve filtrasyon sistemidir. Tablo 6'de proses sisteminin 4 kısmı verilmiştir.

Tablo 6.

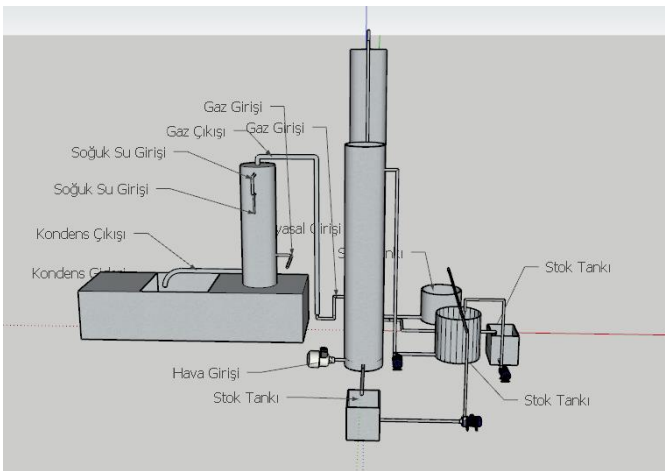
Kullanılan ekipmanlar ve özellikleri.

Ekipman	Kullanım Amacı	Detay
Soğutma kolonu	Gazın 50°C'nin altına düşürülmesi	a. Kolon çıkışındaki soğuk su ve kondens olan su buharının depolanacağı savak b. Kolon içerisindeki su seviyesinin tespiti için manuel seviye göstergesi c. Kolon içerisinde bulunan ve soğuk suyun püskürtüldüğü nozle sistemi
Sprej reaktör	Gaz karışımından H ₂ S'in sıyırılır.	a. Sıcaklık ve basınç göstergesi b. Reaktör tabanındaki kimyasal seviyesini gösterecek manuel seviye göstergesi c. Kimyasal stok tankları ve sirkülasyon pompaları d. Kimyasal püskürtmede kullanılan nozle sistemi
Havalandırma kolonu	Havalandırma	a. Havalandırma için kullanılan blower b. Kimyasal stok tankları ve sirkülasyon pompaları c. Kimyasal püskürtmede kullanılan nozle sistemi d. Alternatif yapılanma için kullanılacak demir talaşı taşıma sistemi (raf) e. Kolon tabanındaki kimyasal seviyesini gösterecek manuel seviye göstergesi
Koagülasyon ve filtrasyon sistemi		a. Koagülasyon işlemi için karıştırıcı tank(strok ayarlı) b. Stok tankları ve 130 ve 190 mesh iki katmanlı filtre

H₂S eliminasyonu için uygulanan sistemin Sketchup çizimi şekil 6'da verilmiştir. Öncelikle 167°C sıcaklıkta H₂S içeren gaz soğutma kolonuna beslenir. Burada su buharı debisi 2,57 ton/saattir. Soğutma kolonuna toplamda 18 ton soğuk su beslenerek su buharı-gaz karışımından su buharı ayrılır.

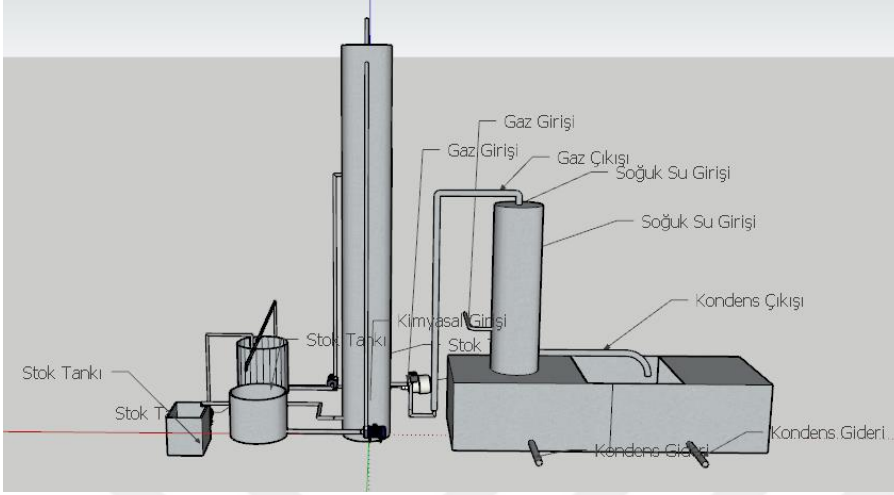
Sprey reaktörün altından giren H₂S içerikli kuru gaz karışımı kolonda yükselirken, kolonun üst kısmından spreylenen kimyasal ile karşılaşır. Kolon sıcaklığı 25°C basınç ise 1 atm'dir. Kolon çıkışında kuru gaz debisi 393 m³/saattir. Gaz içeriğindeki başlangıç H₂S konsantrasyonu 2837 ppm'dir. Kolon çıkışından alınan gaz ile temas etmiş kimyasal tanka alınır. Bu tanktaki kimyasal, dalgıç pompa vasıtası ile havalandırma kolonunu besleyen pompanın emiş hattına bağlı tanka aktarılır. Buradaki pompa yardımı ile havalandırma kolonunun üstünden basılan kimyasal ile blower vasıtasıyla basılan hava temas ettirilir. Havalandırma kolonuna bir ton kimyasal basıldıktan sonra pompa durdurulur ve havalandırma işlemi devam eder. 10 dk'lık havalandırma işleminden sonra kimyasal, kolon çıkışında bulunan tanka aktarılır. Bu tank içerisindeki dalgıç pompa vasıtasıyla kimyasal, ana stok tankına beslenir. Ve kimyasalın çevrimi tamamlanmış olur.

Kullanılan kimyasal sisteme 150 lt/dk'lık debi ile beslenmiştir. Jeotermal santralde ortaya çıkan NCG gazlarının içerisinde kükürtün eliminasyonunu için tasarlanan prosesin Sketchup çizimi yapılmıştır. Şekil 8'de prosesin önden görünümü verilmiştir.



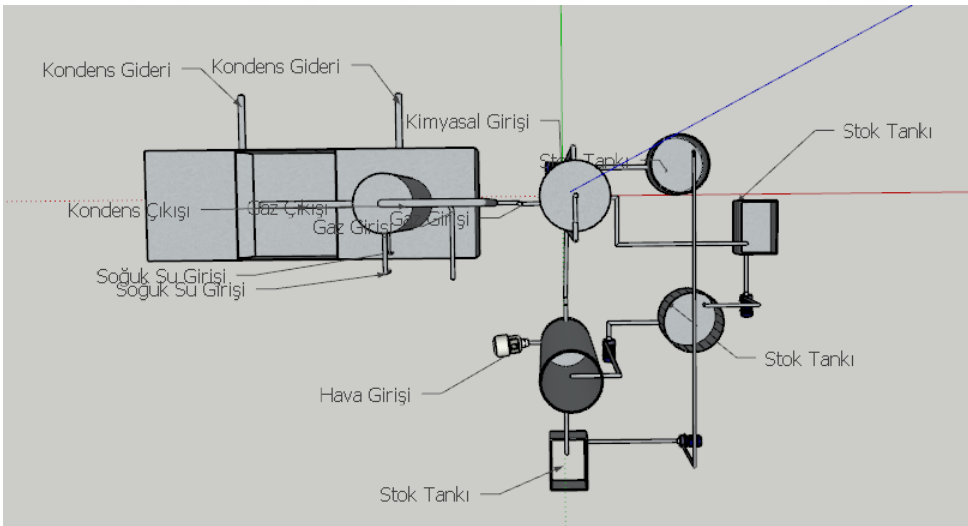
Şekil 8. Fenton prosesinin önden görünümü

Şekil 9’da prosesin arkadan görünümü verilmiştir.

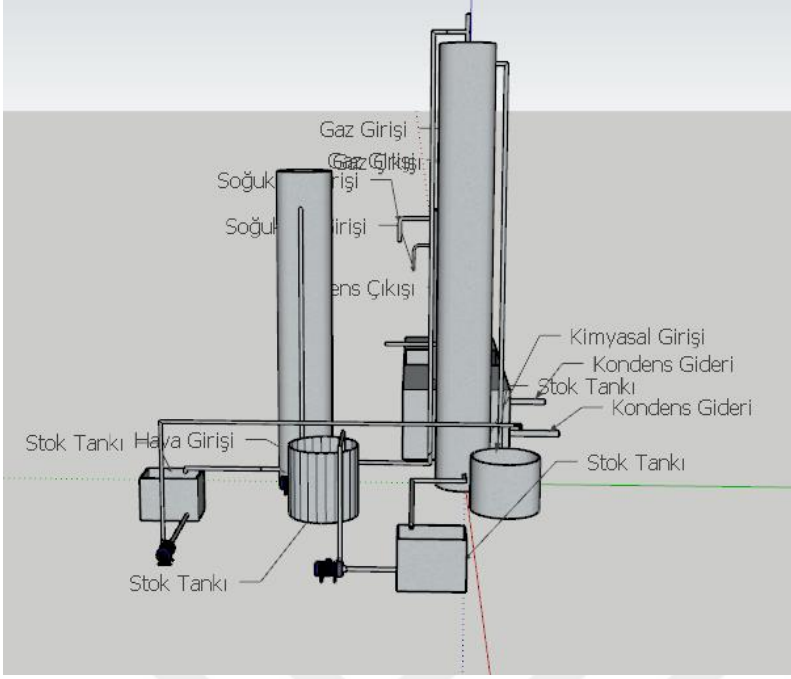


Şekil 9. Fenton prosesinin arkadan görünümü

Şekil 10’da prosesin arkadan görünümü verilmiştir.

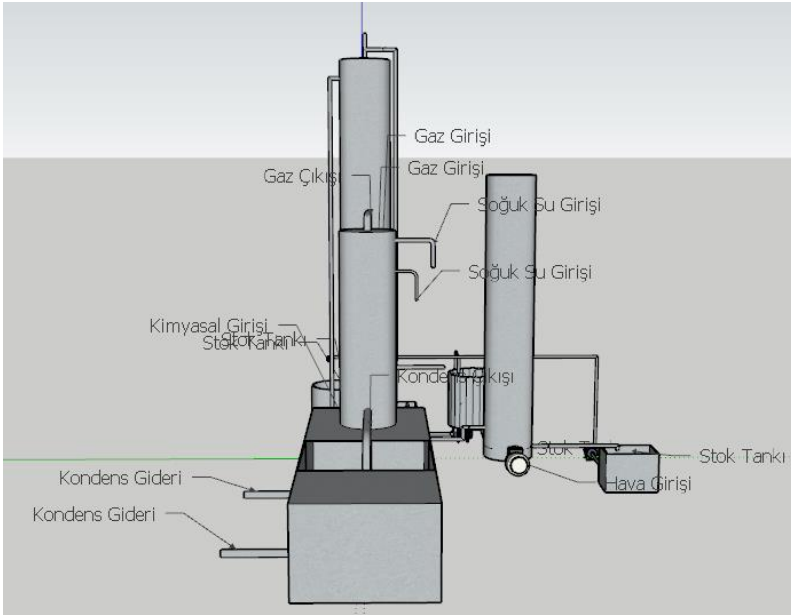


Şekil 10. Fenton prosesinin üsten görünümü



Şekil 11. Fenton prosesinin sağdan görünümü

Şekil 1 ve şekil 12’de prosesin sırasıyla sağdan ve soldan görünümü verilmiştir.



Şekil 12. Fenton prosesinin soldan görünümü

3.2.2. Alkanolamin Prosesi

Alkanolamin prosesi fenton prosesi için kurulan tesisin içerisinde denenmiştir. Burada amaç amin çözeltileri vasıtasıyla H₂S ve CO₂'i çeşitli gazlardan ayırarak elimine etmektir. Kullanılan amin çözeltileri sırasıyla Monoetanolamin (MEA), Dietanolamin (DEA), Diglycolamin (DGA), Metildietanolamin (MDEA)'dır. Bu amin çözeltilerinden en kuvvetlisi MEA'dır.

3.2.3. Fenton Prosesi

Daha önce alkanolamin prosesinde kullanılan deney düzeneği bu denemede ikinci santralde kurularak kullanıma hazırlanmıştır. Laboratuvar ortamında hazırlanan Fenton Reaktifi (belirli oranlarda karıştırılan su-demirsülfat ve saha çalışmalarında ilave edilen hidrojen peroksit) ile deneme yapılmıştır.

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

ARAŞTIRMA BULGULARI

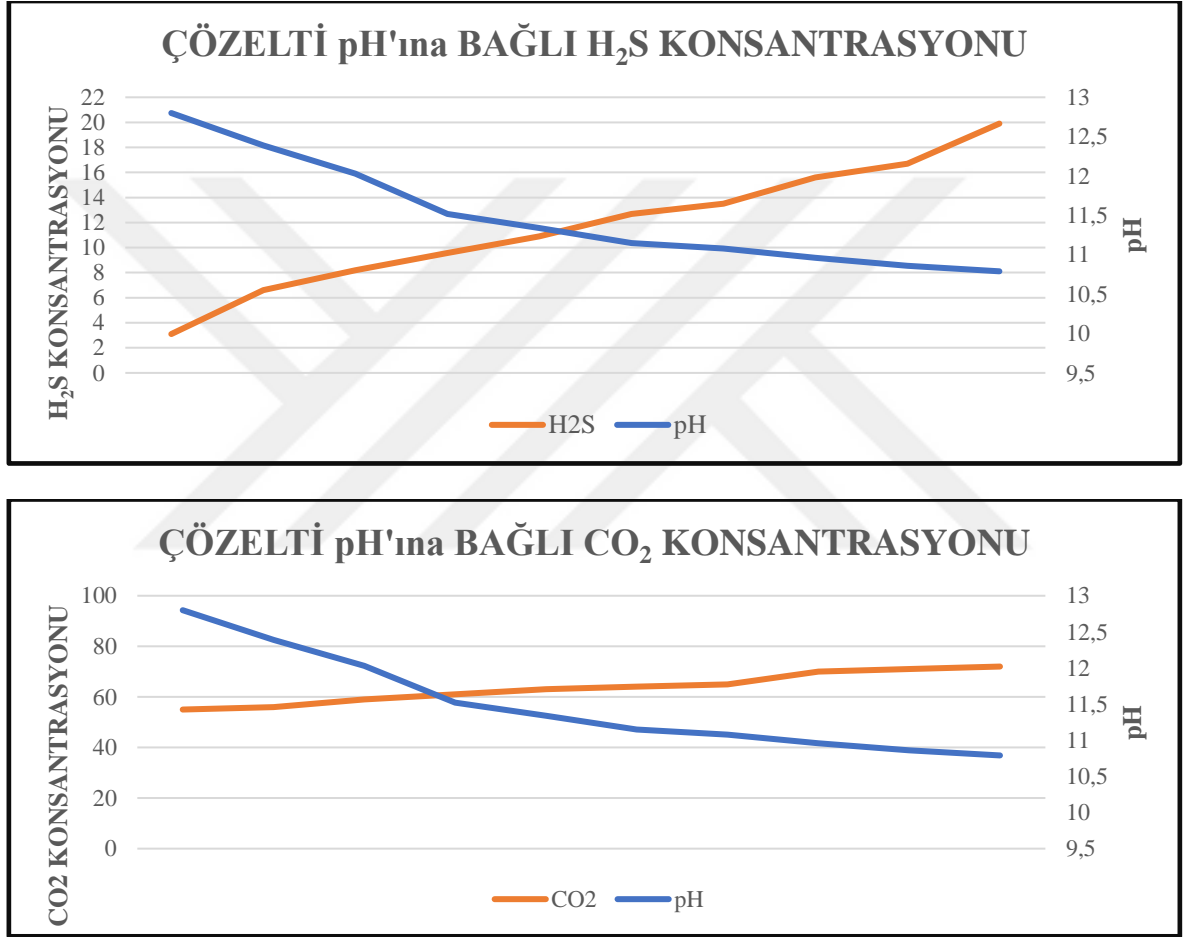
4.1. Alkanolamin Prosesi İçin Sonuçlar

Jeotermal elektrik üretimi sonucunda ortaya çıkan NCG gazlarından kükürtün eliminasyonu için önerilen proste Monoetanolamin (MEA), Dietanolamin (DEA), Diglycolamin (DGA), Metildietanolamin (MDEA) alkanolaminleri kullanıldı. Literatürde bu kapsamda benzer çalışmalara rastlanmıştır. Örneğin Yakıt gazdan kükürt giderimi için monoetanolamin, dietanolamin ve N, N' -dimetiletanolamin olmak üzere 3 farklı alkanolamin çözeltisi ile çalışıldığı bildirilmiştir (Huang, vd., 2007). Jeotermal santrallerde ortaya çıkan ve istenmeyen bu NCG gazlarının eliminasyonunda birden fazla alkanolamin çözeltisinin incelendiği ve kükürt gibi oldukça zararlı olan gaz bileşimini arıtmak için çalışmalar yürütülmüştür. Liu ve arkadaşlarının (2017) yürüttükleri çalışmada ise etanolamin/etanolamin asetat, etanolamin/etanolamin format, etanolamin/etanolamin propiyonat, etanolamin/etanolamin laktat, dietanolamin/dietanolamin asetat, trietanolamin/trietanolamin asetat ve N -metil dietanolamin/ N -metil dietanolamin asetat çözeltileri ile kükürt giderimini incelediklerini bildirmişlerdir. En iyi sonucu etanolamin/ etanolamin laktat çözeltisinde 2 saat boyunca neredeyse %100'e yakın kükürt giderim verim ile gerçekleştirdiklerini ifade etmişlerdir (Liu, vd., 20147). Burada yürütülen çalışmanın laboratuvar ölçekli olması ve küçük hacimde çalışmalarının da etkisi ile elde edilen verimin oldukça yüksek olduğu görülmektedir.

Alkanolamin prosesi için çözeltinin pH'sı incelenmiştir. 9,5-13 değişen pH aralığında ve 0-22 H_2S konsantrasyonu değerlerinde çalışmalar yürütüldü. Artan pH değerlerinde H_2S gideriminin de arttığı gözlemlendi. Elde edilen sonuçlar şekil 18'de verildi. Burada da görüldüğü üzere en yüksek H_2S giderimi pH 13 olduğu zaman 10,79 M'dır. Alkanolaim prosesinde H_2S 'in önemli bir miktarının giderilebileceği görüldü. Ancak yapılan hesaplarda büyük çaplı kurulacak bir sistemde yaklaşık olarak saatte 20 kg amin grubu kimyasal tüketileceği, bunun ise çok yüksek miktarlarda işletme maliyeti oluşturacağı hesaplanmıştır. Prosesin jeotermal sektörü için fizibil olmadığı kanaatine varılmıştır.

Wagener ve arkadaşları (2014), Güney Teksas'ta jeotermal enerji santralinde CO₂ yakalamak için alkonolamin prosesini incelediklerini ve bu bağlamda 30 yıldır yürüttükleri çalışmaların olumlu olduğunu bildirmişlerdir (Wagener, vd., 2014).

Çözelti pH'sına bağlı H₂S konsantrasyonu şekil 13'de verilmiştir.



Şekil 13. Çözelti pH'sına bağlı H₂S ve CO₂ konsantrasyonu. (a) H₂S; b) CO₂).

Umut vadeden alkonolamin prosesinde DEA, ve MDEA gibi alkonolaminlerin sulu çözeltilerden kükürt gideriminde aşağıdaki reaksiyonların etkin rol oynadığı bilinmektedir (Al-Baghli, vd., 2001; Al-Rashed, vd., 2012).

Su iyonizasyonu:



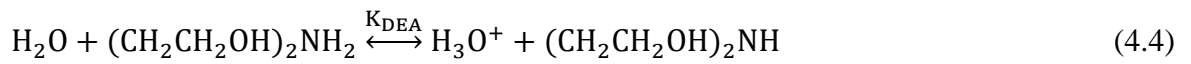
Hidrojen sülfürün ayrışması:



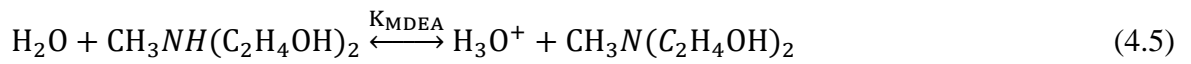
Bisülfitin ayrışması:



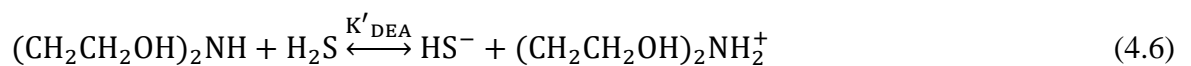
Protonlanmış DEA'nın ayrışması:

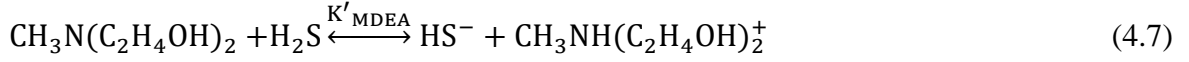


Protonlanmış MDEA'nın ayrışması:



Ayrıca sıvı filmed gaz ile absorbanlar arasında anında gerçekleşen aşağıdaki reaksiyonlar proton transferini içerir:

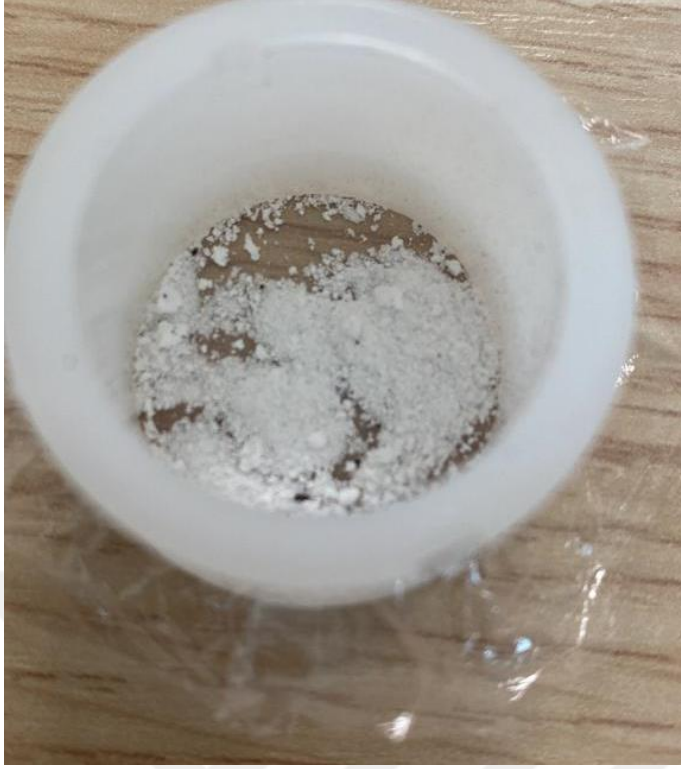




DEA alkanolaminin çok iyi bir hidrojen bağ alıcısıdır. DEA'nın kimyasal formülü $(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH})_2\text{NH}$ 'dir ve çok iyi bir hidrojen bağ alıcısı olduğu bilinir. $\text{S}-\text{H}\cdots\text{N}$ ve $\text{O}-\text{H}\cdots\text{S}$ etkili hidrojen bağlarının sayesinde başarıyla kükürt giderimini sağladığı bilinmektedir (Song, vd., 2019). Czajczyńska ve arkadaşları (2024), yürüttükleri çalışmada jeotermal kaynaklı ortaya çıkan kükürt gazının eliminasyonu için DEA alkanolaminin sağladığı hidrojen bağlarına dikkat çekmişlerdir. MDEA ise H_2S gideriminde karbondioksit ve karbonil sülfür ile yavaş reaksiyona girmesi sayesinde sergilediği seçici hidrojen sülfür giderimi ile yaygın olarak kullanılan diğer bir alkanolamindir (Zoghi, vd., 2022). Kimyasal formülü $\text{CH}_3\text{N}(\text{C}_2\text{H}_4\text{OH})_2$ olan MDEA'nın jenerasyon enerjisinin düşük maliyetli olması tercih edilmesinde diğer bir etkidir (Loo, vd., 2007).

4.2. Fenton Prosesi Sonuçları

Geotermal kaynaklı H_2S içeren gazın eliminasyonunda iki farklı teknik denenmiştir. Denen bu tekniklerin sülfür gideriminde etkinliği değerlendirilmiştir. Bu bağlamda yürütülen çalışmalardan öncelikle fenton prosesi ile H_2S giderimi incelendi. Yürütülen çalışma esnasında el tipi bir dedektörden yararlanıldı. Dedektör ile 0-200 ppm aralığında H_2S için ölçümler yürütüldü. Ancak çalışma aralığında dedektör ile yapılan ölçümler yetersiz kalmıştır. Bu nedenle filtrasyon sürecinde filtre kağıdında kalan malzemenin XRF ve elementel analiz sonuçları incelendi. Burada yürütülen çalışma sonucunda ne kadar H_2S 'in elimine edildiği gözlemlenmesi hedeflenmiştir. Çalışmada analizi yapılan filtre kağıdından alınan malzeme (FKM) şekil 14'de verilmiştir.



Şekil 14. Filtre kağıdında kalan malzeme.

Şekil 14’de verilen FKM’nin elemental analizi incelenmiştir. Yürütülen çalışmalar doğrultusunda elde edilen sonuçlar tablo 7’de görülmektedir. Burada gazın içerisinde başta kükürt olmak üzere Fe, Mg, K, Ca, Sn, Sb, Mn, Ta, W, V, Si, Al, Cr, Ba, Mo, Cd, Nb, Hg gibi elementlerin varlığı görülmektedir. Fenton prosesi sonucunda ağırlıkça %82,21±0,06 kükürt elementinin eliminasyonunun sağlandığı görüldü. Buna karşın sadece kükürt değil aynı zamanda silisyum (Si), mangan (Mn), krom (Cr, ve civa gibi (Hg) zararlı bileşenlerinde çok küçük miktarlarda olsa da elimine edildiği görüldü.

Tablo 7.

Elementel analiz sonuçları.

Element	S (%)	Fe (%)	Mg (%)	K (%)	Ca (%)
Kütlece içerik	82,21±0,06	2,58±0,029	2,55±0,389	0,58±0,01	0,54±0,007
Element	Sn (%)	Sb (%)	Mn (%)	Ta (%)	W (%)
Kütlece içerik	0,02±0,002	0,01±0,002	0,01±0,008	0,01±0,003	0,00±0,003

“Tablo 7’nin devamı”

Element	V (%)	Si (%)	Al (%)	Cr (%)	Ba (%)
Kütlece içerik	0,45±0,006	0,27±0,013	0,05±0,04	0,04±0,014	0,02±0,007
Element	Mo (%)	Cd (%)	Nb (%)	Hg (%)	Pb (%)
Kütlece içerik	0,00±0,001	0,00±0,002	0,00±0,001	0,00±0,001	0,00±0,001

Zhao ve arkadaşları (2014), 1,4- 2,6 ppm SO₂ konsantrasyonlarında çalıştıklarını bildirmişlerdir. Fenton reaktifi kullanıldığında %100 verimle SO₂’nin giderildiğini bildirmişlerdir.

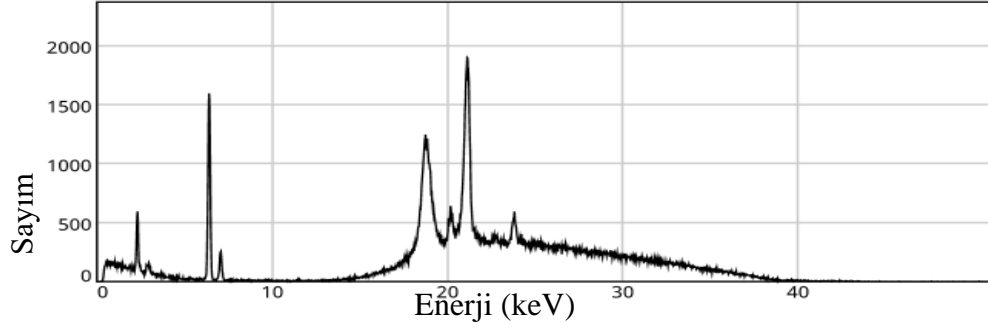
Hidrojen peroksit oluştuğunda H₂O₂ ve feröz demir (Fe(II)) reaksiyonu yolu ile hidroksil radikaller üretilmektedir. Denklem 4.8 ve 4.9’da bu reaksiyonlar verilmiştir.



Denklemlerde de görüldüğü üzere reaksiyonlar sonucunda fenton reaksiyonu, yani denklem 4.8, yüksek oranda çözünmeyen ferrik demirin (Fe(III)-oksidhidroksitlerin) çökmesine yol açabilir (Kocar, vd., 2003). Fe(III) daha sonra hızlı bir şekilde süperoksit ile reaksiyona girerek Fe(II) oluşturabilir ve bu da hızlı bir ROS dönüşümü sağlamaktadır. Fenton Kimyası ayrıca Haber-Weiss reaksiyonu olarak da bilinen hidrojen peroksit ve süperoksidin kimyasal bozunması ile de gerçekleşebilir. Sülfür açısından zengin sularda hidrojen peroksit düşük pH’larda elementler kükürt oluşturmak için hidrojen sülfür ile reaksiyona girer (Hoffman, M.R., 1997).



Fenton prosesi sonucunda elde edilen çözeltinin XRF analiz sonucu şekil 15’de verilmiştir. XRF analiz sonuçlarında kükürtte bağlı keskin pikler görülmüştür. Burada gözlemediğimiz sonuçlar sadece laboratuvar ölçekli olarak yürütülmüştür. Elde edilen yüksek S giderme verimi, oldukça heyecan vericidir. Bu nedenle ileriki başlıklarda verilmiş olan fenton prosesinin endüstriyel ölçekli de denemeleri uygulandı.

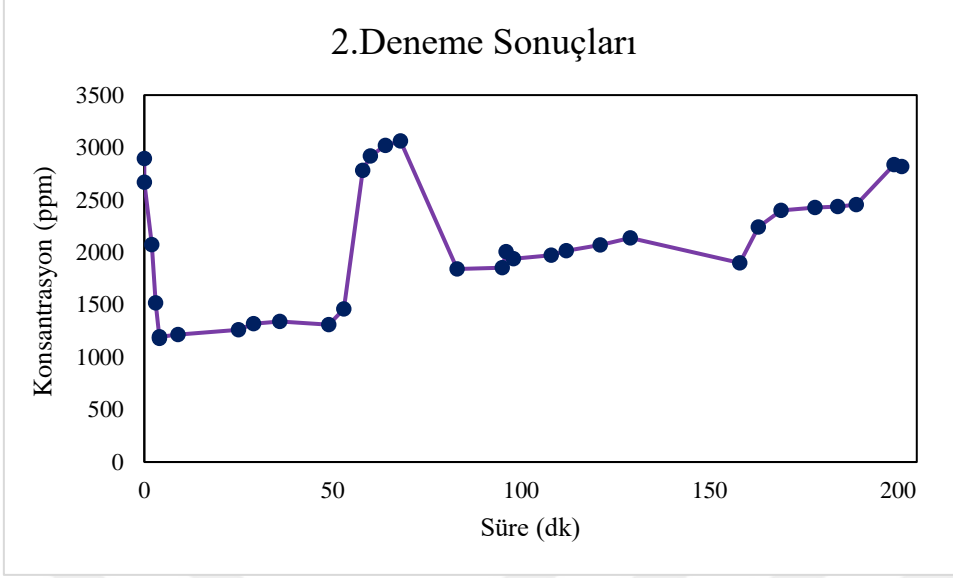


Şekil 15. XRF analiz sonucu.

4.3. Endüstriyel Boyuttaki Eliminasyon Sonuçları

Jeotermal’de ortaya çıkan yoğunlaşmayan gazların (NCG) içerisinde kükürtün eliminasyonunda endüstriyel olarak 3 deneme uygulanmıştır. İlk denemede NCG gazının debisi $468 \text{ m}^3/\text{st}$ olarak hesaplanmıştır. Sisteme kimyasal beslemesi toplam sekiz kere uygulanmıştır ve hazırlanan 750 L’lik kimyasal her geçişinde 90 L/dk pompa debisi ile sisteme verilmiştir. Sisteme beslenen kimyasalın her geçişinin ortalama 8,3 dk sürdüğü gözlemlenmiştir.

İkinci denemede sistem 3 st boyunca çevrim yapmıştır. Bu deneme sonucunda gazın ortalama hızının 12,6 m/s olduğu görülmüştür. İkinci deneme sonucunda ayrıca sistemde yaklaşık 75 L/dk’lık karışımın beslenmesi gerekmiştir. Şekil 16’da Fenton prosesi için 2. Deneme sonuçları verilmiştir. Hazırlanan sisteme 75 L/dk’lık hacimsel debi ile kimyasal karışımın beslenmesi sonucunda elde edilen verilerin grafiği görülmektedir.



Şekil 16. Fenton prosesi 2. Deneme sonuçları.

Şekil 16'da 0-180 dk arasında 0-3500 ppm aralığındaki H₂S konsantrasyonunun değişimi görülmektedir. Şekilde kimi noktalarda sülfür konsantrasyonu azalırken kimi noktalarda artış görülmektedir. İlk sisteme NCG gazı beslendiğinde kükürtün büyük bir hızla elimine edildiği gözlemlenmiştir. 4 dk içerisinde yaklaşık %60 kükürt eliminasyonu ile oldukça iyiye giden bir eliminasyon süreci başarıyla gerçekleşmiştir. Ancak devam eden süre zarfında yaklaşık 1 saat sonra kükürt konsantrasyonunda yavaşta olsa bir artış görülmektedir. Bu artış bizlere yeterince kükürtün elimine edilmediğini göstermektedir. Öyleki 68 dk sonra 3061 ppm konsantrasyonunda kükürt içeriği ile pik noktasına ulaşmıştır. Bu nokta sistemde meydana gelen arıza kaynaklı kimyasal beslemesi durdurulmuştur. Meydana gelen arızanın sistem dalgıç pompalarının yetersiz gelmesinden kaynaklandığı görülmüştür. Pompanın yeterince kimyasal basımını sağlayamaması nedeniyle stok tanklarında taşma meydana gelmemesi için kimyasal basımı durdurulmuştur. Buna bağlı olarak da çıkış gazındaki H₂S konsantrasyonunun yükseldiği görülmüştür. 68 ile 58. Dakikalar arasında kükürtün konsantrasyonunda düşüş görülmektedir. Bu düşüşün sebebi arızanın giderilmesi sonucunda eliminasyonun artmasıdır. Devam eden süreçte 158. Dakikada tekrar bir pH ayarlamasına gidildiği ve buna bağlı olarak da kükürtün konsantrasyonunun tekrardan ciddi bir artışa geçtiği görülmüştür. Son olarak sistemin durdurulması sonucunda H₂S konsantrasyonu 2837 ppm'den 1200 ppm'e kadar düştüğü görülmüştür.

Fenton prosesinin üç saatlik çevrimi sonucunda 2,65 kg H₂S'in sistem içerisinde geçtiği hesaplanmıştır. Bu miktara karşılık ortalama 930(ortalama 1000 ppm) gram H₂S'in kimyasala absorplandığı çıkan sonuçlardan hesaplanmıştır. Buna karşılık sistemde toplam 9400 kg kimyasal karışım kullanılmıştır. Kullanılan 9400 kg'lık kimyasalın yaklaşık bir kg H₂S ile doymuş hale gelerek sınır değerlerin üzerinde emisyonuna sebep olduğu görülmüştür.

Yapılan koagülasyon ve filtrasyon işlemleri sonrası kükürt elde edilememiştir. Nedeninin ise kimyasal miktarının fazla olması kaynaklı filtrasyon işlemlerinin yeterli gelmemesi olduğu düşünülmektedir. Fe⁺²'nin yeterli oksijen ile Fe⁺³ yükseltgenememesi sonucu redox potansiyelinin (-50/-150) aşılması kükürtün demir ile birleşerek FeS olarak çöktüğü düşünülmektedir. Bunun yanı sıra redox potansiyeli aşılmış olmasa dahi çok yüksek kütleli kimyasal(9400 kg) içerisinde eser miktardaki (~ 1 kg) kükürtün ayrıştırılması ayrı bir sorun teşkil etmektedir.

Üç saatlik çevrim sonucunda ortalama 1000 ppm'lik giderim olduğu bununda %35 verimliliğe tekabül ettiği hesaplanmıştır. Kurulan sistemin el verdiği kapasitenin maksimum noktasında elde edilen verimin yeterli olmadığı görülmüştür. Sistemde kimyasal kullanımı artırılarak verim yükseltilebilir ancak bu noktada kimyasal maliyeti prosesin fizibilitesini oldukça düşürdüğü görülmüştür. 9400 kg'lık kimyasalın hazırlanması için harcanması gereken tutarın %35'lik bir verim için oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Verimin artırılması maliyetin artması anlamına gelmektedir. Ayrıca ekstra sistem yatırım maliyetide olacaktır.

BEŞİNCİ BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

Jeotermal Enerji Üretimi sonucunda ortaya çıkan yoğuşmayan gazlar, çevre ve ekosistemimiz için oldukça zararlıdır. Bu bağlamda ortaya çıkan gazlar DSÖ tarafından belirli oranlarda kükürt içeriğine sahip olması gerektiği için önlemler alınmaktadır. Bu kapsamda yürütmüş olduğumuz tezde H₂S içeren aatık gazın eliminasyon çalışmaları için iki adet proses denenmiştir. Bunlardan ilki Alkanolamin prosesi ikincisi ise Fenton prosesidir. Alkanolamin prosesi yaygın olarak bilinen ve H₂S gideriminde etkinliği kanılanan bir prosestir. Bu çalışmada Monoetanolamin (MEA), Dietanolamin (DEA), Diglycolamin (DGA), Metildietanolamin (MDEA) çözeltileri kullanılmaktadır ve MEA'nın maliyeti düşük olduğu için H₂S gideriminde tercih edilmiştir.

Laboratuvar ölçekli yürütülen denemeler sonucunda H₂S'in 2837 ppm'den 1200 ppm'e kadar düşürüldüğü gözlemlendi. Buna karşın endüstriyel olarak yürütülen fenton prosesinde ise %35 verim elde edilmiştir. Endüstriyel uygulamalar sonucunda ise üç saatlik çevrim sonucunda ortalama 1000 ppmlik giderim olduğu bununda %35 verimliliğe tekabül ettiği hesaplanmıştır.

KAYNAKÇA

- Aguilar-Dodier, L.C., Castillo, J.E., Quintana, P.J.E., Motoya, L.D., Molina, L.T., Zavala, M., Almanaza-Veloz, V., Rodríguez-Ventura, J.G. (2020). "Spatial and temporal evaluation of H₂S, SO₂ and NH₃ concentrations near Cerro Prieto geothermal power plant in Mexico." *Atmospheric Pollution Research*, 11(1), 94-104.
- Aksoy, N. (2013). "Jeotermal kaynaklı elektrik üretimi", *11.Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, 17-20 Nisan 2013, MMO Tepekule Kongre ve Sergi Merkezi, İzmir, 10-15.
- Aksoy, N. (2014). "Power generation from geothermal resources in Turkey. Renewable Energy." *Renewable Energy*, 68, 595-601.
- Aksoy, N., Gök, Ö., Mutlu, H., Kılıç, G. (2017). "Jeotermal Santrallarda Karbon Emisyonu ve Tutumu, TMMOB makina mühendisleri odası", *13. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, 19-22 Nisan 2017, TMMOB, İzmir. 168-178.
- Al-Baghli, N. A., Pruess, S. A., Yesavage, V. F., Selim, M. S. (2001). "A rate-based model for the design of gas absorbers for the removal of CO₂ and H₂S using aqueous solutions of MEA and DEA." *Fluid phase equilibria*, 185(1-2), 31-43.
- Al-Baghli, Nadhir, A., Pruess, S.A., Yesavage, V.F. ve Selim, M.S. (2001). "A rate-based model for the design of gas absorbers for the removal of CO₂ and H₂S using aqueous solutions of MEA and DEA." *Fluid phase equilibria*, 1(2), 31-43.
- Aliabad, Z., Mirzaei, H. (2009). "Design & Operation of a Selective Sweetening Plant Using MDEA", *Bryan Research & Engineering*, 3(1), 50-59.
- Al-Rashed, O. A., Ali, S. H. (2012). "Modeling the solubility of CO₂ and H₂S in DEA–MDEA alkanolamine solutions using the electrolyte–UNIQUAC model." *Separation and purification technology*, 94, 71-83.
- Arslan, S., Darıcı, M., Karahan, Ç. (2001). "Türkiye'nin jeotermal enerji potansiyeli". *Jeotermal Enerji Semineri*, 21-27.
- Azizi, M., Biard, P.-F., Couvert, A., Amor, M.B. (2015). "Competitive kinetics study of sulfide oxidation by chlorine using sulfite as reference compound." *Chemical Engineering Research and Design*, 94, 141-152.

- Bandosz, T. J. ve Q. Le. (1998). "Evaluation of surface properties of exhausted carbons used as H₂S adsorbents in sewage treatment plants." *Carbon*, 36(1-2), 39-44.
- Blaschette, A. (1971). "Über Peroxoverbindungen. X. Zur Existenz von Peroxosilicat-Anionen in wässriger Lösung: Spezifische Katalyse der Peroxidspaltung von Benzil." *Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie*, 384(2), 177-183.
- Busca, Guido ve Chiara Pistarino. (2003). "Technologies for the abatement of sulphide compounds from gaseous streams: a comparative overview." *Journal of loss prevention in the process industries*, 16(5), 363-371.
- Calderon, A.T., Pampa-Quispe, N.B., Huaranga, M.A.C. (2022). "Adsorption Of Hydrogen Sulfide By Activated Carbon Produced By Regeneration Of Sludge From Upflow Anaerobic Sludge Blanket." *Engineering for Rural Development*, 5, 138-145.
- Canik, Baki, Mehmet Çelik ve Zafer Arıgün. (2000). *Jeotermal enerji*. A.Ü.F.F Döner Sermaye İşletmesi Yayınları: Ankara.
- Cleeton, C., Kvam, O., Rea, R., Sarkisov, L., De Angelis, M.G. (2020). "Competitive H₂S-CO₂ absorption in reactive aqueous methyldiethanolamine solution: Prediction with ePC-SAFT". *Fluid Phase Equilibria*, 511, 112453–112468.
- Czajczyńska, D., Krzyżyńska, R., Ghazal, H., & Jouhara, H. (2024). "Experimental investigation of waste tyres pyrolysis gas desulfurization through absorption in alkanolamines solutions." *International Journal of Hydrogen Energy*, 52, 1006-1014.
- D'Alessandro, W., Aiuppa, A., Bellomo, S., Brusca, L., Calabrese, S., Kyriakopoulos, K., Longo, M. (2013). "Sulphur-gas concentrations in volcanic and geothermal areas in Italy and Greece: Characterising potential human exposures and risks." *Journal of Geochemical Exploration*, 131, 1-13.
- Deshmukh, G. M., Shete, A. ve Pawar, D.M., (2012). "Oxidative Absorption of Hydrogen Sulfide using Iron-chelate Based Process: Chelate Degradation", *Journal of Analytical & Bioanalytical Techniques*, 88(3), 432-436.
- Devulapelli, V.G., Demessie, E.S. (2008). "Catalytic oxidation of dimethyl sulfide with ozone: Effects of promoter and physico-chemical properties of metal oxide catalysts". *Applied Catalysis A: General*, 348(1), 86-98.

- Dong, H., Wang, B., Hao, X., Wang, J., Xu, Z., Zhao, W. (2024). "Kinetic and thermodynamic analysis of H₂S absorption by a non-aqueous absorbent of monoethanolamine/ethylene glycol." *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(5), 114021.
- Durmaz, E. (2010). Afşin-Elbistan Termik Santrali çevresinde yaşayan bireylerde termik santralden kaynaklanan toksik maddelere maruziyete bağlı olası genotoksik risklerin comet ve kromozom aberasyonu yöntemleriyle saptanması, Yayınlanmış Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ankara.
- El Brahmi, A., and S. Abderafi. (2023). "Performance of hydrogen peroxide 35% treatment for sulfide mitigation in sanitary sewers: sewage characterization and response surface methodology." *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(2), 2127-2140.
- ETKB, (2022). Jeotermal. <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-jeotermal#:~:text=T%C3%BCrkiye'nin%20muhtemel%20jeotermal%20%C4%B1s%C4%B1,4500%20MWe%20olarak%20tahmin%20edilmektedir> (17.12.2024)
- Fakhraian, H., Valizadeh, F. (2010). "Activation of hydrogen peroxide via bicarbonate, sulfate, phosphate and urea in the oxidation of methyl phenyl sulfide." *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 333(1-2), 69-72.
- Gallup, D. L. (2003). "Simultaneous hydrogen sulfide abatement and production of acid for scale control and well stimulation". *International Geothermal Conference*, Orkustofnun, İzlanda, 14-17 Aralık 2003, 10-15.
- Ghiasi, M.M., Mohammadi, A.M. (2014) "Rigorous modeling of CO₂ equilibrium absorption in MEA, DEA, and TEA aqueous solutions." *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 18, 39-46.
- Haji-Sulaiman, M. Z., Aroua, M.K., Benamor, A. (1998). "Analysis of equilibrium data of CO₂ in aqueous solutions of diethanolamine (DEA), methyldiethanolamine (MDEA) and their mixtures using the modified Kent Eisenberg model." *Chemical engineering research and design*, 76(8), 961-968.

- Hirai, M., Kamamoto, M., Yani, M., Shoda, M. (2001). "Comparison of the biological H₂S removal characteristics among four inorganic packing materials." *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 91(4), 396-402.
- Hoffmann, M. R. (1977). "Kinetics and mechanism of oxidation of hydrogen sulfide by hydrogen peroxide in acidic solution." *Environmental science & technology*, 11(1), 61-66.
- Huang, C., Xu, T., Yang, X. (2007). "Regenerating fuel-gas desulfurizing agents by using bipolar membrane electro dialysis (BMED): effect of molecular structure of alkanolamines on the regeneration performance." *Environmental science & technology*, 41(3), 984-989.
- Huertas, J.I., Giraldo, N. ve Izquierdo, S., (2011), "Removal of H₂S and CO₂ from Biogas by Amine Absorption". J. Markoš (ed.). *Mass Transfer in Chemical Engineering Processes*. (pp. 133-148). IntechOpen yayınları, Mexico.
- International Renewable Energy Agency (IRENA), 2024. *Renewable Capacity Statistics 2024*. <https://www.irena.org/> (Erişim Tarihi: 25.12.2024)
- Jin, Y., Veiga, M. C., Kennes, C. (2005). "Autotrophic deodorization of hydrogen sulfide in a biotrickling filter." *Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental & Clean Technology*, 80(9), 998-1004.
- Kagel, A., Karl G. (2005). "Promoting geothermal energy: air emissions comparison and externality analysis." *The Electricity Journal*, 18(7), 90-99.
- Kasulla, S., Malik, S.J., Zafar, S., Saraf, A. (2021) "A Retrospection of Hydrogen Sulphide Removal Technologies in Biogas Purification." *IJTSRD*, 5(3), 857-863.
- Katherine, G.C. (2017). Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC). <https://www.better.cl/wp-content/uploads/2018/06/Newsbetter-Sistemas-Sectoriales-RETC-Junio-2018.pdf> (Erişim Tarihi: 25.12.2024)
- Klok, J. B., de Graaff, M., van den Bosch, P. L., Boelee, N. C., Keesman, K. J., Janssen, A. J. (2013). "A physiologically based kinetic model for bacterial sulfide oxidation." *Water research*, 47(2), 483-492.

- Kocar, B. D., Inskeep, W. P. (2003). "Photochemical oxidation of As (III) in ferrioxalate solutions." *Environmental science & technology*, 37(8), 1581-1588.
- Koç, E. ve Kaya, K. (2015) "Enerji kaynakları–yenilenebilir enerji durumu." *Mühendis ve Makine*, 56(668), 36-47.
- Koç, E., Şenel, M. C. (2013). "Dünyada ve Türkiye’de Enerji Durumu–Genel Değerlendirme," *Mühendis ve Makina Dergisi*, 54(639), 32-44.
- Krischan, J., Makaruk, A. ve Harasek, M., (2012). "Design and scale-up of an oxidative scrubbing process for the selective removal of hydrogen sulfide from biogas", *Journal of Hazardous Materials*, 215-216, 49-56.
- Li, L., Chen, Z. M., Zhang, Y.H., Zhu, T., Li, J.L., Ding J. (2006). "Kinetics and mechanism of heterogeneous oxidation of sulfur dioxide by ozone on surface of calcium carbonate." *EGU*, 6(9), 2453-2464.
- Litvinenko, S. L., Lobachev, V. L., Dyatlenko, L. M., Turovskii, N. A. (2011). "Quantum-chemical investigation of the mechanisms of oxidation of dimethyl sulfide by hydrogen peroxide and peroxoborates." *Theoretical and Experimental Chemistry*, 47, 2-8.
- Liu, K., Chang, H., Xiong, G., He, J., Liu, Q., & Li, J. (2021). "Modeling CO₂, H₂S, COS, and CH₃SH Simultaneous Removal Using Aqueous Sulfolane–MDEA Solution." *Processes*, 9(11), 1954.
- Liu, X., Li, J., Wang, R. (2017). "Study on the desulfurization performance of hydramine/ionic liquid solutions at room temperature and atmospheric pressure." *Fuel Processing Technology*, 167, 382-387.
- Liu, Y., Wang, Y. (2019). "Removal of gaseous hydrogen sulfide by a photo-Fenton wet oxidation scrubbing system." *Energy & Fuels*, 33(11), 10812-10819.
- Loo, V.S., Elk, E.P.V., Versteeg, G.F. (2007). "The removal of carbon dioxide with activated solutions of methyl-diethanol-amine." *Journal of petroleum science and Engineering*, 55(1-2), 135-145.

- Mandal, B.P., Bandyopadhyay, S.S. (2005). "Simultaneous absorption of carbon dioxide and hydrogen sulfide into aqueous blends of 2-amino-2-methyl-1-propanol and diethanol amine". *Chemical Engineering Science*, 60, 6438-6451.
- Mandal, Bishnu P., A. K. Biswas, S. S. Bandyopadhyay. (2004). "Selective absorption of H₂S from gas streams containing H₂S and CO₂ into aqueous solutions of N-methyldiethanolamine and 2-amino-2-methyl-1-propanol." *Separation and Purification Technology*, 35(3), 191-202.
- Manzella, A., Bonciani, R., Allansdottir, A., Botteghi, S., Donato, A., Giamberini, S., Lenzi, A., Paci, M., Pellizzone, A., Scrocca, D. (2018). "Environmental and social aspects of geothermal energy in Italy." *Geothermics*, 72, 232-248.
- Martín, Sandra E., and Laura I. Rossi. (2001). "An efficient and selective aerobic oxidation of sulfides to sulfoxides catalyzed by Fe (NO₃)₃-FeBr₃." *Tetrahedron Letters*, 42(41), 7147-7151.
- Mostbauer, P., Lombardi, L., Oliveri, T. ve Lenz, S., (2014). "Pilot scale evaluation of the BABIU process – Upgrading of landfill gas or biogas with the use of MSWI bottom ash", *Waste Management*, 34(1), 125-133.
- Nyairo, Beatrice Kerubo. (2018). Modeling H₂S Dispersion from Proposed Menengai Geothermal Powerplant. Unpublished Master thesis, Dedan Kimathi University of Technology Official Repository, Nyairo.
- Park, J. Y., Yoon, S. J., Lee, H., Yoon, J. H., Shim, J. G., Lee, J. K., Min, B.Y., Eum, H.M., Kang, M. C. (2002). "Solubility of carbon dioxide in aqueous solutions of 2-amino-2-ethyl-1, 3-propanediol." *Fluid phase equilibria*, 202(2), 359-366.
- Peralta, O., Castro, T., Durón, M., Salcido, A., Celada-Murillo, A. T., Navarro-González, R., Márquez, C., García, J., Rosa, J., Torres, R., Villegas-Martínez, R., Sierra, S.C., Imaz, M., Martínez-Arroyo, A., Saavedra, I., Espinosa, M.L., Jaramillo, A.T. (2013). "H₂S emissions from Cerro Prieto geothermal power plant, Mexico, and air pollutants measurements in the area." *Geothermics*, 46, 55-65.
- Popiel, S., Witkiewicz, Z., Chrzanowski, M. (2008). "Sulfur mustard destruction using ozone, UV, hydrogen peroxide and their combination." *JHM*, 153(1-2), 37-43.

- Raju, B. R., Sarkar, S., Reddy, U. C., Saikia, A. K. (2009). "Cerium (IV) triflate-catalyzed selective oxidation of sulfides to sulfoxides with aqueous hydrogen peroxide." *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 308(1-2), 169-173.
- Raju, B. R., Sarkar, S., Reddy, U. C., Saikia, A. K. (2009). "Cerium (IV) triflate-catalyzed selective oxidation of sulfides to sulfoxides with aqueous hydrogen peroxide." *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 308(1-2), 169-173.
- Ramakrishna, C., Krishna, R., Bijendra Saini, T., Gopi, T., Swetha, G., Chandra Shekar, S. (2016). "A simple and controlled oxidative decontamination of sulfur mustard and its simulants using ozone gas." *Phosphorus, Sulfur, and Silicon and the Related Elements*, 211(7), 965-970.
- Richardson, D.E., Yao, H., Frank, K.M., Bennet, D.A. (2000) "Equilibria, kinetics, and mechanism in the bicarbonate activation of hydrogen peroxide: oxidation of sulfides by peroxymonocarbonate." *Journal of the American Chemical Society*, 122(8), 729-1739.
- Ruff, F., Jalsovszky, I., Szabó, D., Rábai, J., Farkas, Ö., Kucsman, Á. (2013). "Mechanism for the reactions of sulfides and sulfoxides with hypochlorites: racemization and oxygen exchange of oxysulfonium salts and sulfoxides." *Journal of Physical Organic Chemistry*, 25(12), 1086-1096.
- Sarperi, L., Surbrenat, A., Kerihunel, A. ve Chazarenc, F., (2014). "The use of an industrial by-product as a sorbent to remove CO₂ and H₂S from biogas", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2, 1207-1213.
- Segundo, I.D.B., Gomes, A.I., Zouza-Chaves, B.M., Park, M., do-Santos, A.B., Boaventura, R.A.R., Moreira, F.C., Silva, T.F.C.V., Vilar, V.J.P. (2021). "Incorporation of ozone-driven processes in a treatment line for a leachate from a hazardous industrial waste landfill: Impact on the bio-refractory character and dissolved organic matter distribution." *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105554.
- Sergienko, N., Lumbaque, E.C., Radjenovic, J. (2023). "(Electro) catalytic oxidation of sulfide and recovery of elemental sulfur from sulfide-laden streams." *Water Research*, 245, 120651.

- Shen, Keh Perng, and Meng Hui Li. (1992). "Solubility of carbon dioxide in aqueous mixtures of monoethanolamine with methyldiethanolamine." *Journal of chemical and Engineering*, 37(1), 96-100.
- Smith, J. R. L., Murray, J., Walton, P. H., Lowdon, T. R. (2006). "Organosulfur oxidation by hydrogen peroxide using a dinuclear Mn-1, 4, 7-trimethyl-1, 4, 7-triazacyclononane complex." *Tetrahedron letters*, 47(12), 2005-2008.
- Song, X., Zhang, Y., Wu, C., Sheng, X., Zhao, H. (2019). "Exploration of H₂S capture by alkanolamines." *Structural Chemistry*, 30, 2419-2428.
- Sreeramamurthy, R. ve P. G. Menon. (1975). "Oxidation of H₂S on active carbon catalyst." *Journal of Catalysis*, 37(2), 287-296.
- Vakili, M., Gholami, Z. ve Gholami, F., (2012). "Removal of Hydrogen Sulfide from Gaseous Streams by a Chemical Method using Ferric Sulfate Solution", *World Applied Sciences Journal*, 19, 241-245.
- Wagener, D.H., Gupta, A., Rochelle, G.T., Bryant, S.L. (2014). "Amine Solvent Regeneration for CO₂ Capture Using Geothermal Energy with Advanced Stripper Configurations." *Oil & Gas Science and Technology-Revue d'IFP Energies nouvelles*, 69 (6), 1105-1119.
- Wang, T., El Ahmar, E., Coquelet, C., Kontogeorgis, G. M. (2018). "Improvement of the PR-CPA equation of state for modelling of acid gases solubilities in aqueous alkanolamine solutions." *Fluid Phase Equilibria*, 471, 74-87.
- Yousefi, H. (2019). "Fenton Oxidation of Hydrogen Sulfide in Wastewater Treatment", *International Journal of Chemical Engineering*.
- Yousefi, H., "Fenton Oxidation of Hydrogen Sulfide in Wastewater Treatment", *International Journal of Chemical Engineering*, 2019
- Zare Aliabad, H., and S. Mirzaei. (2009). "Removal of CO₂ and H₂S using aqueous alkanolamine solutions." *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 49(1), 194-203.

Zhang, D., Fu, L., Liu, H., Li, H., Wang, S., Zhang, M., Zhu, M., Shang, L. (2024) “High-efficiency leaching of chalcopyrite by ozone with ultrasonic promotion: Kinetics and mechanism.” *Journal Of Molecular Liquids*, 401, 124682.

Zhao, Y., Wen, X., Guo, T., Zhou, J. (2014). “Desulfurization and denitrogenation from flue gas using Fenton reagent.” *Fuel processing technology*, 128, 54-60.

Zoghi, A. T., Shokouhi, M., Naderi, F., Abbasghorbani, M., Fatehi, A., Pouladi, B., Adhami, M. A. (2022). “Investigation of aqueous diethanolamine performance in prediction of hydrogen sulfide and carbonyl sulfide removal from liquefied propane.” *Journal of Solution Chemistry*, 51(1), 84-96.

