

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PALL HALKASI ENTEGRE EDİLMİŞ TEK KADEMELİ GAZ
YIKAYICILARIN İNORGANİK GAZLARIN TUTUMUNDAKİ
ETKİNLİKLERİNİN İNCELENMESİ

DİLAY SEVER TOSUN

KOCAELİ 2024

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**PALL HALKASI ENTEGRE EDİLMİŞ TEK KADEMELİ GAZ
YIKAYICILARIN İNORGANİK GAZLARIN TUTUMUNDAKİ
ETKİNLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

DİLAY SEVER TOSUN

Prof. Dr. Bilge ÖZBAY
Danışman, Kocaeli Üniv.

.....

Prof. Dr. Aykan KARADEMİR
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

.....

Doç. Dr. Zehra BOZKURT
Jüri Üyesi, Gebze Üniv.

.....

Tez Savunulduğu Tarih: 24.01.2024

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmada,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

☒ Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

☐ Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler tarafından no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

.....
(İmza)

Dilay SEVER TOSUN

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamının veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.

Tezin/Projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izni alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yüksek Öğretim Kurulu tarafından yayınlanan **“Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sistemi'nde erişime açılır.

- ☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- ☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.
- ☒ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

.....
(İmza)

Dilay SEVER TOSUN

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Endüstriyel hava kirliliği, fabrikalar, madenler veya taşımacılık nedenli havaya zararlı kimyasallar ya da partiküllerin atmosfere yayılmasıyla oluşur. Bu kirleticiler, kanserler, solunum yolu hastalıkları, akciğer fonksiyonlarında azalma ya da astım gibi sağlık sorunlarına neden olabilir. Ayrıca çevreye zarar vererek asit yağmuru ve iklim değişikliği gibi durumlara yol açabilirler.

Endüstriyel tesislerden kaynaklı, engellenemez kirleticiler var olduğu sürece, ortaya çıkan hava kirliliğini ancak onu daha az zararlı bir forma dönüştürerek azaltmaya çalışabiliriz. Havada belirli bir kirlilik türü tespit edildiğinde genellikle üç ana bölüm ortaya çıkar. İlk olarak; kirlilik tipi, ikinci olarak; kirliliği ortadan kaldıracak teknoloji, son olarak; kirlilik azaltım maliyetleridir.

Tez çalışmam, bu konulara cevap sunabilmek için hazırlanmıştır. Çalışmamda lastik, kimya, gıda, galvaniz ve havacılık sektörlerinde endüstriyel üretimlerden kaynaklı amonyak, hidroklorik asit, hidroflorik asit, nitrik asit, sülfürik asit ve fosforik asit gibi atmosfere ve çevreye zarar verebilecek olan inorganik gaz ve buharların giderimi incelenmiştir.

Belirtilen gaz ve buharların giderimi, gaz arıtma teknolojilerinden olan gaz yıkama sistemleriyle gerçekleştirilmiştir. Tek kademeli gaz yıkama sistemine dolgu malzemelerinden pall halkası entegre edilmiştir. Farklı debi, özellik ve kapasitelerdeki toplamda altı adet pall halkası entegre edilmiş gaz yıkama kuleleri tasarımı, boyutlandırması yapıp, ekipmanlarıyla birlikte ünitenin kirlilik giderimi veya azaltımı sonuçlarla ifade edilmiştir. Belirtilen inorganik gaz ve buharların arıtılması incelenmiştir.

Araştırılan, farklı debi, özellik ve kapasitelerdeki toplamda altı adet pall halkası entegre edilmiş gaz arıtma sisteminin her biri için yatırım ve işletme maliyetleri değerlendirilmiştir.

Çalışma sürecimde, yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen başta danışman hocam Prof. Dr. Bilge ÖZBAY'a saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte ve hayatım boyunca yanımda olup, verdiğim her kararda maddi ve manevi destek veren canım ailem; Cenk TOSUN, Kadir SEVER, Songül SEVER ve Eren SEVER'e sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Ocak – 2024

Dilay SEVER TOSUN

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ.....	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
TABLolar DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	viii
ÖZET.....	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1. Dolgu Malzemeli Gaz Yıkayıcılar	3
2.1.1. Çalışma Prensibi	3
2.2. Dolgu Malzemeli Gaz Yıkayıcı Çeşitleri	5
2.2.1. Karşı Akımlı Dolgu malzemeli Gaz Yıkayıcı.....	6
2.2.2. Çapraz Akımlı Dolgu Malzemeli Gaz Yıkayıcı.....	7
2.3. Gaz Yıkayıcı Bileşenleri.....	8
2.3.1. Dolgu Malzemesi	8
2.3.2. Damla Tutucu.....	9
2.3.3. Radyal Fan	10
2.3.4. Pompalar ve Boru Sistemleri	11
2.4. Gaz Yıkayıcı Kontrol Enstrümanları	12
2.4.1. Gaz Sıcaklığı Ölçümü	12
2.4.2. Sıvı Debisi Ölçümü.....	12
2.4.3. Sıvı Basıncı Ölçümü	13
2.4.4. Sıvı Ph Ölçümü	13
2.4.5. Statik Basıncı Düşümü Ölçümü	13
2.5. Dolgu Malzemeli Gaz Yıkayıcı Verimliliği	13
2.5.1. Verimliliği Etkileyen Faktörler	14
2.5.1.1. Sıvı Dağılımı	14
2.5.1.2. Sirkülasyon Sıvısı.....	15
2.5.1.3. Dolgu Yüksekliği	15
2.5.1.4. Sıvı Debisi	17
2.5.1.5. Sıcaklık.....	17
2.5.1.6. Yapı Malzemesi.....	18
2.5.1.7. Dolgu Malzemesi	18
2.5.1.8. Sıvı Gaz Oranı	19
2.5.1.9. Bakım	19
2.6. Dolgu Malzemeli Gaz Yıkayıcı Üzerine Bilimsel Araştırmalar.....	20
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	24
3.1. Gaz Yıkama Üniteleri Araştırmasında Kullanılan Sektörler	25
3.1.1. Lastik Sektörü	25
3.1.2. Galvaniz Sektörü.....	26
3.1.3. Kimya Sektörü	27
3.1.4. Havacılık Sektörü.....	27
3.1.5. Gıda Sektörü	28

3.2. Pall Halkası.....	28
3.3. Pall Halkası Entegre Edilmiş Gaz Yıkama Kulesi Tasarımı	29
3.4. İncelenen İnorganik Gazlar ve Özellikleri.....	39
3.5. İnorganik Gazların Ölçüm Yöntemleri	39
3.6. Pall Halkaları Entegre Edilmiş Gaz Yıkayıcı Verimliliği	40
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	42
4.1. Pall Halkası Entegre Edilmiş Gaz Yıkama Kulesi Boyutlandırılması.....	42
4.1.1. Lastik Sektörü Gaz Yıkama Kulesi Boyutları.....	42
4.2. İnorganik Gazların Giderimi.....	44
4.3. Amonyak Giderimi	48
4.4. Hidroklorik Asit Giderimi	49
4.5. Hidroflorik Asit Giderimi	51
4.6. Nitrik Asit Giderimi.....	52
4.7. Sülfürik Asit Giderimi	54
4.8. Fosforik Asit Giderimi.....	55
4.9. Yatırım ve İşletme Maliyetleri.....	57
4.9.1. Lastik Sektörü Gaz Yıkama Ünitesi.....	58
4.9.2. Kimya Sektörü Gaz Yıkama Ünitesi.....	60
4.9.3. Gıda Sektörü Gaz Yıkama Ünitesi	62
4.9.4. Galvaniz Sektörü Gaz Yıkama Ünitesi	65
4.9.5. Havacılık Sektörü Gaz Yıkama Ünitesi	66
4.9.5.1. Debisi 50.000 m ³ /sa Gaz Yıkama Ünitesi	67
4.9.5.2. Debisi 100.000 m ³ /sa Gaz Yıkama Ünitesi	69
4.10. İşletmede Karşılaşılan Problemler	71
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	74
KAYNAKLAR.....	76
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	79
ÖZGEÇMİŞ.....	80

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Absorpsiyon mekanizması	4
Şekil 2.2.	Karşı akımlı dolgu malzemeli gaz yıkayıcı.....	6
Şekil 2.3.	Çapraz akımlı dolgu malzemeli gaz yıkayıcı	7
Şekil 2.4.	Dolgu malzemesi çeşitleri	8
Şekil 2.5.	V-Tipi damla tutucu	10
Şekil 2.6.	Radial santrifüj fan	11
Şekil 2.7.	Santrifüj pompa	11
Şekil 2.8.	Gaz yıkayıcı için sıvı dağıtım çeşitleri	14
Şekil 2.9.	Amonyak gideriminde sirkülasyon sıvı asitliğinin etkisi	20
Şekil 2.10.	Gaz yıkayıcı verimliliğinde hava sıcaklığı etkisi	21
Şekil 3.1.	Galvaniz kaplama prosesi akım şeması.....	26
Şekil 3.2.	Plastik pall halkası.....	28
Şekil 3.3.	Araştırmada kullanılan pall halkası.....	29
Şekil 3.4.	Dolgu malzemeli gaz yıkayıcı için sıvı dağıtım çeşitleri	32
Şekil 3.5.	Dolgulu gaz yıkayıcılarda taşma düzeltmesi.....	32
Şekil 3.6.	Nog, AF ve verimlilik ilişkisi.....	35
Şekil 4.1.	Gaz yıkayıcı şeması.....	45
Şekil 4.2.	Petek damla tutucu	45
Şekil 4.3.	Sirkülasyon pompası	46
Şekil 4.4.	Radial fan	46
Şekil 4.5.	Seviye şalteri	47
Şekil 4.6.	Plc kontrol panosu.....	47
Şekil 4.7.	NH ₃ giderim verimliliği	49
Şekil 4.8.	HCl giderim verimliliği.....	50
Şekil 4.9.	HF giderim verimliliği	52
Şekil 4.10.	HNO ₃ giderim verimliliği	53
Şekil 4.11.	H ₂ SO ₄ giderim verimliliği.....	55
Şekil 4.12.	H ₃ PO ₄ giderim verimliliği.....	56

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1.	Dolgu yüksekliğine göre gaz giderim verimliliği	16
Tablo 3.1.	Araştırmada kullanılan pall halkasının karakteristik özellikleri	29
Tablo 3.2.	Gaz film transfer birimi sabitleri	36
Tablo 3.3.	Sıvı film transfer birimi sabitleri	37
Tablo 3.4.	Havadaki gaz ve buharlar için 77 °F ve 1 atm’de schmidt sayıları.....	38
Tablo 3.5.	Sudaki bileşikler için 68°F ve 1 atm’de schmidt sayıları.....	38
Tablo 3.6.	İncelenen İnorganik Gazlar ve Özellikleri	39
Tablo 4.1.	Gaz yıkama kulelerinin tasarım özellikleri	42
Tablo 4.2.	Bir numaralı gaz yıkama kulesi tasarım özellikleri	42
Tablo 4.3.	Amonyak gözlem sonuçları	48
Tablo 4.4.	Hidroklorik asit gözlem sonuçları.....	49
Tablo 4.5.	Hidroflorik asit gözlem sonuçları	51
Tablo 4.6.	Nitrik asit gözlem sonuçları	53
Tablo 4.7.	Sülfürik asit gözlem sonuçları.....	54
Tablo 4.8.	Fosforik asit gözlem sonuçları	56
Tablo 4.9.	Gaz yıkama üniteleri özeti	57
Tablo 4.10.	Bir numaralı ünite yatırım maliyeti.....	58
Tablo 4.11.	Bir numaralı ünite işletme maliyeti.....	59
Tablo 4.12.	İki numaralı ünite yatırım maliyeti	61
Tablo 4.13.	İki numaralı ünite işletme maliyeti	62
Tablo 4.14.	Üç numaralı ünite yatırım maliyeti	63
Tablo 4.15.	Üç numaralı ünite işletme maliyeti	64
Tablo 4.16.	Dört numaralı ünite yatırım maliyeti	65
Tablo 4.17.	Dört numaralı ünite işletme maliyeti	66
Tablo 4.18.	Beş numaralı ünite yatırım maliyeti.....	67
Tablo 4.19.	Beş numaralı ünite işletme maliyeti.....	68
Tablo 4.20.	Altı numaralı ünite yatırım maliyeti.....	70
Tablo 4.21.	Altı numaralı ünite işletme maliyeti.....	71

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

a	: Dolgu faktörü, (birimsiz)
Akolon	: Kule kesit alanı, (ft ²)
b	: Dolgu faktörü, (birimsiz)
c	: Dolgu faktörü, (birimsiz)
d	: Dolgu faktörü, (birimsiz)
D	: Kulenin çapı, (ft)
DG	: Gazın yoğunluğu, (lb/ft ³)
Dkolon	: Kulenin çapı, (ft)
DL	: Sıvının yoğunluğu, (lb/ft ³)
e	: Dolgu faktörü, (birimsiz)
G	: Gaz debisi, (lb/sa)
Galan, f	: Taşma noktasındaki kule kesit alanına dayanan gaz akış debisi (lb/ft ² sn)
gc	: Yerçekimi sabiti, (ft/sn ²)
Gmol	: Molar gaz debisi, (lbmol/sa)
H	: Kule yüksekliği, (ft)
HAPe	: Kirletici giriş konsantrasyonu, (ppm)
HAPo	: Kirletici çıkış konsantrasyonu, (ppm)
HG	: Gaz transfer birim yüksekliği, (ft)
HL	: Sıvı transfer birim yüksekliği, (birimsiz)
Hog	: Gaz transfer birim yüksekliği, (ft)
Htkolon	: Dolgu yüksekliği, (ft)
Httoplam	: Toplam kule yüksekliği, (ft)
HTU	: Transfer birim yüksekliği (ft)
L	: Çözücü akış debisi, (lb/sa)
Lgal	: Sıvı çözücü akış hızı, (gal/dk)
Lmol	: Molar sıvı debisi, (lbmol/sa)
m	: Denge eğrisinin eğimi, (birimsiz)
M	: Gazın moleküler ağırlığı, (lb/lb-mol)
MWçözücü	: Sıvının moleküler ağırlığı, (lb/lb-mol)
Nog	: Gaz transfer birimleri sayısı, (birimsiz)
NTU	: Teorik transfer birimi, (birimsiz)
P	: Basınç, (atm)
RE	: Giderim verimliliği, (%)
S	: Kulenin yüzey alanı, (m ²)
ScG	: Gaz akışının schmidt sayısı, (birimsiz)
ScL	: Sıvı akışının schmidt sayısı, (birimsiz)
T	: Sıcaklık, (°R)
Vdolgu	: Dolgu hacmi, (ft ³)
Y	: Dolgu faktörü, (birimsiz)
Qe	: Gaz akış debisi, (sft ³ /dk)
μL	: Sıvının vizkositesi, (cP)

Kısaltmalar

ABS : Apsis

AF	: Absorpsiyon Faktörü
EPA	: Environmental Protection Agency (Çevre Koruma Ajansı)
EPC	: Environmental Protection Centers (Çevre Koruma Merkezleri)
HCl	: Hidroklorik Asit
HDPE	: High Density Polyethylene (Yüksek Yoğunluklu Polietilen)
HF	: Hidroflorik Asit
HNO ₃	: Nitrik Asit
H ₃ PO ₄	: Fosforik Asit
H ₂ SO ₄	: Sülfürik Asit
NH ₃	: Amonyak
ORD	: Ordinat
P&ID	: Piping and Instrumentation Diagram (Borulama ve Ekipman Diagramı)
PP	: Polipropilen
SKHKKY	: Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği
VOC	: Volatile Organic Carbon (Uçucu Organik Bileşik)
WHO	: World Health Organization (Dünya Sağlık Örgütü)

PALL HALKASI ENTEGRE EDİLMİŞ TEK KADEMELİ GAZ YIKAYICILARIN İNORGANİK GAZLARIN TUTUMUNDAKİ ETKİNLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Tezin amacı, endüstride üretim proseslerinde açığa çıkan amonyak, hidroklorik asit, hidroflorik asit, sülfürik asit, fosforik asit ve nitrik asit gibi inorganik gaz ve buharların etkin bir şekilde giderilmesinde kritik bir rol oynayan dolgu malzemeli gaz yıkayıcıların performansını detaylı bir şekilde değerlendirmektir. Araştırmada kullanılan gaz yıkayıcılar özel olarak tasarlanmış olup, 50 mm boyutundaki pall halkalarını içermektedir. Havacılık, galvaniz, gıda, kimya ve lastik sektörlerinde kullanılan toplam altı adet farklı pall halkası entegre edilmiş gaz yıkayıcıların boyutlandırılması, giderim performansı, yatırım ve işletme maliyetlerini kapsayan detaylı bir değerlendirme gerçekleştirilmiştir. Giderim performansını gözlemlemek için; çözücü sıvının pH değeri, dolgu bölüm yüksekliği ve çözücü sıvının inorganik gaz oranı dikkate alınarak ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Amonyak gazının giderimi sırasında, pH değerindeki belirgin bir azalmanın giderim veriminde artışla sonuçlandığı gözlemlenmiştir. Hidroklorik ve fosforik asit giderimi esnasında; sıvı-gaz oranının ve dolgu bölüm yüksekliğinin artışının, hidroflorik asit gaz buharının gideriminde ise; sıvı-gaz oranındaki artışın, son olarak nitrik ve sülfürik asit giderimi sırasında dolgu bölüm yüksekliğindeki artışın giderim verimini olumlu yönde etkilediği gözlemlenmiştir. Sonuçlar, inorganik gazların gaz yıkama sistemleri aracılığıyla %99 gibi oldukça yüksek bir verimlilikle giderilebildiğini ortaya koymaktadır. Maliyet konusunda ise belirgin olarak, artırılmak istenen inorganik gazın debisi arttıkça yatırım maliyetlerinin arttığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Gaz Yıkayıcı, Giderim Verimliliği, İnorganik Gaz, Pall Halkası.

INVESTIGATION EFFICIENCY OF SINGLE STAGE WET SCRUBBERS INTEGRATED WITH PALL RING IN REMOVAL OF INORGANIC GASES

ABSTRACT

The aim of the thesis is to evaluate in detail the performance of scrubbers with packing materials, which play a critical role in the effective removal of inorganic gases and vapors such as ammonia, hydrochloric, hydrofluoric, sulfuric, phosphoric and nitric acids released during industrial production processes. The scrubbers used in the research were specially designed and included 50 mm size pall rings. A detailed evaluation was carried out, covering the sizing, removal performance, investment and operating costs of a total of six different pall ring integrated scrubbers used in the aviation, galvanizing, food, chemical and rubber industries. To observe the removal performance; The pH value of the solvent liquid was examined in detail, taking into account the height of the packed section and the ratio of solvent liquid to inorganic gas. It has been observed that during the removal of ammonia gas, a significant decrease in pH value results in an increase in the removal efficiency. During hydrochloric and phosphoric acid removal; Increasing the liquid-gas ratio and packing height, in the removal of hydrofluoric acid; increasing in the liquid-gas ratio and finally during nitric and sulfuric acid removal; the increase in the packing height, positively affected the removal efficiency. The results reveal that inorganic gases can be removed through scrubbing systems with a very high efficiency of 99%. Regarding cost, it has been observed that investment costs increase as the flow rate of the inorganic gas to be purified increases.

Keywords: Scrubber, Removal Efficiency, Inorganic Gas, Pall Ring.

1. GİRİŞ

Hava kirliliği, atmosferde biyolojik kaynaklı bileşikler dahil olmak üzere sağlık riski oluşturacak düzeyde bulunan toksik kimyasalların ya da bileşenlerin varlığını ifade eder. Diğer bir deyişle, hava kirliliği; genellikle havada bulunmayan, hava kalitesini düşüren ve yaşam standartlarını olumsuz etkileyen kimyasal maddelerin ya da bileşenlerin mevcudiyetini anlatır (EPC, 2021).

Günümüzde sanayileşme, insan popülasyonundaki artış, bölgesel savaşlar, ulaşım, fabrika emisyonları gibi kaynaklar hava kirliliğine neden olmaktadır.

Hava kirliliğinin artışı; insan, hayvan ve bitki sağlığının yanı sıra ozon tabakasının incilmesi, küresel ısınma, sis oluşumu, asit yağmurları, ötrofikasyon gibi çevresel etkilerle ilişkilidir. Bu durum, insanları hava kirliliğini azaltmaya yönelik çözümler aramaya teşvik etmektedir.

Son yıllarda, hava kalitesine yönelik artan endişeler ve özellikle toksik veya uçucu organik bileşiklerin (VOC'ler) gaz formundaki kirlilikleriyle ilgili artan farkındalık, absorber teknolojisinin kullanımında gözle görülür bir artışa neden olmuştur. 1990'lı yıllardan bu yana, hava kirliliği kontrolünde kullanılan absorberler özellikle sulu yıkama sıvıları aracılığıyla toksik gazları ve buharları etkili bir şekilde ortadan kaldırmak için tercih edilmektedir.

Hava kirliliği kontrol cihazları arasında öne çıkan ve absorber olarak adlandırılan, dolgu malzemeli ıslak gaz yıkama sistemleri; atıksu arıtım tesislerinden, asit üretim tesislerine, asfalt fabrikalarından diğer endüstriyel tesislere kadar geniş bir yelpazedeki alanlarda kullanılmaktadır. Bu sistemler, özellikle endüstriden kaynaklanan toksik gazlar (HCl, SO₂, HF, NH₃ vb.), uçucu organik bileşikler (VOC) ve sınırlı miktarlarda partikül madde arındırma süreçlerine katkı sağlamaktadır (EPA, 1982).

Bu çalışmada hava kirliliği kontrolü kapsamında, Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliği Kontrol Yönetmeliği'ne göre endüstriyel gazların çıkış parametreleri baz alınarak, dolgu malzemeli ıslak gaz yıkama sistemlerinin, gazların giderim verimliliğine etkisinin gözlemlenmesi amaçlanmaktadır.

Arařtırmada, dūřuk maliyet, yūksek bořluk hacmi, dūřuk basınç dūřūřū, kūçūk ōzgūl ağırlık, yūksek kūtle transfer verimlilięi gibi etkenler nedeniyle dolgu malzemesi olarak polipropilen malzemeden 50 mm boyutunda pall halkası kullanılmıřtır.

Çalıřmada pall halkası entegre edilmiř tek kademeli gaz yıkayıcıların amonyak, hidroklorik asit, hidroflorik asit, nitrik asit, sūlfūrik asit, fosforik asit gibi inorganik gaz ve buharların giderimindeki etkinlikleri incelenmiřtir.

Arařtırmada lastik, galvaniz, kimya, havacılık ve gıda olmak ūzere toplamda beř adet farklı sektōrde, altı adet farklı debi ve ōlçūlerde gaz yıkama ūniteleri incelenmiřtir. Her bir farklı gaz yıkama ūnitesi için tasarım ve boyutlandırma yapılp, ekipmanlarıyla birlikte iřletmeye alınan gaz yıkama ūniteleri incelenmiřtir. Belirtilen inorganik gazların pall halkası entegre edilmiř gaz yıkayıcılarda giderim performansını gōzlemlemek için baca gazı çıkıř konsantrasyonları ōlçūlūp, giderim verimlilięi hesaplanmıřtır. Akabinde giderim verimliliklerine gōre kıyaslamalar yapılp, ōneriler sunulmuřtur.

Çalışmada tahmini yatırım ve işletme maliyet değerleri altı adet pall halkası entegre edilmiş gaz yıkama kuleleri için belirtilmiştir.

Araştırmanın sonlarında işletmelerde karşılaşılan problemlere değinilip, akabinde sonuçlar ifade edilmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

Toksik ve genellikle inorganik gazların gideriminde kullanılan dolgu malzemeli gaz yıkayıcılar, sıvı parçacık teması için geniş bir yüzey alanı sağlayan raschig halkaları, pall halkaları, spiral halkalar gibi çeşitli şekillerdeki dolgu malzemesi içeren bir kuleden oluşur.

Kule içindeki dolgular destek tavalarıyla yerinde tutulur ve gaz yıkayıcının tabanına yakın bir plaka tarafından desteklenir. Gaz temizleme sıvısı dolgunun üzerine eşit bir şekilde verilir ve dolgulu bölümün içinden aşağı doğru akar. Sıvı dolguyu kaplar ve ince bir film oluşturur. Absorbe edilecek kirletici gazın, sıvı içerisinde çözünabilir olması gerekmektedir. Dikey tasarlanan dolgulu kulelerde, gaz akışı aşağıdan yukarıya doğru akar. Bazı dolgulu yataklarda, gaz akışı dolgu boyunca yatay olacak şekilde tasarlanmıştır (EPA, 1998).

2.1. Dolgu Malzemeli Gaz Yıkayıcılar

Dolgu malzemeli gaz yıkayıcılar, kütle transferini temel alan bir teknoloji sunmaktadır. Bu sistemde, gaz yıkama kulelerindeki kütle transferi, gaz moleküllerinin proses akımından alınıp sıvı faz ile etkileşime girmesi olarak ifade edilir. Kütle transferi işlemi, gaz halindeki kirleticinin, sıvı çözelti içinde çözünerek temizlenmesini sağlar. Bu süreçte, gaz fazındaki kirletici, sıvı çözeltiyle etkileşime geçerek çözünürlük dengesi kurar ve arındırma işlemi gerçekleşir.

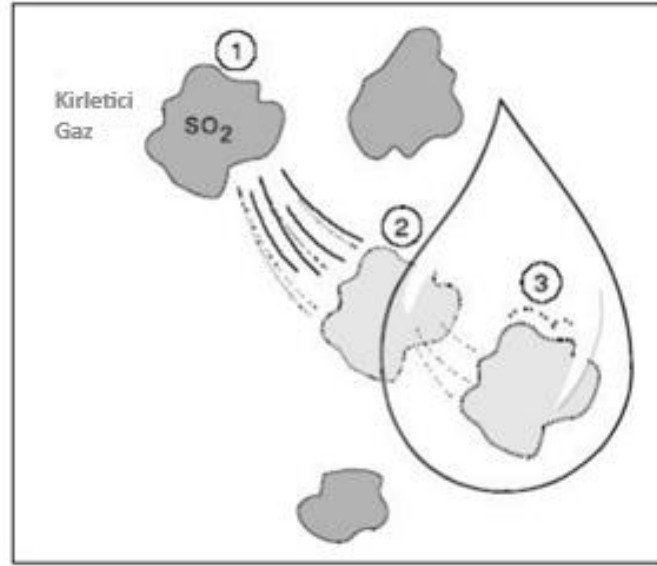
Kütle aktarım hızı, dolgulu malzemeli yıkayıcıların performansı için önemlidir çünkü kirleticinin uzaklaştırılma hızını büyük ölçüde etkiler (Yap, 2005).

2.1.1. Çalışma Prensibi

Gaz halindeki bir bileşenin, gaz fazından sıvı faza transferi absorpsiyon olarak ifade edilmektedir. Absorpsiyon, gaz akımı içinde dağılmış sıvı damlacıkları, sıvı kaplama dolgu malzemesi tabakaları veya kap/tank içindeki sıvı jetleri halinde gerçekleşir.

Kütle transferi için mevcut sıvı yüzey alanı ve gaz halindeki moleküllerin sıvıya difüzyonu için uygun zaman, gazların çözünürlüğü, sıvı ve gaz sıcaklığı, sıvı ve gazın temas süreleri, absorpsiyon performansını etkileyen önemli faktörlerdendir.

Gaz absorpsiyonu ile ilişkili üç aşama vardır. Şekil 2.1, gaz fazının yığın alanından gaz ve sıvı arasındaki arayüze yayılan kükürt dioksitin gaz halindeki kirleticisini gösterir. Gaz halindeki molekül, ikinci aşamada arayüz boyunca hızla sıvı faza geçer. Molekül daha sonra son aşamada sıvı alanına yayılır.



Şekil 2.1. Absorpsiyon mekanizması (Joseph, 1998)

Emilen gaz formundaki kirlenici, yıkama sıvısı olarak adlandırılan sirkülasyon sıvısında minimum düzeyde çözülmüş olmalıdır. Toksik gazın sıvıya transferi, sirkülasyon sıvısı doygunluğa yaklaşıncaya kadar devam eder. Doygunluk noktasına ulaşıldığında, toksik gazın sıvıya transfer hızı ile çözülmüş türlerin tekrar gaz fazına transfer hızı arasında bir denge sağlanır. Bu noktada, toksik gazın çözünürlüğü, bilinen bir sıvı hacmiyle uzaklaştırılabilecek toksik gaz miktarını belirleyen bir sınıra işaret eder. Söz konusu kirlenici çözünürlük sınırını aşmak için, sıvı fazdaki çözülmüş gaz kirlenicilerle etkileşime giren ve ardından sıvı içerisinde kalıcı hale gelen bir bileşik oluşturan özel reaktanlar kullanılabilir. Hava kirliliği kontrolünde yaygın olarak kullanılan absorberlerde, bu tür reaktanların stratejik bir şekilde kullanımı, etkili bir çözüm sunar.

Gaz yıkama prosesi, bir gaz akımının bir veya daha fazla bileşeninin, absorban maddeye absorbe edildiği bir birim işlemdir. Bu süreç tarif edilirken "scrubber" terimi "absorpsiyon" ile birbirinin yerine kullanılır. Islak gaz yıkamada, su en yaygın absorban sıvı seçimidir. Özel durumlarda, absorban olarak uçucu olmayan başka bir sıvı da kullanılabilir (Joseph, 1998).

2.2. Dolgu Malzemeli Gaz Yıkayıcı Çeşitleri

Dolgu yataklı ıslak gaz yıkayıcılar, yüksek gaz giderme verimliliğinin gerekli olduğu ve egzoz akımının nispeten partikül madde içermediği uygulamalar için en uygundur. Hem sülfürik (SO_2) hem de hidroklorik asitlerin (HCl) üretiminde, egzoz emisyonlarını kontrol etmek için dolgu malzemeli ıslak gaz yıkayıcılar kullanılır. Bu prosesler için temizleme sıvısı, dolgulu kuleden prosese geri gönderilen harcanan sıvı ile zayıf bir asit solüsyonu olabilir. Dolgu kuleler ayrıca birincil metal endüstrisindeki asitleme işlemlerinden kaynaklanan HCl ve H_2SO_4 buhar emisyonlarını kontrol etmek için kullanılır. Rendering tesislerinde, petrol rafinerilerinde ve atıksu arıtma tesislerinde kokuları kontrol etmek için kullanılırlar. Koku kontrol uygulamaları için, dolgulu yatak yıkama sıvısı genellikle sodyum hidroksit (NaOH) gibi oksitleyici bir reaktif içerir. Bu uygulamalarda, eğer bir çökelti oluşursa veya tıkanma bir sorun olabilirse, bir asit geri yıkaması eklenmelidir. Dolgulu yıkama kulelerinden geçen gaz debisi, saatte 900 m^3 ile 126.000 m^3 arasında değişiklik gösterebilmektedir, bu da oldukça geniş bir aralığı kapsamaktadır (EPA, 1982).

Asit gazları, partikülleri, ağır metalleri, eser organik maddeleri ve kokuları kontrol etmek için baca gazı (veya diğer bazı kirli gaz akımları) arıtılırken gaz yıkayıcı ile yaygın olarak karşılaşılır. Çoğu zaman, bir gaz yıkama sistemi, seri halinde iki veya daha fazla yıkayıcıdan oluşur. Bu, tek kademeli gaz yıkama aşamasının hedeflenen kirleticiye ve kirleticilere özel bir absorban kullanabilmesi için yapılır.

Çok kademeli bir gaz yıkayıcı sisteminde, aksi takdirde tek kademeli bir gaz yıkayıcı ile mümkün olandan daha yüksek toplam temizleme verimliliği genellikle mümkündür. Bunun bir örneği, normal işlemler sırasında hem amonyak hem de hidrojen sülfürün açığa çıktığı, atıksu arıtma tesislerinde yaygın olarak bulunur.

Gaz yıkama ünitesinde, havadaki amonyağı gidermek için asit bazlı absorban sıvı (H_2SO_4) kullanılır. Hidrojen sülfür daha sonra kostik (NaOH) bir solüsyon kullanılarak ve sıvıya bir oksitleyici ajan olan sodyum hipoklorit eklenerek temizlenir. Bu örnekte, gaz yıkama prosesinde fiziksel veya kimyasal absorpsiyon (veya her ikisi) meydana gelebilir. Bir kirletici basitçe tutulursa (örneğin, suya çarpan partiküller) veya çözülürse, bu fiziksel bir absorpsiyon sürecidir. Absorbe olan kirletici aynı zamanda bir kimyasal

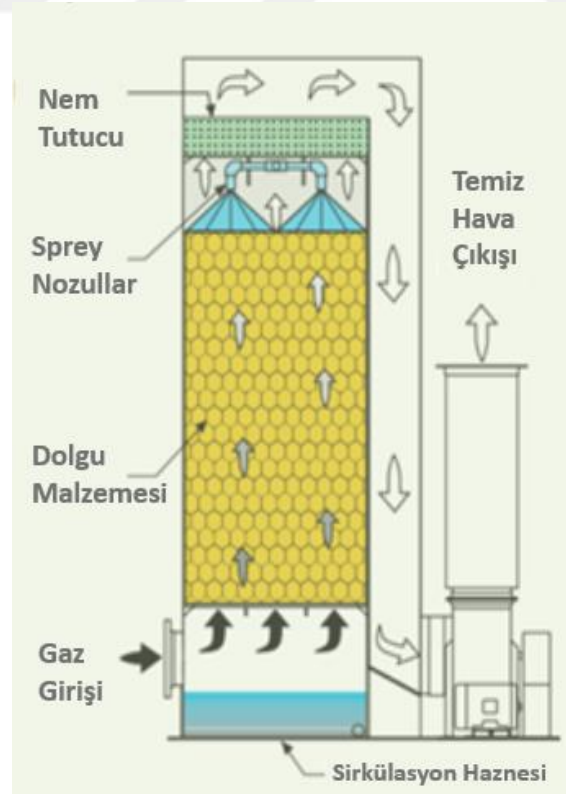
reaksiyona girerse (örneğin, HCl, CaCl₂'nin kireç bazlı bulamacı tarafından emilir ve daha sonra bununla reaksiyona girer), o zaman süreç bir kimyasal absorpsiyon işlemidir. Kuru temizlemede, gazın su buharı ile doymasını önlerken gaz akımına bir alkali reaktif enjekte edilir (EPA, 1984).

Bu tür bir ünite işletim kurulumunun en yaygın adı bir scrubber veya absorber olsa da, endüstride bu tür kurulumlara atıfta bulunmak için yaygın olarak kullanılan diğer isimler püskürtme kuleleri ve dolgu kolonlardır.

Dolgu yataklı ıslak gaz yıkayıcılar, gaz giderimi için kullanılan en yaygın absorberlardır. Dolgu malzemeli kolonlar, gaz-sıvı teması için geniş bir yüzey alanı sağlayan dolgu malzemesi üzerinde yıkama sıvısını dağıtır. Dolgulu yataklar, gaz-sıvı akışının yönüne göre sınıflandırılır. (EPA, 1984).

2.2.1. Karşı Akımlı Dolgu malzemeli Gaz Yıkayıcı

En yaygın kullanılan dolgu malzemeli gaz yıkayıcı, Şekil 2.2'de gösterilen karşı akımlı kulesidir.

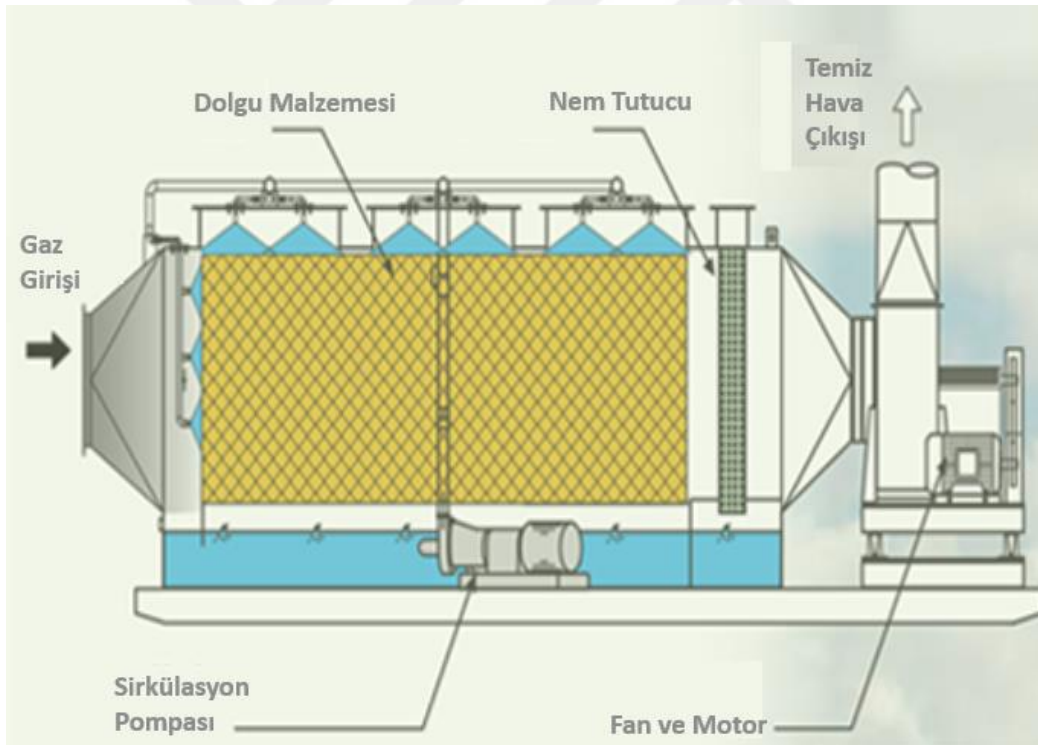


Şekil 2.2. Karşı akımlı dolgu malzemeli gaz yıkayıcı (URL-3)

Karşı akımlı gaz yıkama kulelerinde toksik veya arıtılacak gaz akımı kulenin dibine girer ve dolgu malzemesi yatağından yukarı doğru akar. Sıvı, spreyleyiciler veya nozullar ile dolgulanmış yatağın tepesine verilir ve dolgu malzemesi üzerinden aşağı doğru akar, bu da teorik olarak elde edilebilecek en yüksek verimle sonuçlanır. En seyreltik gaz, en az doymuş absorban sıvı ile temas ettirilir. Buna göre, gaz fazındaki kirleticiler ile sıvıdaki kirleticinin çözünmüş konsantrasyonu arasındaki maksimum konsantrasyon farkı, dolgu yatağının tepesindedir. Bu konsantrasyon farkı, devam eden absorpsiyon için bir itici güç sağlar.

2.2.2. Çapraz Akımlı Dolgu Malzemeli Gaz Yıkayıcı

Çapraz akımlı gaz yıkayıcıda gaz akışı, dolgu malzemesinden aşağı akan yıkama sıvısı tarafından yıkanan dolgulu yatak boyunca yatay olarak akar. Tipik bir çapraz akımlı gaz yıkayıcı Şekil 2.3’de gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Çapraz akımlı dolgu malzemeli gaz yıkayıcı (URL-4)

Dolgulu yatağın ön yüzü, genellikle Şekil 2.3’de gösterildiği gibi gelen gaz akımı yönünde eğimlidir. Bu durum, giren toksik gaz tarafından geri itilmeden önce dolgunun ön yüzündeki sıvının tabana düşmesine yetecek kadar süre vererek dolgunun tamamen ıslanmasını sağlar.

Çapraz akımlı gaz yıkayıcılar, sıvıda iki yönde konsantrasyon gradyanları bulunduğundan, yukarıdan aşağıya ve önden arkaya olmak üzere karmaşık tasarım prosedürleri gerektirir.

2.3. Gaz Yıkayıcı Bileşenleri

Dolgu malzemeli gaz yıkama kuleleri temel bileşenleri genellikle dolgu malzemesi, damla tutucu, radial fan, pompalar ve borulama sistemleridir.

2.3.1. Dolgu Malzemesi

Dolgu malzemesi, kütle aktarımı için geniş bir yüzey alanı sağlar. Şekil 2.4, en yaygın olarak kullanılan dolgulardan bazılarını göstermektedir.



Şekil 2.4. Dolgu malzemesi çeşitleri (Joseph, 1998)

Bu dolgular genellikle plastikten (polietilen, polipropilen veya polivinilklorür) yapılır, ancak seramik veya metal olabilir. Dolgu malzemesi genellikle, ticari adı ve toplam boyutu ile tanımlanır. Örneğin, bir sütun 2 inç (50 milimetre) rasching halkalar veya 1 inç (25 milimetre) tellerettes ile dolgulanabilir. Dolgu malzemelerinin genel boyutları normalde 1 ila 4 inç (25 ile 101 milimetre) arasında değişmektedir (EPA, 1991).

Seçilen dolgu malzemesi, kirleticilerin ve temizleme sıvısının aşındırıcılığının doğasına, gaz yıkayıcının boyutuna, statik basınç düşüşüne ve maliyete bağlıdır. Dolgu malzemelerinin seçiminde yer alan özel hususlar aşağıda özetlenmiştir.

Maliyet; plastik dolgular genellikle metalden daha ucuzdur ve en pahalısı seramiktir.

Alçak basınç düşüşü; basınç düşüşü, dolgu ile doldurulan bir kuledeki boşluk hacminin bir fonksiyonudur. Genel olarak, dolgu boyutu ne kadar büyük olursa, basınç düşüşü o kadar küçük olur.

Korozyon direnci; seramik veya porselen dolgu genellikle çok aşındırıcı bir atmosferde kullanılır.

Yapısal dayanıklılık; dolgu malzemesi, montaj, servis, fiziksel taşıma ve termal dalgalanmalar sırasında normal yüklere dayanacak kadar güçlü olmalıdır. Seramik dolgu ani sıcaklık değişimlerinde çatlamaya maruz kalır.

Ağırlık; daha ağır dolgu, ek destek malzemeleri veya daha ağır kule inşaatı gerektirebilir. Plastikler; seramik veya metal ambalajlardan çok daha hafiftir.

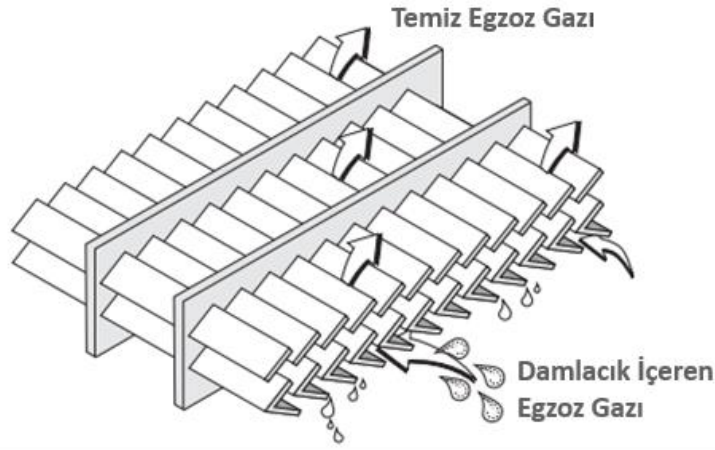
Tasarım esnekliği; bir gaz yıkayıcı verimliliği, sıvı ve gaz akış hızları değiştikçe değişir. Dolgu malzemesi, proses giderim verimliliğini önemli ölçüde etkilemeden işlem değişikliklerini kaldırabilmelidir.

Dolgu malzemesi, bir gaz yıkama kulesi içinde iki yoldan biriyle düzenlenebilir. Dolgu, kolona rastgele veya yapılandırılmış malzeme olarak konulabilir. Rastgele dolgulanmış kuleler daha yüksek bir yüzey alanı (m^2/m^3) sağlar, ancak aynı zamanda yapılandırılmış dolgudan daha yüksek bir basınç düşüşüne neden olur. Daha düşük basınç düşüşüne ek olarak, yapılandırılmış dolgu, dolgulamanın tüm yüzeyi üzerinde daha iyi sıvı dağılımı sağlar (EPA, 1992).

2.3.2. Damla Tutucu

Dolgu malzemeli yıkama kulesi içerisinde genellikle sıvı dağıtım sistemi ile baca arasında bulunmaktadır. Damla tutucuların görevi, sıvı dağıtım sisteminde zerreciklere ayrılan sıvı taneciklerinin emilen hava ile sürüklenip atmosfere atılmasını önlemektir.

Dolgu malzemeli ıslak yıkayıcıda, sürüklenen damlacıkları gidermek için genellikle V-tipi damla tutucu kullanılır. Bu damla tutucu paslanmaz çelikten, FRP ya da PVC malzemeden yapılabilir. Şekil 2.5’de damla tutucu örneği gösterilmektedir.



Şekil 2.5. V-Tipi damla tutucu (Joseph, 1998)

Şekil 2.5’de gösterildiği gibi, gaz akışındaki sıvı damlacıkları, damla tutucudan geçerken kanat yüzeylerine çarpar. Sonuç olarak, sıvı damlacıkları sirkülasyon tankına geri düşer. Sıvı damlacıklarının kaçmasına izin verilirse aşırı emisyon meydana gelebilir. Bacadan yayılan damlacıkların içindeki askıda ve çözünmüş katı maddeler, yakın çevrede rahatsız edici hasarlar oluşturabilir. Genel olarak, bu nem tutucu tarafından 5µm’lik damlacık boyutu yakalanabilir (Yap, 2005).

2.3.3. Radyal Fan

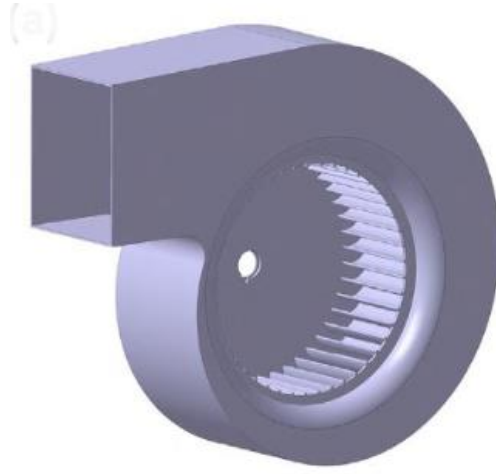
Fanın bir kapasite aralığı vardır. Gaz yıkayıcı ünitesi gaz giderim verimliliği, doğru bir fan boyutu ile optimize edilebilir. Ayrıca, vantilatörün yeri yıkayıcıdan önce veya sonra yerleştirilebileceğinden, fan malzemesinin seçimi de önemlidir.

Yıkayıcının önüne bir fan yerleştirildiğinde pozitif basınçlı fan olarak da bilinir ve fanın bu konumu aşınmaya ve katı parçacıkların birikmesine maruz kalır.

Yıkayıcıdan sonra bulunan bir fan, normalde negatif basınç fanı olarak adlandırılır. Negatif basınçlı fan, gaz akımından gelen asidik bileşiğin neden olduğu korozyon sorununa maruz kalır.

Genelde ıslak gaz yıkama sistemlerinde santrifüj fan kullanılmaktadır (Joseph, 1998).

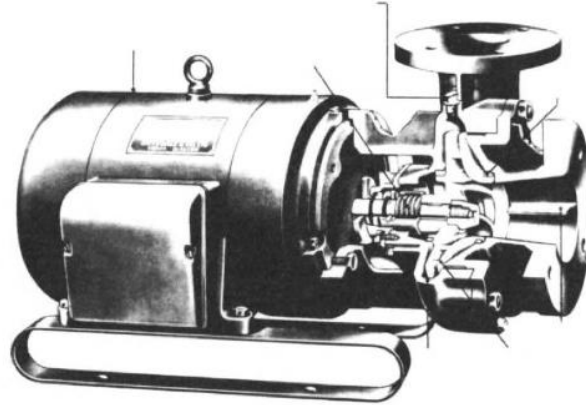
Toksik gazı, dolgulu ıslak yıkayıcıda arıtıp, baca boyunca zorlamak için fan sistemine ihtiyaç vardır. Şekil 2.6’da gaz yıkama kulelerinde kullanılan radyal santrifüj gösterilmektedir.



Şekil 2.6. Radyal santrifüj fan (Montazerin ve diğ., 2015)

2.3.4. Pompalar ve Boru Sistemleri

Santrifüj pompalar, gaz yıkama sistemleri için kullanılan en yaygın pompa türüdür. Şekil 2.7’de santrifüj pompa görseli bulunmaktadır.



Şekil 2.7. Santrifüj pompa (Anderson ve diğ., 1993)

Bu pompalarda sıvı aksenal olarak girer ve dönen çark tarafından hızlandırılır. Sıvı çarktan radyal olarak çıktıkça sıvının hızı düşer ve basınç artar.

Boru sistemi, emiş borusu, pislik tutucu, emiş tarafı çek valfi, tahliye çek valfi ve tahliye kontrol vanası dahil olmak üzere bir dizi bileşenden oluşabilir. Pislik tutucu, sıvı akışında yakalanabilecek küçük metal parçalarının ve diğer kirleticilerin çıkarılması için kullanılır. Emiş tarafı çek valfi, sistem kesintisi sırasında emiş tarafı borularına hava sızma riskini azaltmak için kullanılır. Boşaltma vanası, pompadan sıvı akışını ayarlamak için kullanılır.

2.4. Gaz Yıkayıcı Kontrol Enstrümanları

Enstrümanlar, sistem bileşenlerini korumak ve performansı izlemek için gaz yıkama sistemi boyunca kullanılır. Çoğu sistem için gerekli olan parametrelerin kısmi bir listesi aşağıdakileri içerir.

2.4.1. Gaz Sıcaklığı Ölçümü

Gaz yıkayıcı gaz girişinde kullanılan sıcaklık göstergeleri, gaz yıkama sistemi yapı malzemelerine zarar verebilecek yüksek gaz sıcaklıklarını tespit etmek için kullanılır. Çoğu gaz yıkama kulesi, fiberglas takviyeli plastikten (FRP) yapılmıştır veya maksimum sıcaklık sınırları 200°F ila 400°F (90°C ila 200°C) arasında değişen korozyona dayanıklı astarlara sahiptir. Yüksek gaz sıcaklıkları durumunda, acil kapatma sırasında sistemi korumak için genellikle gaz yıkama sistemlerine acil yıkama sistemleri dahil edilir. Giriş gazı sıcaklık monitörleri ayrıca, absorpsiyon verimliliğini bozabilecek sıcaklık artışlarının bir göstergesini sağlar.

Fanın gaz yıkayıcı çıkışında kullanıldığı durumlarda, çıkış gazı sıcaklık göstergeleri, akış yönündeki fanı korur. Pompa arızası, borunun donması, boru kırılması veya boru tıkanması nedeniyle yıkama sıvısı debi kaybı, istenen gaz sıcaklıklarının daha yüksek olmasına neden olabilir. Gaz yıkama ünitesinde gaz çıkış sıcaklığı verileri de gaz yıkayıcı performansını değerlendirmek için yararlıdır (EPA, 1982).

2.4.2. Sıvı Debisi Ölçümü

Sıvı debisinin amaçlanan çalışma aralığında kaldığını göstermek için sıvı akış monitörleri (debimetre) kullanılır. Bu enstrümanlar genellikle hem EPA hem de yönetmelikler tarafından gereklidir. Reaksiyona girmesi için sirkülasyon sıvılarına alkali veya diğer katkı maddeleri eklenmeyen sistemlerde özellikle önemlidirler. Bu durumlarda, sıvı debisi, gaz akışından uzaklaştırılan kirleticiler için çözünürlük limitlerinin üzerindeki oranlarda muhafaza edilmelidir. Kullanılan sıvı akış monitörünün tipi, tesisin boyutuna ve izlenen sıvının özelliklerine bağlıdır. Temiz sıvı debileri; orifis akış ölçer ve rotametreler (şamandıralı debimetre) ile izlenebilir. Manyetik akış ölçerler ve ultrasonik akış ölçerler, orta düzeyde katı madde seviyelerine sahip akışlarda kullanılabilir. (Yap, 2005).

2.4.3. Sıvı Basıncı Ölçümü

Nozul tıkanması, nozul orifisi aşınması ve başlık tıkanması gibi sorunları izlemek için gaz yıkayıcıya giden besleme başlıklarında sıvı basınç göstergeleri kullanılır. Tıkanma sorunları normalden daha yüksek basınçlarla gösterilir. Çoğu sıvı basınç göstergesi, doğrudan gösterge tipi araçlardır.

2.4.4. Sıvı Ph Ölçümü

Gaz yıkama sistemlerine (asit gazı giderim uygulamaları) alkali besleme hızını kontrol etmek için pH aletleri kullanılır. pH'ı 5 ile 9 arasındaki seviyelerde tutmak genellikle avantajlıdır. Düşük pH seviyelerinde, malzemeler korozyona karşı hassastır. Yüksek pH seviyelerinde, kalsiyum ve magnezyum bileşikleri çökebilir. Çöken bileşikler borularda, nozullarda, gaz yıkayıcı duvarlarında ve damla tutucularda kireç tortuları oluşturabilir.

2.4.5. Statik Basınç Düşümü Ölçümü

Dolgu yataklı ıslak gaz yıkayıcılarda, gaz fazı statik basınç düşüşü tipik gaz akış oranlarında çalıştığında dolgunun metre başına 0,06 ila 0,25 kPa birimdir. Sıvı veya gaz akış hızlarındaki büyük değişiklikler, bu tip gaz yıkayıcıların yüklenmesine ve taşmasına neden olur.

Statik basınç göstergesi, öncelikle gaz yıkama tankında rutin performansı değerlendirmek için kullanılır. Büyük ünitelerde, statik basınç bir fark basınç tranmitteri tarafından algılanır ve kontrol odasındaki izleme sistemine bir elektrik sinyali gönderilir. Manometreler ve basınç göstergeleri gibi doğrudan göstergeler birçok küçük sistemde kullanılmaktadır.

Damla tutucularda damlacık sürüklenmesiyle oluşan katı birikimini izlemek ve fan çalışma problemlerini izlemek için statik basınç düşüşü göstergeleri kullanılır. Bu veriler temizlik spreylerine olan ihtiyacı belirtmek için kullanılır (EPA, 1991).

2.5. Dolgu Malzemeli Gaz Yıkayıcı Verimliliği

Dolgu malzemeli gaz yıkayıcı verimliliği, toksik gazların giderimi açısından büyük önem taşımaktadır. Verimliliğin artması, toksik gazların gideriminin artması anlamına

gelmektedir. Dolgu malzemeli gaz yıkama sistemlerinde verimliliği etkileyen birçok etken bulunmaktadır.

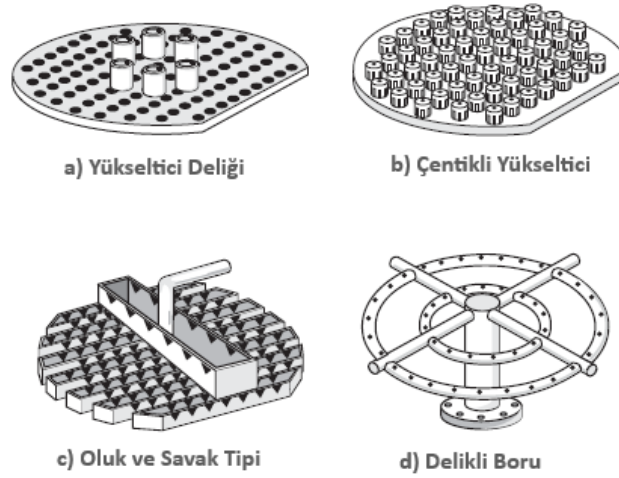
2.5.1. Verimliliği Etkileyen Faktörler

Gaz yıkayıcı verimliliğini etkileyen önemli faktörlerden olan; sıvı dağılımı, sirkülasyon sıvısı, dolgu yüksekliği, sıvı debisi ve sıcaklık aşağıdaki başlıklarda nedenleriyle birlikte açıklanmaktadır.

2.5.1.1. Sıvı Dağılımı

İyi bir gaz-sıvı teması sağlamak için gaz yıkayıcı sıvı dağıtıcıların performansı önemlidir. Sıvı, dolgu yatağın tüm üst yüzeyine dağıtılmalıdır.

Sıvı dağılımı genellikle, Şekil 2.8’de gösterildiği gibi savaklar veya besleme borusu düzenlemeleri ile sağlanır. Spray nozul dizileri de kullanılır.



Şekil 2.8. Gaz yıkayıcı için sıvı dağıtım çeşitleri (Joseph, 1998)

Sıvı, dolgu üzerine dağıtıldıktan sonra, en az dirençli yolu izleyerek, yerçekimi kuvvetiyle dolgu içinden aşağı doğru akar. Sıvı, boşlukların merkezden daha büyük olduğu kule duvarına doğru akma eğilimindedir. Sıvı duvara çarptığında, doğrudan kuleden (kanallardan) aşağı akar. Sıvıyı kule duvarından kolonun merkezine geri yönlendirmek gereklidir. Sıvı yeniden dağıtıcılar, sıvıyı tüm dolgu yüzeyi üzerine geri döndürmek için kullanılır. Yeniden dağıtıcılar genellikle en fazla 3,1 metre veya 5 kule çapından (hangisi daha küçükse) fazla olmayan aralıklarla yerleştirilir (Yap, 2005).

İyi gaz-sıvı temasının sağlanması için giriş gazı debisinin düzgün dağılımı da çok önemlidir. Bu, giriş gaz kanallarının ve dolgu malzemesini tutan destek tepsilerinin uygun şekilde tasarlanmasıyla gerçekleştirilir.

2.5.1.2. Sirkülasyon Sıvısı

Yıkama (sirkülasyon) sıvısı, scrubber verimliliğini etkileyen bir faktördür. Seçilen sıvı, toksik gaz için yüksek çözünürlüğe sahip olmalıdır, böylece absorpsiyon oranı artmaktadır. Gaz çözünürlüğünü artırmak için emici sıvıya kimyasal bir reaktif eklenebilir. Bu, kirletici gazın giderim verimliliği kapsamında gaz yıkayıcının absorpsiyon performansını iyileştirecektir (EPA, 1998).

Gaz emilimine yardımcı olan diğer bir faktör, kirleticilerin giderilmesi için sirkülasyon sıvısının doğru kullanılmasıdır. İnorganik gaz kontrolü için, sodyum hidroksit, kalsiyum hidroksit ve sodyum karbonat, absorpsiyon prosesinde yıkama sıvısı seçenekleridir. Asidik gaz, alkali ile reaksiyona girerek tuz ve su oluşturur. Alkali gazın kontrolü için, hidroklorik asit ve sülfürik asit yıkama sıvısı çeşitlerindendir. Bunun dışında, proses hava akımından VOC'leri gidermek için genellikle su gibi emici sıvı uygulanır (EPA, 1998).

2.5.1.3. Dolgu Yüksekliği

Dolgu, sıvı ve gaz arasında geniş bir yüzey temasını mümkün kılar ve aynı zamanda daha uzun bir temas süresi sunar. Bu özellikler, sıvı ve gazın etkileşimini artırarak homojen bir sıvı dağılımını teşvik eder. Dolayısıyla, gaz emilimini desteklemek üzere sıvı ve gazın etkili bir şekilde birbirine karışmasını sağlar. Dolgu yüksekliği, gaz yıkayıcı performansını etkiler. Genellikle gaz yıkayıcı için büyük dolgu yüksekliği tercih edilir. Bu durum, absorpsiyona yardımcı olur ve böylece gaz yıkayıcı verimliliğini artırır. Temel olarak, istenen dolgu yüksekliği, kirletici için gerekli uzaklaştırma verimliliğine ve yıkayıcıda kullanılan dolgunun kütle transfer verimlilik derecesine göre belirlenir. Bununla birlikte, büyük dolgu yüksekliğinin sağlanması, gaz yıkayıcı basınç düşüşünü artırabilir.

Literatür araştırmasına göre, karşı akımlı dolgu malzemeli gaz yıkayıcının dolgu malzemesi yüksekliğine göre gaz giderim verimlilikleri Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1. Dolgu yüksekliğine göre gaz giderim verimliliği (Yap, 2005)

Kirletici	Kirletici Tipi	48" Dolgu Yük. Giderim Verimliliği (%)	72" Dolgu Yük. Giderim Verimliliği (%)	Açıklama
Amonyak (NH ₃)	Gaz	90-95	99+	Sülfürik asit (H ₂ SO ₄) dozlaması istenebilir.
Hidroklorik Asit (HCl)	Gaz & Sıvı	85-95	98-99	Gösterilen performans, 5 mikrondan büyük gaz ve/veya sıvı damlacıkları veya katı parçacıklara dayanmaktadır.
Hidroflorik Asit (HF)	Gaz	95	99	Sodyum hidroksit (NaOH) dozlaması istenebilir.
Nitrik Asit (HNO ₃)	Sıvı	85-90	98-99	-
Fosforik Asit (H ₃ PO ₄)	Sıvı	98-99	99+	-
Sülfürik Asit (H ₂ SO ₄)	Sıvı	98-99	99+	-

Tablo 2.1'e göre kirleticilerin dolgu malzemeli gaz yıkama ünitelerinde minimum verimlilikleri; amonyak için %90, hidroklorik asit için %85, hidroflorik asit %95, nitrik asit %85, fosforik asit %98 ve son olarak sülfürik asit için de %98 giderim verimliliği öngörülmüştür.

Gaz, dolgulanmış yataktan akarken basınç düşüşü meydana gelir. Basınç düşüşüne aslında gaz akışına direnen sıvı ve dolgu malzeme direnci neden olur. Ayrıca dolgunun boyutu ve şeklinden de kaynaklanır. Bu nedenle, daha büyük dolgu derinliği, daha yüksek basınç düşüşüyle karşılaşır. Sonuç olarak, gazı dolgulu yataktan geçirmek için daha yüksek bir fan gücü gerekli olacaktır. Bu, yıkayıcının işletme maliyetini doğrudan artırır. Uygun bir dolgu kullanılarak basınç düşüşü azaltılabilir. Örneğin tellerette dolgu, yıkayıcıdaki basınç düşüşünü azaltma özelliğine sahiptir. Bu nedenle, enerji tüketimini ve işletme maliyetini azaltmaya yardımcı olur (Yap, 2005).

2.5.1.4. Sıvı Debisi

Yıkama sıvısı akış hızı, yeterli sıvı akışını sağlamak ve dolgu yatağın kurumasını önlemek için doğru bir şekilde tasarlanmalıdır. Yeterli sıvı akışı, kirli hava akımlarının sıvı ile sürekli temas halinde olmasını sağlar. Yeterli bir sıvı dağıtım hızı, gaz ve sıvı akış hızlarındaki değişiklikten kaynaklanabilecek taşma durumunu da önleyebilir.

Emilen kirleticiyi tutan hazne, dolgu yataklı yıkayıcının sıvı devridaim sistemi için sıvı devridaim tankı görevi görür. Tanktaki nötralize sıvı, borular aracılığıyla gaz yıkayıcıya pompalanır ve kirli hava akımını temizlemek için tekrar kullanılır.

İyi bir gaz yıkayıcı performansı için, geri dönüştürülmüş sıvının absorpsiyon sürecine yardımcı olması için kabul edilebilir bir pH değerine sahip olması gerekir. Geri dönüştürülmüş sıvının kirletici konsantrasyonunu seyreltmek için entegre hazneye sürekli olarak taze takviye sıvısı (su) verilir. Bu özellikler, gaz yıkama prosesinin verimli olmasını sağlamaya yardımcı olur (Barbour ve Vataavuk, 1995).

Ayrıca, tıkanmayı önlemek ve pompalama sürecini kontrol etmek için düzenli kontrol sağlanmalıdır. Bunun nedeni, sıvının düzgün akışının uygun sıvı dağıtım oranı sağlamasıdır. Pompa ayrıca entegre haznedeki çamur tarafından tıkanma potansiyeline sahiptir. Bu, yıkayıcıya geri dönüştürülmüş sıvının düzgün akışını etkileyebilir. Bunun bir sonucu olarak, tıkanma potansiyelini azaltmak için çamuru tanktan atık su arıtma tesisine taşımak için başka bir pompa kullanılır (Barbour ve Vataavuk, 1995).

2.5.1.5. Sıcaklık

Egzoz gazının giriş sıcaklığı, yıkayıcı verimini etkileyen bir diğer parametredir. Daha yüksek gaz sıcaklığı, yıkama sıvısını buharlaştırarak absorpsiyon işleminin eksikliğine neden olabilir. Kuru kısım, sıvının buharlaşması nedeniyle dolgu yatakta ortaya çıkabilir. Eğer dolgu yatağı kurutulursa absorpsiyonun sona ermesine ya da ciddi absorpsiyon problemine neden olabilir. Bu durum ayrıca gaz çözünürlüğünü olumsuz etkiler ve absorpsiyon oranını doğrudan azaltır. Ayrıca, hava akımının yüksek sıcaklığı, gaz yıkayıcı malzemesine ve gaz yıkayıcı ekipmanına zarar verebilir. Korozyon meydana gelebilir. Bu nedenle, absorpsiyon eksikliğini önlemek için kirletici oluşumunun sıcaklığı dikkatli bir şekilde incelenmelidir. Yüksek sıcaklığa sahip kirli bir

hava akımı için, hava akımının sıcaklığı, yıkayıcıya girmeden önce genellikle kabul edilebilir bir sıcaklık düzeyine düşürülür. Örneğin, gaz yıkayıcıya kanallize edilmeden önce gaz sıcaklığını düşürmek için bir püskürtme odası veya bir söndürücü kullanılır. Bunun dışında hava akımının ve sıvının viskozitesi, yoğunluğu, difüzyonu ve diğer özellikleri sıcaklığa bağlıdır. Genel olarak, daha düşük bir sıcaklık, fiziksel absorpsiyon sürecini destekler ve gaz yıkayıcının iç kısmında hasarı korur (EPA, 1998).

2.5.1.6. Yapı Malzemesi

Gaz yıkayıcı malzeme seçimi esas olarak kirleticiye, proses çalışma koşuluna ve emici sıvıya bağlıdır. Bu nedenle, gaz yıkama ünitesi yapı malzemesi, gaz yıkayıcı verimliliğini etkileyen bir diğer faktördür. Seçilen malzeme aşındırıcı gaza dayanıklı olmalıdır. Aksi takdirde, yıkayıcı gövdesi paslanacaktır. Bu durum, aşırı emisyonla neden olacak ve yıkayıcının verimliliği buna bağlı olarak azalacaktır.

Bir yıkayıcının iyi bir çalışma koşuluna sahip olması, yıkayıcının verimli çalışması ve doğru bir materyalin seçilebilmesi için yıkayıcı materyali dikkatlice gözden geçirilmelidir. Örneğin, FRP, PP, HDPE yaygın bir yıkayıcı malzeme seçimidir. Bu malzemeler diğer inşaat malzemelerine göre ucuzdur. Ayrıca, yüksek korozyon direncine sahiptir.

Yıkayıcının iç yüzeyi, aşındırıcı gaz veya sıvı bulunması nedeniyle plastik veya korozyona dayanıklı malzemelerden olması gerekir. Örneğin, bir yıkayıcıya yüksek düzeyde aşındırıcı sıvı veya gazlar uygulandığında, yüzeyi paslanmaya karşı korumak için normal olarak gaz yıkayıcı ünitesinin iç yüzeyine polipropilen gibi plastik malzeme katmanları eklenir. Bunun dışında, yıkayıcı gövdesinin dış yüzeyi, yüzeyi çevresel şartlara veya atmosferik korozyona karşı korumak için epoksi reçine veya polivinil ester gibi bir kaplama ile kaplanabilir. Sonuç olarak, gaz yıkayıcı yapı malzemesinin doğru seçimi, yıkayıcı çalışmasını korozyon probleminden kaynaklanan aşırı emisyonlardan korur (Barbour ve Vataavuk, 1995).

2.5.1.7. Dolgu Malzemesi

Dolgu, gaz yıkama sistemi için kütle transfer ortamıdır. Etkin bir kütle aktarım işlemi sağlamak için, seçilen dolgunun sağlamlık açısından iyi özelliklere, iyi korozyon

direncine ve yüksek kütle aktarım verimliliğine sahip olması gerekir. Dolgu, gerekli gaz ve sıvı akış hızlarını da kaldırabilmelidir. Ayrıca, uygun maliyetli olması gerekir (Yap, 2005).

2.5.1.8. Sıvı Gaz Oranı

Çözünürlüğü çok yüksek bir gaz için, uygun olmayan sıvı beslemesi, dolgulu yatakta kuru kısım ile sonuçlanabilir ve absorpsiyon durur. Bu durum istenmeyen bir durumdur çünkü absorpsiyon sadece dolgu ıslandığında gerçekleşir. Bu problemin üstesinden gelmek için, gaz yıkayıcı verimliliğini etkileyen bir diğer önemli faktör olan sıvı/gaz oranının da uygun şekilde dikkate alınması gerekmektedir. Ayrıca, doğru bir sıvı/gaz oranı, taşma durumunu ve kötü yıkayıcı çalışmasını önlemeye yardımcı olur. Bunun dışında, gaz yıkayıcı performansını optimize etmek için farklı sıvı-gaz oranı gerektiren birçok dolgu geometrisi olduğundan, dolgulama için uygun sıvı-gaz oranı korunmalıdır. Pratikte, bir gaz yıkayıcı işlemi için sıvı/gaz oranı, teorik olarak hesaplanan minimum değerden yüzde 20 ila 50 oranında (yani taşma olmadan) daha büyük olmalıdır. Bu, dolgunun ıslak kalması için yeterli sıvının sağlanmasını garanti eder (EPA, 1991).

2.5.1.9. Bakım

Dolgu malzemeli ıslak yıkayıcılar, normal olarak diğer yıkayıcı sistemlerine kıyasla daha yüksek bir bakım maliyeti gerektirir. Bunun nedeni dolgu, pompa, damla tutucu ve fanın spesifikasyonlar dahilinde çalışabilmeleri için periyodik bakım gerektirmeleridir.

Tıkanma veya katı birikintileri, sıvı ve gazın düzgün olmayan akışına yol açabilecek şekilde dolgulu yatakta meydana gelebilir. Örneğin, kimyasal reaksiyonu içeren gaz yıkama işlemi, dolguyu tıkayabilen katı bileşik üretir. Ek olarak, kirli hava akımlarından gelen tozların dolguyu tıkaması da mümkündür. Bu durumlar yıkayıcının çalışmasında yetersizliğe neden olur ve bu nedenle bu katıların uzaklaştırılması gerekir.

Gaz yıkama ünitesinin katı partikül nedeniyle tıkanmaması için periyodik temizlik gereklidir. Temizlemeden önce gaz yıkama ünitesi durdurulur ve dolgu malzemeleri çıkarılır. Dolgu malzemeleri temizlendikten sonra yeniden gaz yıkama ünitesine aktarılır. Bunun dışında, aşındırıcı hava akımları tarafından parçalanmış dolguların yerine ilave dolgu malzemesi eklenmesi gerekmektedir.

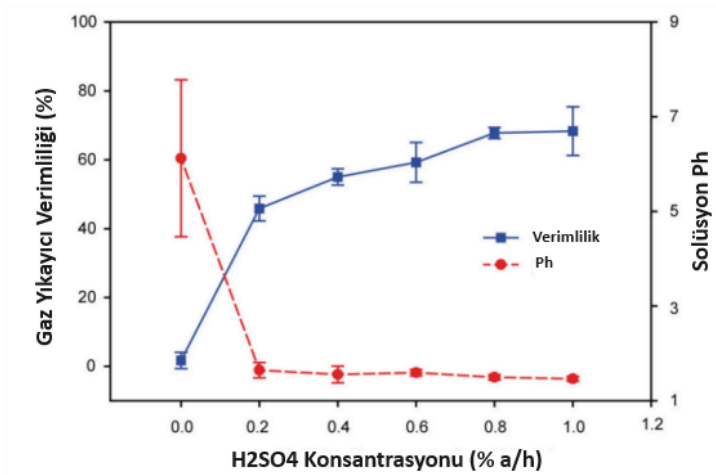
Ayrıca katı partikül nedeniyle tıkanma potansiyeline sahip olduğundan, damla tutucu için de temizlik gereklidir. Damla tutucu uygun şekilde temizlenmezse atmosfere aşırı sıvı taşınması meydana gelebilir. Benzer şekilde, sıvı akışının tekdüze olması ve tıkanmayı gidermek için pompa ve dolgu destek plakasının periyodik olarak temizlenmesi gerekir (Barbour ve Vataavuk, 1995).

Fan bakımı da önemlidir. Fan kayışı, fan pervane kanatları da zaman zaman kontrol edilmeli ve ihtiyaç durumunda değiştirilmelidir. Bu parçaların yanlış çalıştırılması, gaz yıkayıcı performansını düşürerek gaz akışını azaltabilir.

Gaz kanalı, dolgu malzemeli ıslak yıkayıcıların bir başka çalışma sorunudur. Gaz, en az direnç yolunu izleyerek dolgulu yataktan geçtiğinde gaz kanallaması oluşur. Bu durum daha düşük gaz akış hızından kaynaklanır ve daha fazla boşluk bulunan yerlerde olur. Sonuç olarak, gaz, dolgu üzerinde eşit olarak dağılmamaktadır. Bu sorunun üstesinden gelmek için gaz ve sıvı akış hızlarının uygun bir seviyede tutulması ve bu nedenle her zaman denetime ihtiyaç duyulmaktadır. (Barbour ve Vataavuk, 1995).

2.6. Dolgu Malzemeli Gaz Yıkayıcı Üzerine Bilimsel Araştırmalar

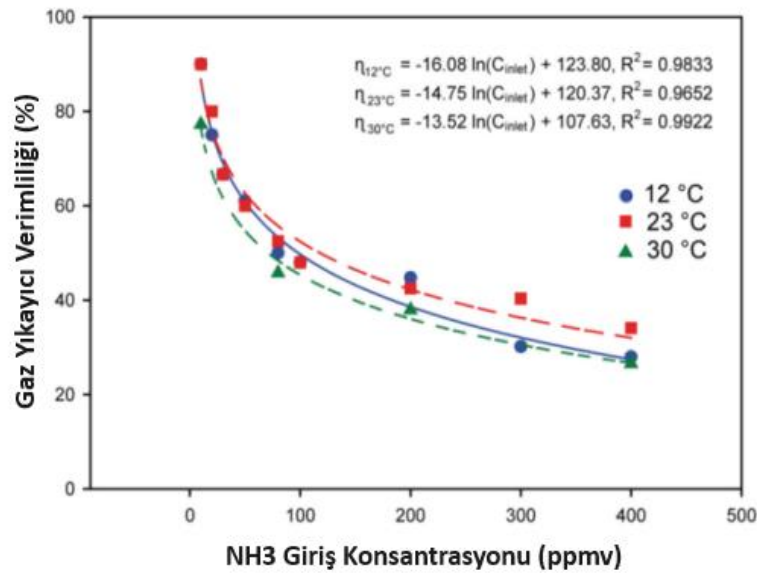
Manuzon ve arkadaşlarının araştırmalarına göre, amonyak gazı gideriminde sirkülasyon sıvısının asitlik derecesinin, daha yüksek Henry kanunu çözünürlüğü ve NH_3 'ün asit çözeltisiyle daha yüksek kimyasal reaksiyon hızının bir sonucu olarak, gaz fazındaki NH_3 'ün sıvı faza emilimini büyük ölçüde arttırdığı gözlemlenmiştir.



Şekil 2.9. Amonyak gideriminde sirkülasyon sıvı asitliğinin etkisi (Manuzon ve diğ., 2014)

Şekil 2.9, 30 ppmv’lik sabit bir giriş NH_3 konsantrasyonu için sülfürik asit (H_2SO_4) konsantrasyonunun artırılmasının gaz yıkayıcının absorpsiyon verimliliği üzerindeki etkisini gösterir. Sonuçlar, asit konsantrasyonunun gaz yıkayıcının absorpsiyon verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu gösterir. H_2SO_4 konsantrasyonunun %0’dan %0,2’ye artması veya eşdeğer olarak pH = 6,12’den ($\pm 1,65$) pH = 1,72’ye ($\pm 0,16$) düşmesi üzerine, yıkayıcı verimliliği hızla %44 oranında artar.

Manuzon ve arkadaşlarına göre, maksimum verimlilik %68’lik ($\pm \%7$), deneysel olarak pH = 1,48’e eşdeğer olan %1’lik H_2SO_4 ’te gözlemlenmiştir. Bu nedenle, 30 ppmv’nin üzerindeki yüksek konsantrasyonlu hava akımlarının arıtılması için en az %1 asit konsantrasyonunun varsayılması güvenli olacağı bildirilmiştir. Sonraki deneylerde, temizleme ortamındaki optimize edilmiş asit konsantrasyonu olarak %1 (ağırlık/hacim) H_2SO_4 kullanılmıştır. Fazla asidin varlığı teknik bir avantaj olmasına rağmen, optimize edilmiş konsantrasyonu aşmayacak şekilde iyi kontrol edilmelidir. Yüksek düzeyde asidik bir çözelti, son derece aşındırıcı olduğundan ve metalleri güçlü bir şekilde oksitleyebildiğinden, operasyonel bir zorluk olabilir. Suda çözündüğünde ekzotermik yapısı, yıkayıcının çalıştırılmasında da bir güvenlik sorunudur.



Şekil 2.10. Gaz yıkayıcı verimliliğinde hava sıcaklığı etkisi (Manuzon ve diğ., 2014)

Şekil 2.10, NH_3 konsantrasyonunun gaz yıkayıcı verimliliği üzerindeki etkisinin, NH_3 konsantrasyonunun doğal logaritması ile doğru orantılı olduğunu göstermektedir. Normal oda koşulları altında NH_3 konsantrasyonu 10 ila 400 ppmv arasında

değiştğinde gaz yıkayıcı verimliliği %90 ile %34 arasında değişmektedir. Doğal log ilişkisi, girişteki NH_3 konsantrasyonu arttıkça gaz yıkayıcı verimliliğinin sabit bir değerde stabilize olacağını, bu noktada gaz yıkayıcının kararlı durum koşullarında çalıştığını ve asidik çözeltinin emebileceği NH_3 miktarının belirli gaz-sıvı temas süresinde sabit kaldığını ileri sürmüştür. Böyle bir etki, sıvının mevcut absorp kapasitesinin azalmasından ve dolayısıyla emilim oranının düşmesinden kaynaklanmaktadır (Kiil ve diğ., 1998). Bu etki yalnızca sıvı-gaz oranının artırılmasıyla telafi edilebilir; bu da yıkayıcıya gazın akış hızının azaltılmasıyla veya yıkayıcı kademe sayısının artırılmasıyla yapılabilir.

Şekil 2.10'a göre, sıcaklığın etkisine ilişkin nitel gözlem, düşük konsantrasyon aralığında performans açısından belirgin bir eğilim göstermemiştir. Sabit giriş NH_3 konsantrasyonunda sıcaklıktaki her artışta verimlilik orantılı olarak azalmamıştır.

Hava sıcaklığı gazın sıvıdaki çözünürlüğü için önemli bir faktördür. Teknik olarak gazın sıvıdaki çözünürlüğü, Henry kanununun çözünürlüğünden etkilenen gaz fazı ile sıvı faz arasındaki dengeye bağlıdır. Artan hava sıcaklığı, gazın buhar basıncını artırma eğilimindedir; bu da gaz-sıvı yüzey etkileşiminde sıkıntıya neden olur ve çözünmüş gazın bir kısmının yeniden sıvı faza buharlaşmasına izin verir. Bununla birlikte, ortak değişken olarak hava sıcaklığı ile yapılan istatistiksel analiz, 12°C ila 30°C arasındaki sıcaklıklar için hava sıcaklığının verimlilik üzerinde anlamlı bir etkisi göstermemiştir. Bu çalışma sıcaklığı aralığı için, sıcaklığın gaz yıkama işleminde önemli bir rol oynamadığı varsayılmıştır (Manuzon ve diğ., 2014).

Hong ve arkadaşlarının çalışmasına göre; Ağustos 2016'dan Mart 2020'ye kadar 3,5 yıl içinde bir yarı iletken üretim fabrikasında gaz halindeki asidik gazları ve kokuyu gidermek için ıslak gaz yıkayıcının uzun vadeli performansı değerlendirilmiştir. 12 kez tekrarlanan gaz yıkayıcı giderim verimliliği testinin sonuçları; gaz yıkayıcının, H_2SO_4 için 240–1583 ppbv, HNO_3 için 1234–12.390 ppbv ve HCl için 1384–15.200 ppbv ve HF için 31.874–180.700 ppbv düşük ve yüksek giriş konsantrasyonlarıyla değişen gaz halindeki asidik gazları ve kokuyu giderebildiği göstermiştir. Sırasıyla HF için %96- 98, HCl için %96-99, HNO_3 için %95-99 ve H_2SO_4 için %95-98 olan tüm giderim verimliliği verileri, Tayvan'daki kontrol cihazları yönetmeliğini karşıladığı belirtilmiştir (Hong ve diğ., 2021).

Gaz yıkayıcının teorik giderim verimliliği ve yüksekliği, teorik denklemlerin gaz yıkayıcı tasarımını kolaylaştırabileceğini gösteren deneysel verilere yakın olduğu belirtilmiştir. Gaz yıkayıcı özellikle düşük çözünürlük ve ayrışma kabiliyetine sahip asidik gazlar için, gaz karışımı kontrolü için daha yüksek teorik giderim verimliliği ve daha düşük teorik yükseklik gösterdiği belirtilmiştir. Yani, dolgu ıslak gaz yıkayıcı, uzun vadede yüksek giderim verimliliği ve düşük basınç düşüşü ile karışık asidik gazlar ve koku kontrolü için etkili bir cihaz olarak kullanılabilir (Hong ve diğ., 2021).

Bangwoo ve arkadaşları; farklı boyuttaki dolgu malzemelerinin HCl, NH₃, HF gaz ve buharlarının dolgu malzemeli ıslak gaz yıkayıcıda giderimini gözlemlemek için çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmada, dolgu malzemeli gaz yıkayıcının performansını gözlemlemek için, farklı akış hızlarında, sıvı-gaz oranlarında ve pH değerlerinde; tek tip, 4 farklı boyutta dolgu malzemesi araştırılmıştır. Araştırmada ıslak gaz yıkayıcının giriş ve çıkışında gazların konsantrasyonları ölçülüp giderim verimliliğine ulaşılmıştır. Bangwoo ve arkadaşlarına göre; dolgu malzemesi boyutu küçüldükçe gaz giderim verimliliği artmıştır. Bu durum da yüzey alanının artmasına neden olmuştur. Hava debisinin artmasıyla gaz giderim verimliliğinin azalmasına, sıvı-gaz (L/G) oranının artması ise gaz giderim oranının artmasına neden olmuştur. Amonyak (NH₃) gazında daha düşük pH, hidroklorik asit (HCl) ve hidroflorik asit (HF) durumunda ise daha yüksek pH, gaz giderim verimliliğine katkıda bulunmuştur. Gaz yıkayıcının giderim verimliliği, toksik gaz ve buharların sudaki çözünürlüğüne göre artmıştır (Bangwoo ve diğ., 2005).

3. MALZEME VE YÖNTEM

Dolgu malzemeli gaz yıkayıcılar, ürün geri kazanım cihazları ve hava kirliliği kontrol cihazları olarak gaz akışlarının ayrılması ve saflaştırılması için endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Dolgu malzemeli gaz yıkayıcılar en yaygın olarak suda çözünür inorganik kirleticileri hava akımlarından uzaklaştırmak için kullanılır. Gaz yıkayıcının verimliliği, hava kirliliği kontrolü için önemlidir.

Bu çalışmada inorganik gazların giderimi kapsamında, lastik sektöründe kord bezi üretiminden kaynaklanan; amonyak giderimi, galvaniz sektöründe kimyasal temizleme amaçlı yüzey işlem tanklarında açığa çıkan; hidroklorik asit giderimi, kimya sektöründe, kimyasal malzeme üretiminden kaynaklanan; hidroflorik asit, fosforik asit, sülfürik asit, nitrik asit, amonyak giderimi, uçak motor aksamaları üretiminden kaynaklanan havacılık sektöründe; hidroklorik asit, hidroflorik asit, sülfürik asit, nitrik asit giderimi ve gıda endüstrisinde, özellikle yumurta üretimi sürecinden kaynaklanan; hidroflorik asit, fosforik asit, sülfürik asit, nitrik asit, hidroklorik asit, amonyak giderimini gözlemlemek amacıyla tek kademeli, dolgu malzemesi olarak pall halkası kullanılan gaz yıkayıcı üniteleri uygulamaları, tasarımı, giderim verimlilikleri incelenmiş ve karşılaştırma yapılmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında; lastik, galvaniz, kimya, havacılık ve gıda sektörleri olmak üzere, pall halkası entegre edilmiş gaz yıkayıcılarda, toplamda 5 adet sektörde üretimden kaynaklı açığa çıkan inorganik gaz ve buharların giderimi incelenmiştir. Araştırmada toplamda 6 adet farklı gaz yıkama ünitesi kullanılmıştır. Bu kapsamda, öncelikle belirlenen tesislerin gaz debisi, atık gaz türü ve atık gaz konsantrasyonları gibi etkenler dikkate alınarak tasarım gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında önerilen tasarımların etkinlikleri izlenmiş olup, inorganik gazların baca gazı emisyon veya imisyon ölçümleri, akreditasyon sertifikasına sahip kuruluşlar tarafından gerçekleştirilmiştir. Son olarak, gaz yıkayıcı verimlilikleri incelenip, yapı ve işletme maliyetleri değerlendirilmiştir.

Aşağıda araştırmada kullanılan gaz yıkama ünitesi sektörleri kısaca tanımlanıp, açığa çıkan inorganik gazlar belirtilmiştir.

3.1. Gaz Yıkama Üniteleri Araştırmasında Kullanılan Sektörler

Gaz yıkama ünitesi araştırmasında; farklı sektörlerde, pall halkası entegre edilmiş tek kademeli gaz yıkama ünitesinde inorganik gazların giderimini gözlemlemek amacıyla, lastik, galvaniz, kimya ve havacılık olmak üzere toplamda beş adet sektör incelenmiştir.

Tüm sektörlerde gaz arıtma ünitesine giriş konsantrasyon değerleri firmalar tarafından firma gizliliği nedeniyle paylaşılamadığından; belirtilen amonyak, hidroklorik asit, hidroflorik asit, nitrik asit, sülfürik asit ve fosforik asit gaz ve buhar giriş konsantrasyonları literatür araştırmalarıyla elde edilmiştir.

Amonyak gaz giriş konsantrasyon değerleri; kimya sektörü için 160 ppm (Zhu ve diğ., 2012), lastik sektörü için 1500 ppm (Pansang ve diğ., 2014), gıda sektörü için, 200 ppm (Galecki ve diğ., 2019) olarak alınmıştır.

Hidroklorik asit buhar giriş konsantrasyon değerleri; havacılık sektörü için 50 ppm (NASA, 1978), galvaniz ve gıda sektörü için sırasıyla 100 ve 30 ppm olarak alınmıştır (Hull ve diğ., 2008).

Hidroflorik asit gaz buharı giriş konsantrasyon değerleri; havacılık, kimya ve gıda sektörleri için sırasıyla 50, 100 ve 30 ppm olarak alınmıştır (NICNAS, 2001).

Nitrik asit gaz buharı giriş konsantrasyon değerleri; havacılık, kimya ve gıda sektörleri için sırasıyla 25, 75 ve 50 ppm olarak alınmıştır (HEW, 1976).

Sülfürik asit gaz buharı giriş konsantrasyon değerleri; kimya, havacılık ve gıda sektörleri için sırasıyla 30, 50 ve 25 ppm olarak alınmıştır (ESA, 2000).

Fosforik asit gaz buharı giriş konsantrasyon değerleri; kimya ve gıda sektörleri için sırasıyla 5 ve 38 ppm olarak alınmıştır (Sluis, 1987).

3.1.1. Lastik Sektörü

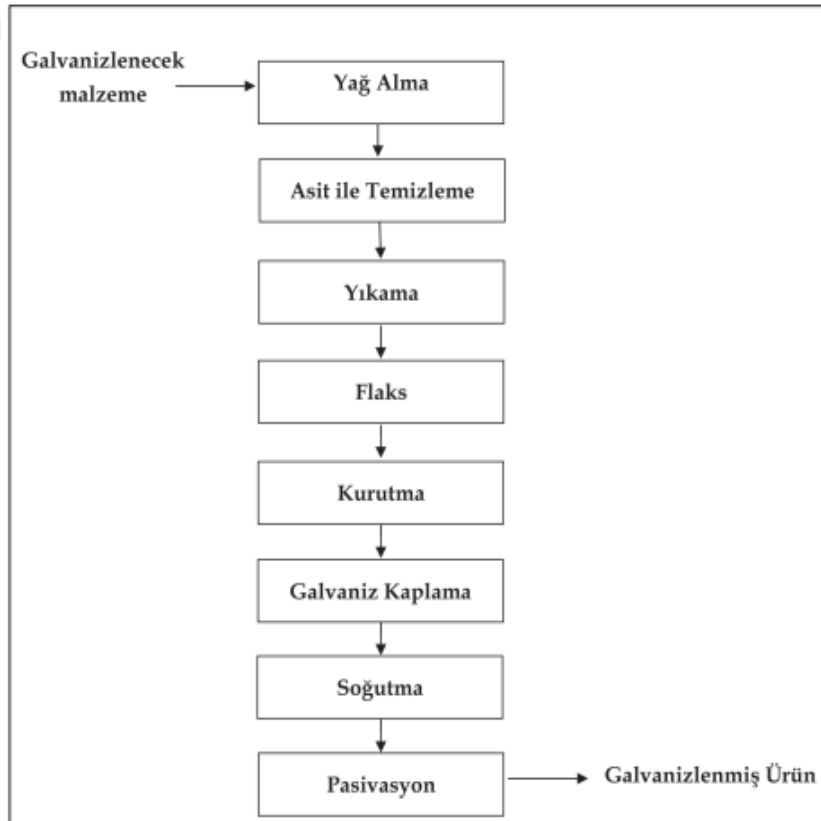
Kord bezi, ham ipliklerin bükülmesi ve katlanmasıyla elde edilen bir malzemedir. Kauçuk karışımları ile birleştirilerek oluşturulan kord bezi, karmaşık ve kompozit bir üründür, genellikle bir veya birkaç katmandan oluşur. Kord bezi üretimi, ham ipliklerin

tek veya çok katlı olarak bükülmesiyle başlar. Ardından bükülmüş iplikler, ince atkılar kullanılarak dokunur. Bu süreç sonunda elde edilen kord bezine, sıcak-germe prosesi ve özel solüsyonlarla yapılan işlemler uygulanarak, lastik üretiminde kullanılmak üzere özel yapışkanlık ve fiziksel özellikler kazandırılır. Bu aşamaların sonucunda, lastik sektöründe kord bezinin üretimi sırasında ortaya çıkan amonyak gazının arıtılması, pall halkası kullanılan gaz yıkama sisteminde detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Amonyak gaz giderimi kapsamında; 2.500 m³/sa debili gaz yıkama ünitesi tasarlanıp, tesiste amonyak gazı giderim verimliliği gözlemlenmiştir.

3.1.2. Galvaniz Sektörü

Galvaniz sektöründe, yüzey işlem tanklarındaki malzemeler, yağdan arındırıldıktan sonra üzerlerindeki pasın başka bir deyişle oksit tabakasının temizlenmesi için asit havuzlarına daldırılır. Bu aşamada genellikle sıcak sülfürik asit veya oda sıcaklığında hidroklorik asit kullanılarak kimyasal temizleme işlemi gerçekleştirilir. Galvaniz kaplama prosesi Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Galvaniz kaplama prosesi akım şeması (Yetiş ve diğ., 2016)

Pall halkası entegre edilmiş gaz yıkama ünitesinde asit gazı arıtımı gerçekleştirecek bölüm, HCl asit kullanılan asit temizleme bölümüdür. Bu bölümde sıcak daldırmadan kaynaklı HCl asit gazı giderimi incelenmiştir.

Hidrolorik asit buharı giderimi kapsamında; 50.000 m³/sa debili gaz yıkama ünitesi tasarlanıp, tesiste HCl asit buharı giderim verimliliği gözlemlenmiştir.

3.1.3. Kimya Sektörü

Kimya endüstrisinde, metallerin korozyondan korunması ve parçaların boyama öncesinde uygun hazırlığı oldukça karmaşık ve özen gerektiren bir süreçtir. Bu süreçte, metal yüzeylerin özel bir koruyucu katman ile kaplanması, çeşitli kimyasal maddelerin kullanılması ve bu maddelerin ardından parçaların boyama işlemine geçilmesi söz konusudur.

Kimyasal üretim prosesleri sonucunda, hidroflorik asit, fosforik asit, sülfürik asit, nitrik asit ve amonyak gibi inorganik maddelerin gaz formundaki atıkları, çevresel etkileri en aza indirmek ve iş sağlığı güvenliği önlemlerini artırmak amacıyla özel bir gaz yıkama ünitesi ile kontrol altına alınmıştır.

Gaz yıkama ünitesinde dolgu malzemesi olarak pall halkası kullanılmıştır. Belirilen gaz yıkayıcının inorganik gazları temizleme veya arıtma işlemleri incelenmiştir.

Yukarıda belirtilen inorganik gazların giderimi kapsamında; 7.500 m³/sa debili gaz yıkama ünitesi tasarlanıp, tesisteki inorganik gazların giderim verimliliği incelenmiştir.

3.1.4. Havacılık Sektörü

Havacılık endüstrisinde, uçak motoru parçalarının üretim sürecinde ortaya çıkan inorganik gazların kontrolü, özellikle hidroklorik asit, hidroflorik asit, sülfürik asit ve nitrik asit gibi maddelerin gaz formundaki atıklarının arıtılması, dolgu malzemesi olarak pall halkası kullanılan gaz yıkama sistemi ile detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Yukarıda belirtilen inorganik gazların giderimi kapsamında; 50.000 m³/sa ve 100.000 m³/sa debili gaz yıkama ünitesi tasarlanıp, tesisteki inorganik gazların giderim verimliliği incelenmiştir.

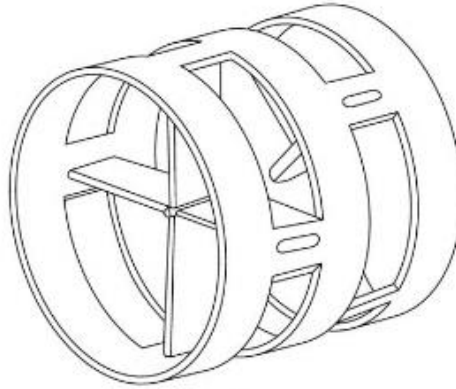
3.1.5. Gıda Sektörü

Gıda sektöründe, yumurta üretiminden kaynaklı, tavukların beslenip, yetiştirildiği ortamda açığa çıkan, hidroflorik asit, fosforik asit, sülfürik asit, nitrik asit, hidroklorik asit ve amonyak gazların arıtılması dolgu malzemesi olarak pall halkası kullanılan gaz yıkayıcı ile detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Yukarıda belirtilen inorganik gazların giderimi kapsamında; 10.000 m³/sa debili gaz yıkama ünitesi tasarlanıp, tesisteki inorganik gazların giderim verimliliği incelenmiştir.

3.2. Pall Halkası

Gaz yıkama kulelerinin tasarımı ve inorganik gazların giderim verimliliğini etkileyen en önemli parametrelerden biri de dolgu malzemesidir. Gaz yıkama kulelerinde dolgu malzemesi kullanılmasının amacı, temas için yeterli gaz kalış süresine izin veren geniş bir temizleme sıvısı yüzey alanı sağlamaktır. Dolgu malzemesi, gaz ve sıvı fazlar arasında türbülanslı karışımı teşvik eder. Dolgu malzemesi, piyasada çeşitli şekillerde mevcuttur. Plastik pall halkası Şekil 3.2’de gösterilmektedir.

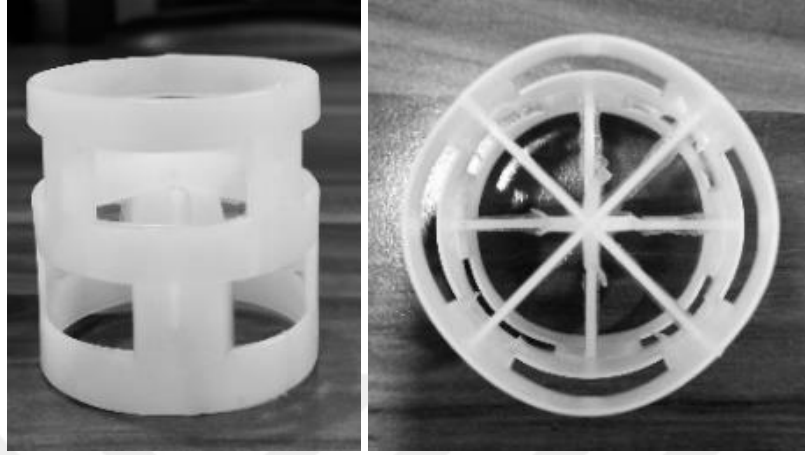


Şekil 3.2. Plastik pall halkası (Coulson ve diğ., 2002)

Dolgu malzemelerinden olan pall halkaları, Alman gelişimidir. Pall halkası şekli esasen raschig halkasının modifikasyonudur. Pall halkası, 5/8 ile 3,5 inç arasında değişen boyutlarda polipropilen veya diğer termoplastiklerden yapılır.

Şekil 3.3’de araştırmada kullanılan pall halkası gösterilmektedir. Bu çalışmada; düşük maliyet, yüksek boşluk hacmi, düşük basınç düşüşü, düşük kütle transfer birimi yüksekliği, düzgün gaz-sıvı teması, küçük özgül ağırlık, yüksek kütle transfer

verimliliği gibi etkenler nedeniyle dolgu malzemesi olarak polipropilen malzemeden 50 mm boyutunda pall halkası kullanılmıştır. Tablo 3.1 Araştırmada kullanılan dolgu malzemesinin karakteristik özelliklerini göstermektedir.



Şekil 3.3. Araştırmada kullanılan pall halkası

Tablo 3.1. Araştırmada kullanılan pall halkasının karakteristik özellikleri (Green ve diğ., 2019)

Dolgu İsmi	Malzeme	Boyut, (mm)	Yatak Yoğunluğu (kg/m ³)	Alan m ² /m ³	% Boşluk	Dolgu Faktörü (m ⁻¹)	
						Normal F _p	Kuru F _{pd}
Pall Halkası	Plastik	15	95	350	87	320	348
		25	71	206	90	180	180
		40	70	131	91	131	131
		50	60	102	92	85	82
		90	43	85	95	56	39

3.3. Pall Halkası Entegre Edilmiş Gaz Yıkama Kulesi Tasarımı

Dolgu malzemeli gaz yıkayıcıların çalışması, kütle transferi sürecine dayanmaktadır. Bu tip gaz yıkayıcılardaki kütle transferi, gaz moleküllerinin sıvıya transfer edilmesini içerir.

Kütle transferi süreci, gaz fazındaki kirleticinin proses akımından sirkülasyon sıvısına transfer edildiği, çözünen bir gazın sıvı çözücü ile etkileşimde bulunduğu bir mekanizma temel alınarak geliştirilmiştir.

Kütle aktarım hızı, dolgu malzemeli gaz yıkayıcıların performansı için önemlidir çünkü kirleticinin uzaklaştırılma hızını büyük ölçüde etkiler.

Tasarım prosedürlerinin birincil amaçları, kule yüzey alanını ve kule boyunca basınç düşüşünü belirlemektir. Bu parametreleri belirlemek için; kuleye giren ve çıkan gaz ve sıvı akış koşulları, absorpsiyon faktörü (AF), kule çapı (D), kule yüksekliği (H), kule yüzey alanı (S), dolgu malzemeli kule için basınç düşüşü (P) belirlenmelidir.

Boyutlandırma prosedürlerini basitleştirmek için birtakım varsayımlar yapılır. Örneğin, atık gazın, iki bileşenli bir atık gaz karışımından (kirletici/hava) oluştuğu varsayılır; burada kirletici, seyreltik miktarlarda bulunan tek bir bileşikten oluşur. Atık gazın ideal bir gaz gibi davrandığı ve çözücünün ideal bir çözücü gibi davrandığı varsayılır.

Absorpsiyon ile ilişkili ısı etkilerinin, karşılaşılan kirletici konsantrasyonları için minimum düzeyde olduğu kabul edilir. Prosedürler ayrıca, kimyasal absorpsiyonda, işlemin reaksiyon hızının sınırlı olmadığını, yani kirleticinin çözücü ile reaksiyonunun, kirleticinin çözücüye absorpsiyon hızına kıyasla hızlı kabul edildiğini varsayar.

Normal şartlarda, hava kirliliği ıslak gaz yıkayıcı tasarım projesi için kirletici gazın giriş konsantrasyonu, gaz akış hızı, sıcaklık ve basınç sabittir. Giderim verimliliği de normalde belirtilir ve mevcut temizleme sıvısı bilinir.

Tasarımın zorluğu, kirleticinin belirlenmiş çıkış konsantrasyonunu elde etmek için yıkama kulesi çapını, dolgulu bölümün derinliğini ve gerekli temizleme sıvısı akış hızını belirlemektir. Kulenin toplam yüksekliği daha sonra bu sonuçlara göre belirlenecektir. Dikkate alınması gereken bir diğer husus, kuledeki toplam yük kaybının arıtma sisteminin işletme maliyetini doğrudan etkileyeceğidir.

Malzeme dengesi, denge eğrisinden belirlenen sıvı/gaz oranına dayalı olarak gerekli sirkülasyon sıvısı debisini belirler. Absorpsiyon faktörünün, bir yıkayıcı tasarım projesinde en iyi ekonomiyi sağlamak için 1,25 ile 2,0 arasında değiştiği yaygın olarak kabul edilmektedir.

Tasarımlarda, absorpsiyon faktörü 1,6 olarak kullanılmıştır. Absorpsiyon faktörü; sıvı ve gazın molar debilerini belirler. Sıvının molar debisi Denklem (3.1) ve (3.2)'deki gibi;

$$L_{mol}=(AF)(m)(G_{mol}) \quad (3.1)$$

$$L_{mol}=(1,6)(m)(G_{mol}) \quad (3.2)$$

Şeklinde olacaktır. AF absorpsiyon faktörü, L_{mol} molar sıvı debisi (lb-mol/h), G_{mol} gaz debisi (lb-mol/h), m , denge eğrisinin eğimi olarak ifade edilir.

Gaz akış debisinin scfm biriminden Q_e olarak tanımlanmasından şu sonuç çıkar Denklem (3.3)'teki gibi;

$$G_{mol}=0,155 (Q_e) \quad (3.3)$$

İfade edilir.

Sıvı çözücü akış hızı L_{gal} (gal/dk) olarak ifade edebilir. Burada MWçözücü, sirkülasyon sıvısının moleküler ağırlığıdır. DL, sıvının yoğunluğudur (lb/ft³). Kübik fiti galon'a dönüştürmek için 7,48 faktörü kullanılır. Çözücü olarak su kullanıldığında, DL 62,43 lb/ft³'e, MWçözücü ise 18 lb/lb-mol'e eşittir. Denklem (3.4) ve (3.5)'teki gibi;

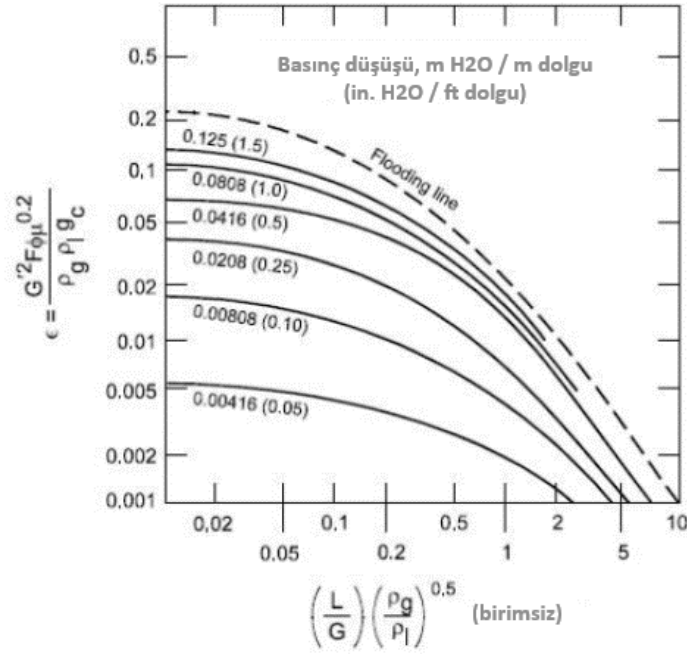
$$L_{gal}=\frac{\left[L_{mol} \times MW_{\text{çözücü}} \times \left(\frac{1}{DL} \right) \times 7,48 \right]}{60} \quad (3.4)$$

$$L_{gal}=0,036 L_{mol} \quad (3.5)$$

İfade edilir.

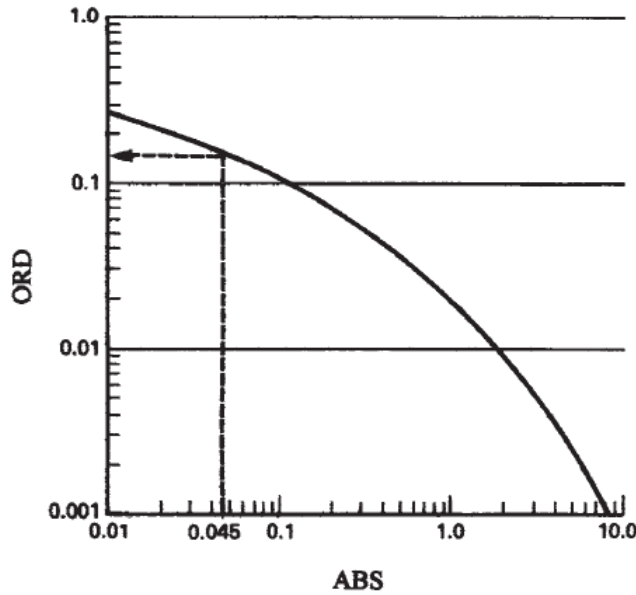
Dolgulu kuleye giren ve çıkan gaz ve sıvı akışları, kirletici madde ve çözücü konsantrasyonlarıyla birlikte tanımlandıktan sonra debileri hesaplanır ve çalışma koşulları belirlenir. Bu veriler, kullanılan dolgu türüyle birleştirildiğinde kulenin gerçek boyutunu belirlenir.

Kule boyutu, aşırı yük kaybı olmaksızın gaz ve sıvı akışlarını kabul edecek yeterlikte olmalıdır. Kule çapını belirlemek için ortak bir korelasyon Şekil 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.4. Basınç düşüşü korelasyonu sıvı dağıtım çeşitleri (Joseph, 1998)

Kule çapının belirlenmesi, geleneksel olarak su basmasına yönelik bir yaklaşıma dayanmaktadır. Maksimum verime ulaşmak için normal çalışma aralığı, kule boyutlandırma amacıyla su basma oranının %60 -75'ini kullanmak olmuştur. Su baskını durumunda, gazın kule boyunca yukarı doğru akışı sıvının aşağı doğru akışını engeller. Şekil 3.5'de dolgulu kulelerde taşma düzeltmesi verilmiştir.



Şekil 3.5. Dolgulu gaz yıkayıcılarda taşma düzeltmesi (Lawrence ve diğ., 2004)

Kule çapının belirlenmesi için öncelikle apsis (ABS) hesaplanır. Denklem (3.6)'daki gibi;

$$ABS = \left(\frac{L}{G}\right) \left(\frac{DG}{DL}\right)^{0,5} \quad (3.6)$$

İfade edilir.

L çözücü akış debisi (lb/sa) = (MW_{çözücü})(L_{mol}), G gaz debisi (lb/sa) = (MW_e)(G_{mol}), DL sıvının yoğunluğudur (lb/ft³). DG, gaz akışının yoğunluğudur (lb/ft³).

DG Denklem (3.7)'deki gibi;

$$DG = PM/RT \quad (3.7)$$

İfade edilir. Burada P basınç (atm) ve genellikle 1 atm'dir. M gazın moleküler ağırlığıdır (lb/lbmol). R gaz sabitidir (0,7302 ft³atm/lb-mol °R) ve T sıcaklıktır (°R). L ve G değerleri, Lmol ve Gmol'un ilgili molekül ağırlıklarıyla çarpılmasıyla belirlenir. Daha sonra, Şekil 3.3'deki taşma çizgisi ordinatı (ORD) okumak için kullanılır. ORD Denklem (3.8)'deki gibi;

$$ORD = \frac{[Galan, f]^2 \left(\frac{a}{e}\right)^3 (\mu L^{0,2})}{[(DG)(DL)(gc)]} \quad (3.8)$$

İfade edilir. Galan, f, taşma noktasındaki kule kesit alanına dayalı gaz akışı debisidir (lb/ft²sn). μL , sıvının viskozitesidir (cP) ve gc, yerçekimi sabitidir (32,2 ft/sn²). Denklem (3.8.) de yer alan a ve e dolgu faktörleridir.

Galan, f, Denklem (3.9)'daki gibi;

$$Galan, f = \frac{[(ORD)(DG)(DL)(gc)]}{\left[\left(\frac{a}{e}\right)^3 (\mu L^{0,2})\right]^{0,5}} \quad (3.9)$$

İfade edilir.

Burada, f'nin verilen tasarıma uygun taşkın oranı olduğu varsayımı yapılmıştır. Bu örnekte 0,6'lık bir f değeri kullanıldığında, yukarıda belirlenen kesit alanı için gaz akışı debisi Galan Denklem (3.10)'daki gibi;

$$Galan=f (Galanf) \quad (3.10)$$

İfade edilir. Daha önce de belirtildiği gibi, su baskını fraksiyonu (f) için normal çalışma aralığı; 0,60-0,75'tir. Bu nedenle kule kesit alanı Denklem (3.11)'deki gibi;

$$A_{kolon} = \frac{G}{3600 (Galanf)} \quad (3.11)$$

İfade edilir. Gaz yıkama kulesinin çapı olan Dkolon (ft), Denklem (3.12)'deki gibi;

$$D_{kolon} = \left[\left(\frac{4}{\pi} \right) (A_{kolon}) \right]^{0,5} = 1,13 (A_{kolon})^{0,5} \quad (3.12)$$

Belirlenebilir. Artık kule çapı bilindiğine göre, gerekli kaldırma verimliliği için yeterli olan dolgulu bölümün yüksekliği belirlenir. Dolgu yüksekliği, teorik transfer birimleri (NTU) sayısının transfer ünitesinin yüksekliği (HTU) ile çarpılmasıyla belirlenir.

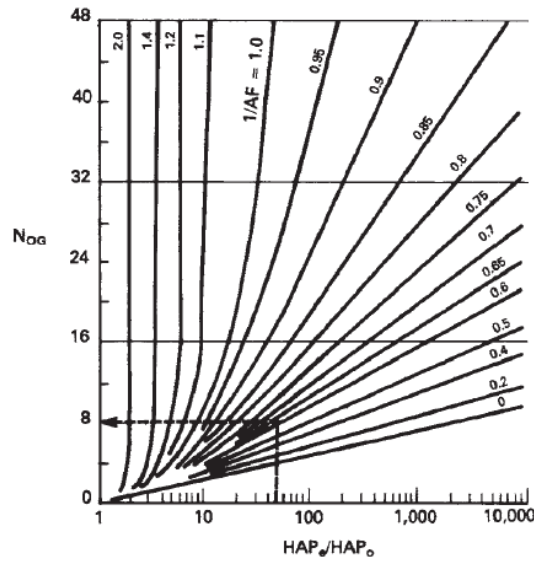
HTU, sirkülasyon sıvısında artıran kirleticinin çözünürlüğüne bağlıdır. Daha büyük HTU değerleri kirleticinin sirkülasyon sıvısı kütle transferine karşı daha fazla direnci yansıtır. HTU, fit cinsinden verilir ve sistemdeki kütle aktarımına karşı sınırlayıcı dirence bağlı olarak Nog olarak ifade edilir. Bir kirleticinin gaz halindeki bir akımdan temizlendiği bu örnekte, gaz filmi direnci, sıvı filmin aksine büyük olasılıkla kütle transferini kontrol etmektedir. Dolgulu kule yüksekliği Denklem (3.13)'deki gibi;

$$H_{tkolon}=Nog \times Hog \quad (3.13)$$

Belirlenir. Htkolon dolgulu kule yüksekliğidir (ft), Nog; gaz transfer birimlerinin sayısı, genel gaz filmi katsayılarına dayalı ve boyutsuzdur. Hog genel gaz filmi katsayılarına (ft) dayalı olarak genel bir gaz transfer ünitesinin yüksekliğidir. Kısaca Nog hesaplamaları Denklem (3.14)'deki gibi;

$$Nog = \ln \left\{ \left(\frac{HAPe}{HAPo} \right) \left(1 - \frac{1}{AF} \right) + \left(\frac{1}{AF} \right) \right\} / \left(1 - \frac{1}{AF} \right) \quad (3.14)$$

İfade edilir. Denklem (3.14) yıkama kulesinde gerçekleştirilecek verimliliği belirlemektedir. Kirleticinin giriş ve çıkış konsantrasyonu, Denklem (3.1)'de gösterildiği gibi absorpsiyon faktörü, AF aracılığıyla transfer birimlerinin sayısı Nog ile ilişkilidir. Alternatif olarak Şekil 3.6'da, Nog'u grafiksel olarak belirlemek için kullanılabilir.



Şekil 3.6. Nog, AF ve verimlilik ilişkisi (Lawrence K. ve diğ., 2004)

Giderim verimliliği (RE), kirleticinin giriş ve istenilen çıkış konsantrasyonundan Denklem (3.15)'deki gibi;

$$HAPo = HAPe \left[1 - \left(\frac{RE}{100} \right) \right] \quad (3.15)$$

Belirlenebilir. Kirleticinin çıkış konsantrasyonu, belirlenen giderim verimliliği için gereken dolgu derinliğini elde etmek amacıyla Denklem (3.13) kullanılır.

Genel bir ifade, daha büyük bir Nog değerinin, itici güç (konsantrasyon gradyanı) tükenene kadar daha yüksek bir giderim verimliliği sağladığıdır. Bu noktada, iki faz arasında artık kirlетici madde transferi gerçekleşmez.

Giderim verimliliği gereksinimini karşılamak için gereken transfer birimlerinin sayısı (Nog) bilindikten sonra, her bir transfer biriminin (Hog) yüksekliği Denklem (3.16)'ya göre;

$$Hog = HG + \left(\frac{1}{AF} \right) (HL) \quad (3.16)$$

Belirlenebilir. Denklem (3.16)'da HG gaz transfer ünitesinin yüksekliği (ft) ve HL sıvı transfer ünitesinin yüksekliğidir (ft). Gaz ve sıvı akış hızlarıyla birlikte seçilen dolgu malzemesine dayalı olarak HG ve HL'yi belirlemek için genelleştirilmiş korelasyonlar mevcuttur. Bunlar Denklem (3.17) ve Denklem (3.18)'deki gibi;

$$HG = \left[\frac{b(3600 \text{ Galan})^c}{(L'')^d} \right] (ScG)^{0,5} \quad (3.17)$$

$$HL = Y \left(\frac{L''}{\mu L''} \right)^S (ScL)^{0,5} \quad (3.18)$$

İfade edilebilir. Gaz film transfer birimi sabitleri Tablo 3.2'de gösterilmiştir.

Tablo 3.2. Gaz film transfer birimi sabitleri (Lawrence ve diğ., 2004)

Dolgu Malzemesi	b	c	d	Aralıklar	
				3600 Galan (lb/h-ft2)	L" (lb/h-ft2)
Rashing Halkaları					
0,375 in.	2,32	0,45	0,47	200-500	500-1.500
1 in.	7,00	0,39	0,58	200-800	400-500
	6,41	0,32	0,51	200-600	500-4500
1,5 in.	17,30	0,38	0,66	200-700	500-1500
	2,58	0,38	0,40	200-700	1500-4500
2 in.	3,82	0,41	0,45	200-800	500-4500
Berl Halkaları					
0,5 in.	32,40	0,30	0,74	200-700	500-1500
	0,81	0,30	0,24	200-700	1500-4500
1 in.	1,97	0,36	0,40	200-800	400-4500
1,5 in.	5,05	0,32	0,45	200-1000	400-4500
3-in. Bölme Halkaları	650,00	0,58	1,06	150-900	3000-10000
Spiral Halkalar					
3 in. Tek Spiral	2,38	0,35	0,29	130-700	3000-10000
3 in. Üçlü Spiral	15,60	0,38	0,60	200-1000	500-3000

Sıvı film transfer birimi sabitleri Tablo 3.3’de gösterilmiştir.

Tablo 3.3. Sıvı film transfer birimi sabitleri (Lawrence ve diğ., 2004)

Dolgu Malzemesi	Y	S	L" (lb/h-ft2) Aralığı
Rashing Halkaları			
0,375 in.	0,00182	0,46	400-15000
0,5 in.	0,00357	0,35	400-15000
1 in.	0,01	0,22	400-15000
1,5 in.	0,0111	0,22	400-15000
2 in.	0,0125	0,22	400-15000
Berl Halkaları			
0,5 in.	0,00666	0,28	400-15000
1 in.	0,00588	0,28	400-15000
1,5 in.	0,00625	0,28	400-15000
3-in. Bölme Halkaları	0,0625	0,09	3000-14000
Spiral Halkalar			
3 in. Tek Spiral	0,00909	0,28	400-15000
3 in. Üçlü Spiral	0,0116	0,28	3000-14000

Denklemlerde b, c, d, Y ve s Tablo 3.2 ve Tablo 3.3’deki deneysel dolgu malzemesi sabitleridir. L" sıvı debisidir. (lb/sa-ft2), μL " sıvı viskozitesidir (lb/ ft-sa), ScG, gaz akışının Schmidt sayısıdır. ScL, sıvı akışının Schmidt sayısıdır. Deneysel dolgu malzemesi bazı sabitleri Tablo 3.2’de gösterilmektedir.

Çeşitli kirleticiler için ScG ve ScL değerleri literatürde verilmektedir. Bu örnekte sıcaklığın Sc üzerindeki etkisi göz ardı edilmiştir. L" Denklem (3.19)’a göre;

$$L'' = L / A_{kolon} \quad (3.19)$$

Belirlenir. Toplam kule yüksekliği, H_{toplam} ve D_{kolon} kullanılarak Denklem (3.20)’ye göre;

$$H_t(\text{toplam}) = H_{tkolon} + 2 + (0,25 D_{kolon}) \quad (3.20)$$

İfade edilir.

Tablo 3.4 ve Tablo 3.5’de sırasıyla havadaki gazlar ve buharlar için schmidt sayıları ve sudaki bileşikler için schmidt sayıları yer almaktadır.

Tablo 3.4. Havadaki gaz ve buharlar için 77 °F ve 1 atm’de schmidt sayıları (Lawrence ve diğ., 2004)

Madde	ScGa	Madde	ScGa
Amonyak	0,66	Valerik asit	2,31
Karbon Dioksit	0,94	Kaproik asit	2,58
Hidrojen	0,22	Dietil amin	1,47
Oksijen	0,75	Butilamin	1,53
Su	0,6	Anilin	2,14
Karbon disülfid	1,45	Kloro benzen	2,12
Etil eter	1,66	Kloro tolüen	2,38
Metanol	0,97	Propilen bromür	1,47
Etil alkol	1,3	Propilen iyodür	1,61
Propil alkol	1,55	Benzen	1,76
Butil alkol	1,72	Tolüen	1,84
Amil alkol	2,21	Ksilen	2,18
Heksil alkol	2,6	Etil benzen	2,01
Propiyonik asit	1,56	Oktan	2,58
Bütirik asit	1,91	Mesitilen	2,31

Tablo 3.5. Sudaki bileşikler için 68°F ve 1 atm’de schmidt sayıları (Lawrence ve diğ., 2004)

Çözünen	ScL	Çözünen	ScL
Oksijen	558	Gliserol	1400
Karbon Dioksit	559	Pirogallol	1440
Nitrojen Oksit	665	Hidrokinon	1300
Amonyak	570	Üre	946
Bromin	840	Rezorsinol	1260
Hidrojen klorür	381	Üretan	1090
Hidrojen sülfür	712	Laktoz	2340
Sülfirik asit	580	Maltoz	2340
Nitrik asit	390	Rafinoz	2720
Asetilen	645	Sakaroza	2230
Asetik Asit	1140	Sodyum Klorür	745
Metanol	785	Sodyum Hidroksit	665
Etanol	1105	Karbon Dioksit	445
Propanol	1150	Fenol	1900
Bütanol	1310	Kloroform	1230
Alil alkol	1080	Asetik Asit	479
Fenol	1200	Etilen diklorür	301

Gerçek dolgu malzemesi maliyeti, kuleyi doldurmak için gereken dolgu hacmine, Vdolgu (ft³) bağlıdır ve Denklem (3.21) ve Denklem (3.22)'ye göre;

$$V_{dolgu} = \left(\frac{\pi}{4}\right) (D_{kolon})^2 (H_{tkolon}) \quad (3.21)$$

$$V_{dolgu} = 0,785 (D_{kolon})^2 (H_{tkolon}) \quad (3.22)$$

Şeklinde ifade edilir.

3.4. İncelenen İnorganik Gazlar ve Özellikleri

Araştırmada; amonyak, hidroklorik asit, hidroflorik asit, nitrik asit, sülfürik asit ve fosforik asit inorganik gaz ve buharları incelenmiştir.

Tablo 3.6'da incelede inorganik gazlar ve özellikleri yer almaktadır.

Tablo 3.6. İncelenen İnorganik Gazlar ve Özellikleri (Green ve diğ., 2019)

Gaz	Molüküler Ağırlık (g/mol)	Erime Sıcaklığı (°C)	Kaynama Sıcaklığı (°C)	Özkütle (g/cm ³)	Kimyasal Özellik	Fiziksel Özellik
NH ₃	17,03	-77,7	-33,4	0,59	Korozif ve toksik	Renksiz
HCl	36,46	-27,32	110	1,18	Korozif ve toksik	Renksiz
HF	20,01	-83,6	19,5	0,99	Korozif ve toksik	Renksiz
HNO ₃	63,01	-42	121	1,51	Korozif ve toksik	Renksiz
H ₂ SO ₄	98,08	10,31	337	1,84	Korozif ve toksik	Renksiz
H ₃ PO ₄	98,00	42,35	158	1,68	Korozif ve toksik	Renksiz

3.5. İnorganik Gazların Ölçüm Yöntemleri

Pall halkası entegre edilmiş tek kademeli gaz yıkayıcılarının inorganik gaz çıkış konsantrasyonlarını belirleme sürecinde, akreditasyon belgeli uzman kurumlar

aracılığıyla gerçekleştirilen emisyon veya imisyon ölçümleri değerlendirilmiştir. Bu kritik ölçümlerde, markası RAE olan gaz dedektör tüp sistemi ve/veya numune alma pompası ile markası Extech olan çoklu gaz ölçüm cihazı tercih edilmiştir.

Gaz dedektör tüp sisteminin çalışma prensibi, gaz numunesinin kimyasal reaksiyon ve fiziksel absorpsiyon temelli kuru analiz yöntemiyle değerlendirilmesini içermektedir. Tüp içindeki kimyasal maddenin ve gazın reaksiyonu sonucunda oluşan renk değişimi, inorganik gazların konsantrasyonunu hassas bir şekilde belirleyerek güvenilir ölçüm sonuçları sağlamaktadır.

Ölçümler aşağıda verilen standartlar çerçevesinde gerçekleştirilmiştir;

- TS EN 689, İşyeri havası solunumla maruz kalınan kimyasal maddelerin sınır değerler ile karşılaştırılması ve ölçme stratejisinin değerlendirilmesi için kılavuz.
- ASTM D4490-96, Toksik gaz ve buharların havadaki konsantrasyonlarının dedektör tüp kullanarak ölçülmesi.
- TS EN 1911, Sabit kaynak emisyonları -HCl olarak tanımlanan gaz halindeki klorürlerin kütle konsantrasyonunun tayini.

3.6. Pall Halkaları Entegre Edilmiş Gaz Yıkayıcı Verimliliği

Bu çalışmada; uçak motor ve motor parçaları üretimi, kimyasal malzeme üretimi, galvaniz sektöründe yüzey işlem tanklarında kimyasal temizleme uygulaması, yumurta üretimi ve kord bezi üretimi yapılan tesislerde açığa çıkan inorganik gazların pall halkaları entegre edilmiş gaz yıkama ünitesi ile giderim verimliliği gözlemlenmiştir.

İnorganik gazların giderim verimliliği belirlenirken 03.07.2009 tarih ve 27277 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanan Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği’ndeki endüstriyel gazların çıkış parametreleri baz alınmıştır.

Pall halkaları entegre edilmiş gaz yıkama ünitesi tasarımından ve kurulumundan sonra Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliği Yönetmeliği kapsamında, inorganik gazların ölçüm sonuçlarının kullanımı amaçlanmıştır. Emisyon veya imisyon ölçüm sonuçlarına göre gaz yıkayıcı verimliliğini etkileyen faktörleri belirlemek için ilgili tüm veriler analiz edilmiştir. Veriler, tek kademeli dolgu malzemesi olarak pall halkası kullanılan gaz

yıkama ünitesinde inorganik gazların giderim verimliliğini belirlemek için kullanılmıştır. Belirlenen bu verimler karşılaştırılmıştır.

Gaz yıkayıcı malzeme seçimi esas olarak kirleticiye, proses çalışma koşuluna ve emici sıvıya bağlıdır. Bu nedenle, gaz yıkama ünitesi yapı malzemesi, gaz yıkayıcı verimliliğini etkileyen bir diğer faktördür. Bir yıkayıcının iyi bir çalışma koşuluna sahip olması, yıkayıcının verimli çalışması ve doğru bir materyalin seçilebilmesi için yıkayıcı materyali dikkatlice gözden geçirilmelidir. Bu çalışmada, yapı malzemesi olarak polipropilen (PP) ve yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) malzemeden tek kademeli gaz yıkama kuleleri incelenmiştir.

Araştırmada kullanılan pall halkası entegre edilmiş gaz yıkayıcı giderim verimliliği Denklem 3.23'e göre;

$$\eta = \left(1 - \frac{Y_o}{Y_i}\right) \times 100 \quad (3.23)$$

Şeklinde ifade edilir. Denkleme göre η , giderim verimliliği (%), Y_i , inorganik gaz veya buharın giriş konsantrasyonu (mg/m^3), Y_o , inorganik gaz veya buharın çıkış konsantrasyonu (mg/m^3) olacak şekildedir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Pall Halkası Entegre Edilmiş Gaz Yıkama Kulesi Boyutlandırılması

Lastik, kimya, gıda, galvaniz ve havacılık sektörlerinde kullanılan toplamda 6 adet gaz yıkama kulelerinin boyutlandırılması için hesaplamalar ayrı ayrı yapılmıştır. Tablo 4.1’de araştırmada incelenen toplamda 6 adet gaz yıkama ünitelerinin tasarım özetleri verilmiştir.

Tablo 4.1. Gaz yıkama kulelerinin tasarım özellikleri

Gaz Yıkayıcı No	Sektör Türü	Gaz Debisi (m ³ /sa)	Gaz Yıkayıcı Çapı, Ø (mm)	Gaz Hızı (m/sn)	Dolgu Yüksekliği (mm)	Temas Süresi (sn)	L/G (L/m ³)
1	Lastik	2.500	800	1,38	1.500	1,09	3,6
2	Kimya	7.500	1.600	1,03	1.500	1,45	2
3	Gıda	10.000	1.200	2,46	3.000	1,22	4
4	Galvaniz	50.000	3.500	1,44	2.000	1,39	1
5	Havacılık	50.000	2.600	2,62	3.000	1,15	2
6	Havacılık	100.000	4.000	2,2	2.000	0,90	1

Aşağıda sadece lastik sektöründe, amonyak giderimi için boyutlandırılan pall halkası entegre edilmiş gaz yıkama ünitesine ait hesaplamalar açıklanmıştır.

4.1.1. Lastik Sektörü Gaz Yıkama Kulesi Boyutları

Lastik sektöründe 2.500 m³/sa debili pall halkası entegre edilmiş gaz yıkama sistemi tasarımı yapılmıştır. Her bir gaz yıkama kulesi için ayrı ayrı hesaplamalar yapılmıştır. Bu bölümde, amonyak (NH₃) gazı giderimi kapsamında 1 numaralı 2.500 m³/sa debili gaz yıkama kulesi boyutlandırması yer almıştır.

Tablo 4.2’de özet tasarım kriterleri gösterilmiştir.

Tablo 4.2. Bir numaralı gaz yıkama kulesi tasarım özellikleri

Gaz	Sektör	Gaz Yıkayıcı No	Gaz Debisi (m ³ /h)	Gaz Yık. Çapı, Ø (mm)	Gaz Hızı (m/sn)	Dolgu Yük. (mm)	Temas Süresi (sn)	Çözücü Sıvı	L/G (L/m ³)	Giriş Kons. (mg/m ³)	Giriş Kons. (PPMv)
NH ₃	Lastik	1	2500	800	1,38	1500	1,09	Su	3,6	1045	1500

Tasarımda basınç 1 atm, sıcaklık 25 °C bir diğer deyişle 77 °F olarak belirtilmiştir.

Aşağıda gaz yıkayıcının boyutlandırma hesaplamaları yapılmıştır.

$$\text{Gaz debisi (Qe)} = 2.500 \text{ m}^3/\text{sa} = 1.471 \text{ scfm}$$

$$T, \text{ sıcaklık} = 77 \text{ °F} = 536,67 \text{ °R}$$

$$R, \text{ gaz sabiti} = 0,7302 \text{ ft}^3\text{atm/lb-mol °R}$$

$$MW_{\text{çözücü}} = 18 \text{ lb/lbmol}$$

$$MW_{\text{gaz}} = 17 \text{ lb/lbmol}$$

$$DL = 62,43 \text{ lb/ft}^3$$

$$G_{\text{mol}} = (0,155) (1471) = 228 \text{ lbmol/sa}$$

$$L_{\text{mol}} = (1,6) (1) (228) = 364,8 \text{ lbmol/sa}$$

$$G = (228 \text{ lbmol/sa}) (17 \text{ lb/lbmol}) = 3.876 \text{ lb/sa}$$

$$L = (364,8 \text{ lbmol/sa}) (18 \text{ lb/lbmol}) = 6.566,4 \text{ lb/sa}$$

$$DG = [(1)(17)] / [(0,7302) \times (536,67)] = 0,043 \text{ lb/ft}^3$$

$$ABS = (6566,4 / 3876) (0,043/62,43)^{0,5} = 0,045$$

ABS sonucuna göre Şekil 3.3'te belirtilen grafikten ORD değeri 0,15 olarak okunur.

Gaz yıkama kulesi tasarımında 2" boyutunda pall halkası kullanılmıştır. Buna göre; dolgu sabitleri $a = 31$ ve $e = 0,92$ olarak alınmıştır. Ek olarak; yer çekimi sabiti, $g_c = 32,2 \text{ ft/sn}^2$, sıvının viskozitesi, $\mu_L = 1 \text{ cP}$ olarak alınmıştır.

$$\text{Galan, } f = \{[(0,15) (0,043) (62,43) (32,2)] / [31/0,92^3]\}^{0,5} = 0,57 \text{ lb/ ft}^2\text{sn}$$

$$\text{Galan} = 0,34 \text{ lb/ ft}^2\text{sn}$$

$$A_{\text{kolon}} = (3876 \text{ lb/sa}) / (3600 \times 0,34 \text{ lb/ ft}^2\text{sn}) = 3,17 \text{ ft}^2$$

$$D_{\text{kolon}} = 1,13 (3,17)^{0,5} = 2,01 \text{ ft} \rightarrow 2,5 \text{ ft tasarım olarak alınmıştır.}$$

Gaz yıkayıcı kule çapı, $D_{kolon} = 2,5 \text{ ft} = 0,8 \text{ m} = 800 \text{ mm}$

Giriş konsantrasyon değeri; firmalar tarafından firma gizliliği nedeniyle paylaşılamadığından, 1500 ppm olacak şekilde literatür araştırmalarından yararlanılmıştır.

Sistem giderim verimi hesaplamalarda Tablo 2.1'e göre; amonyak gideriminde minimum değer olan %90 olarak varsayıp çıkış konsantrasyon değerine ulaşılmıştır.

$HAPo = 1500 \text{ ppmv} [1-(90/100)] \rightarrow$ Gaz arıtma kulesinin NH_3 giriş konsantrasyonu, $HAPo$ 150 ppmv olacak şekilde tasarım yapılmıştır.

Gaz arıtma kulelerinde kullanılan 2" pall halkası için dolgu sabitleri $b=2,3$ $c=0,33$ $d=0,40$ $Y=0,002$ ve $s=0,33$ olarak alınmıştır.

Amonyak giderimi için sabit olarak schmidt sayıları gaz ve sıvı değerleri Tablo 3.4 ve Tablo 3.5'de belirtilmiştir. Tablolara göre $ScG = 0,66$ ve $ScL = 570$ olarak alınmıştır.

$$L'' = (6566,4 \text{ lb/hr}) / (3,17 \text{ ft}^2) = 2071,4 \text{ lb/ ft}^2\text{hr}$$

$$\mu L'' = (1 \text{ cP}) (2,42) = 2,42 \text{ lb/fthr}$$

$$HG = [2,3 (3600 \times 0,34)^{0,33} / (2071,4)^{0,40}] (0,66)^{0,5} = 0,92 \text{ ft}$$

$$HL = 0,002 (2071,4/2,42)^{0,33} (570)^{0,5} = 0,44 \text{ ft}$$

$$Hog = 1,92 + (1/1,6) (0,44) = 1,2 \text{ ft}$$

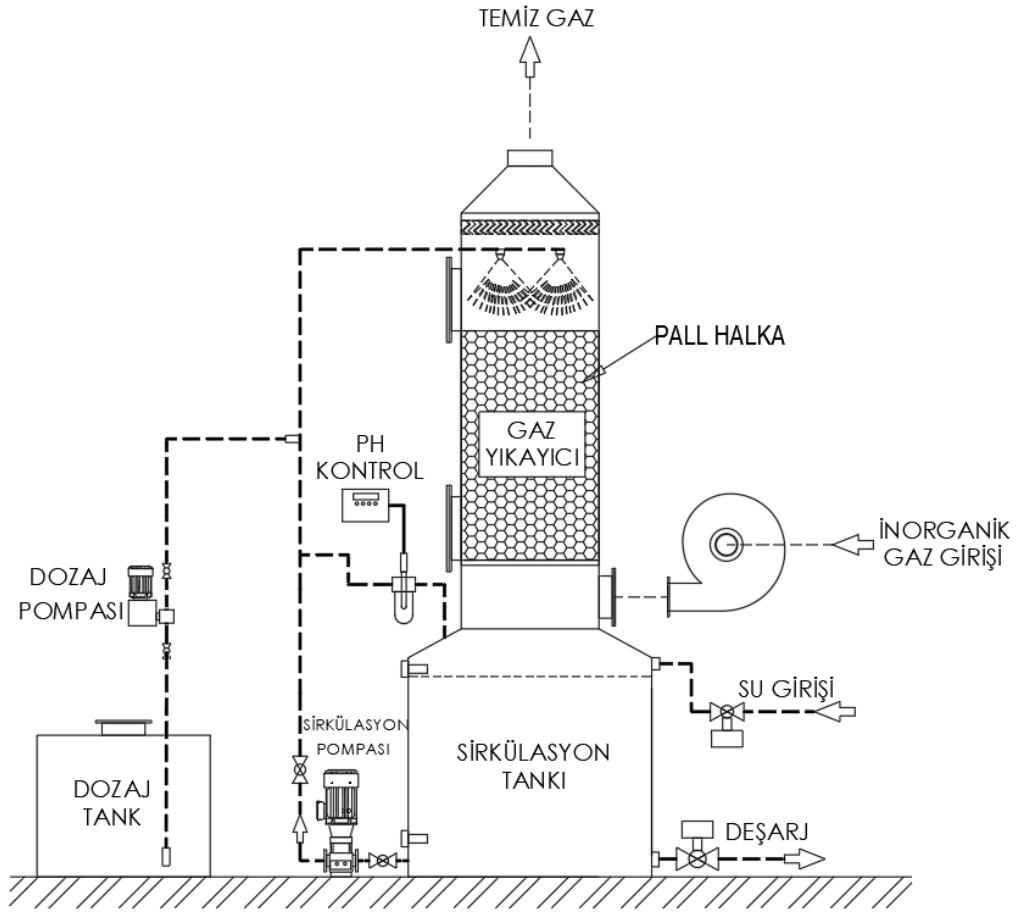
Sıvı transfer yüksekliği Şekil 3.6'ya göre Nog değeri 4 olarak okunur.

$H_{tkolon} = (4) (1,2) = 4,8 \text{ ft} = 1,46 \text{ m} \rightarrow$ Dolgu yüksekliği teorik olarak 1,5 m başka bir deyişle 1500 mm olarak alınmıştır.

4.2. İnorganik Gazların Giderimi

Araştırmada toplamda altı adet gaz yıkayıcı incelenmiştir.

Şekil 4.1'de sunulan tasarım, altı farklı gaz yıkama ünitesi için uyarlanmıştır.



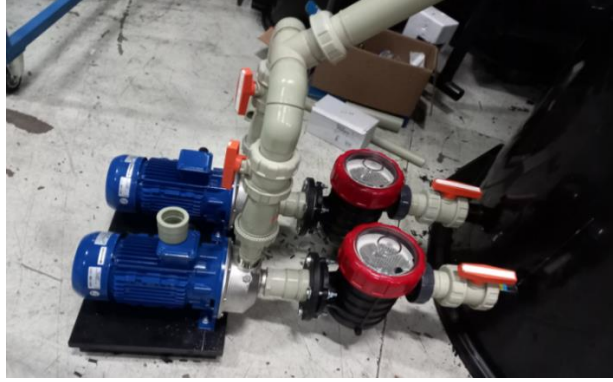
Şekil 4.1. Gaz yıkayıcı şeması

Gaz yıkama ünitelerinin her birinde; radyal santrifüj fan, pall halkası (50 mm, 2inç boyutunda), elektrikle çalışan taze su alma vanası, elektrikle çalışan sıvı boşaltma vanası, sirkülasyon pompası, pH metre ve pH prob, sirkülasyon pompası, nem tutucu, homojen sıvı dağılımı sağlamak için spiral nozullar kullanılmıştır. Kimyasal dozaj gerektiren gaz yıkama sistemlerinde ise, dozaj tankı ve dozaj pompaları eklenmiştir. Kontrol panelleri üzerinde yer alan göstergelerle altı adet gaz yıkama sistemi otomasyonu yönetilmektedir.



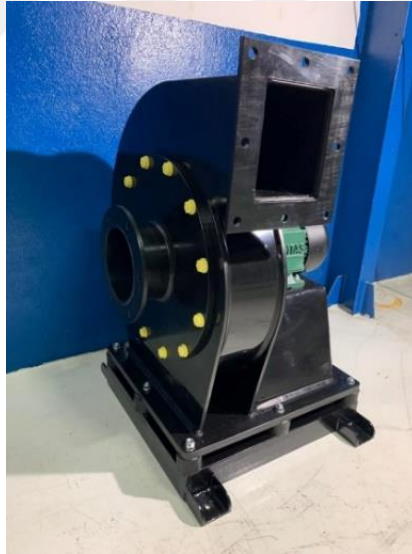
Şekil 4.2. Petek damla tutucu (URL-5)

Gaz yıkama ünitelerinde, Şekil 4.2’de gösterildiği gibi PVC malzemeden, 300 mm boyutlarında petek damla tutucu kullanılmıştır.



Şekil 4.3. Sirkülasyon pompası

Gaz yıkama ünitelerinde; sirkülasyon pompaları, sıvı devridaiminde kullanılmıştır. Şekil 4.3’de yer alan santrifüj sirkülasyon pompaları öncesinde pislik tutucu yer alıp, sirkülasyon haznesinde bulunabilecek veya oluşabilecek partikülleri tutup, sirkülasyon pompasına partikül kaçma olasılığını önlemektedir.



Şekil 4.4. Radyal fan

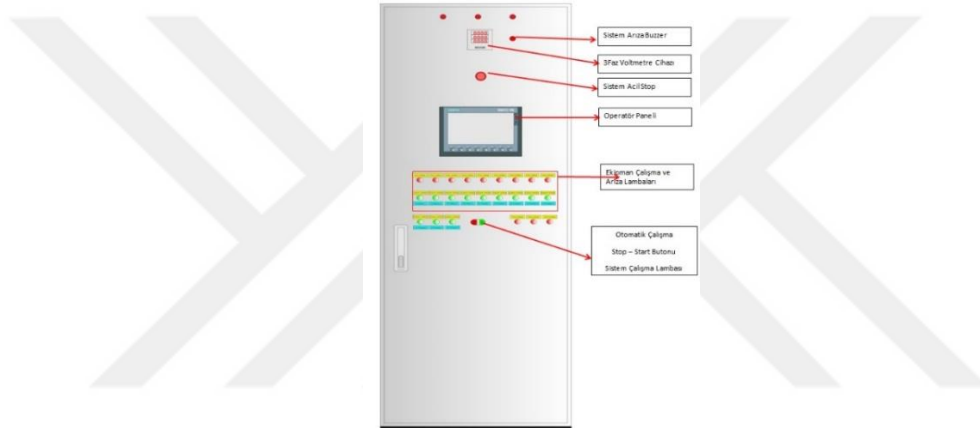
Gaz arıtma ünitelerinde Şekil 4.4’de görüldüğü üzere, salyangoz tip radyal fan kullanılmıştır.

Sirkülasyon sıvı haznesinin kontrolü ve sirkülasyon pompaların kuru çalışmasını önlemek amaçlı sıvı haznesinde alt ve üst olmak üzere Şekil 4.5’de gösterilen seviye şalterleri kullanılmıştır.



Şekil 4.5. Seviye şalteri (URL-6)

Ph metre ve pH prob gaz yıkama ünitelerine, sirkülasyon sıvısının kontrolü ile için konulmuştur. Sirkülasyon sıvı pH'ı sürekli olarak kontrol edilmektedir. Sirkülasyon sıvısı yeterli doygunluğa ulaştığında, aktüatörlü vanalar aracılığıyla çözelti deşarj edilip, taze su alınmaktadır.



Şekil 4.6. Plc kontrol panosu

Gaz yıkama sistemini kontrol amaçlı Şekil 4.6'da belirtildiği gibi plc otomasyon sistemi kullanılmıştır. Kontrol panosu aracılığıyla her bir gaz yıkama sistemi otomatik veya manuel çalıştırılabilmektedir. Kontrol panosunda başlatma ve durdurma butonları mevcut olup, ekipmanların çalışma ve arıza durumu gözlemlenebilmektedir.

Şekil 4.1'de sunulan gaz yıkama sistemi, inorganik gazların temizlenmesinde etkili bir süreci göstermektedir. Kirlletici inorganik gaz, radyal fan yardımıyla sirkülasyon bölümünün üst kısmına yönlendirilir ve buradan kulenin dolgulu bölüme taşınır. İnorganik gazın yukarıdan aşağıya hareketi sırasında, sirkülasyon pompası (santrifüj pompa) ve spiral nozullar yardımıyla kulenin üst bölümünden aşağıya doğru sıvı akışı gerçekleşir. İnorganik gaz, bu süreçte su veya sulu çözelti ile temas ederek arıtılır. Temizlenen gaz, yukarı doğru ilerleyerek damla tutucudan geçer ve atmosfere bırakılmadan önce sıvı zerreciklerden arındırılır. Sıvı çözücü genellikle alt kısımda

sirkülasyon haznesi bölümünde bulunur. Bu bölümde kirleticileri emer ve pall halkası entegre edilmiş tek kademeli gaz yıkayıcı aracılığıyla atmosfere temiz gaz bırakılır.

4.3. Amonyak Giderimi

İnorganik gazlardan olan amonyağın, gaz yıkama sisteminde arıtılmasına dair gözlem sonuçları Tablo 4.3’de bulunmaktadır.

Tablo 4.3. Amonyak gözlem sonuçları

Gaz	Sektör	Gaz Yıkayıcı No	Gaz Debisi (m ³ /h)	Gaz Yık. Çapı, Ø (mm)	Gaz Hızı (m/sn)	Dolgu Yük. (mm)	Temas Süresi (sn)	Çözücü Sıvı	Ph	L/G (L/m ³)	Giriş Kons. (mg/m ³)	Çıkış Kons. (mg/m ³)	Gaz Yıkayıcı Verimliliği (%)
NH ₃	Kimya	2	7.500	1.600	1,03	1.500	1,45	Su + H ₃ PO ₄	3	2	111	<0,004	99,99
	Gıda	3	10.000	1.200	2,46	3.000	1,22	Su + H ₂ SO ₄	3	4	139	1,26	99,09
	Lastik	1	2.500	800	1,38	1.500	1,09	Su	8	3,6	1045	86,73	91,7
	Lastik	1	2.500	800	1,38	1.500	1,09	Su	11	3,6	1045	142,41	86,37

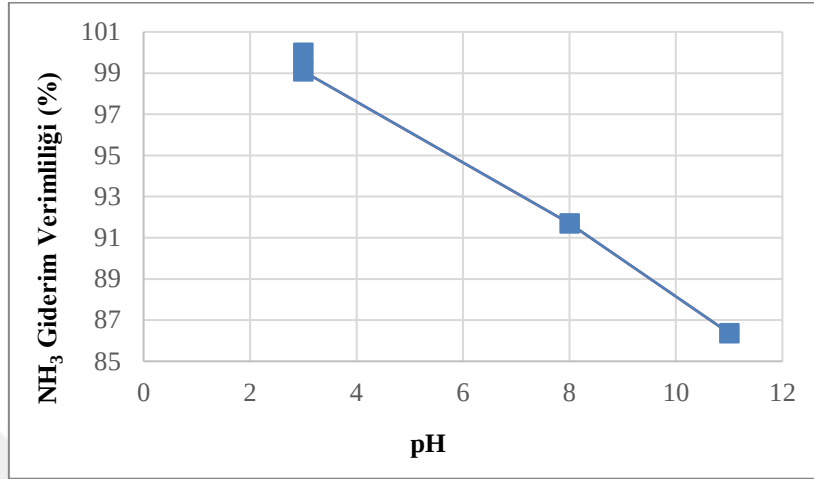
29211 sayılı Sanayi Kaynaklı Kontrol Yönetmeliği inorganik buhar ve gaz emisyonları sınır değerleri tablosuna göre; amonyak gazı sınır değeri 200 mg/Nm³ olarak belirtilmiştir.

Amonyak gazı giderimi üzerine yapılan gözlemler, lastik, kimya ve gıda sektörlerinde kullanılan farklı üç adet gaz yıkama sistemi ile incelenmiştir; bu sistemler sırasıyla 2.500 m³/sa, 7.500 m³/sa ve 10.000 m³/sa debilere sahiptir.

Özellikle 2.500 m³/sa debili 1 numaralı gaz yıkama ünitesinde, sadece su kullanılarak elde edilen dört farklı sonuç, pH değerinin değiştirilmesiyle elde edilmiştir.

Tablo 4.3’ten elde edilen verilere göre, en yüksek giderim oranı 2 numaralı gaz yıkama ünitesinde elde edilmiştir. 7.500 m³/sa debili 2 numaralı gaz yıkama ünitesinde, pH değerini ayarlamak amacıyla gaz yıkama ünitesine fosforik asit kimyasalı dozlanmıştır. Ek olarak en yüksek temas süresi iki numaralı gaz yıkama ünitesinde gözlemlenmiştir. Gaz temas süresinin diğer gaz yıkama ünitelerine oranla daha yüksek olması giderim verimliliğine katkıda bulunmuştur.

Daha yüksek Henry kanunu çözünürlüğü ve amonyağın asit çözeltisiyle daha yüksek kimyasal reaksiyon hızı oluşması nedeniyle çözücü sıvının pH değeri azaldıkça giderim verimliliğinin arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.7. NH₃ giderim verimliliği

Şekil 4.7'deki grafik, amonyak giderim verimliliğinin pH değeri ile ilişkisini (gaz yıkayıcıda 50 mm boyutunda pall halkası kullanıldığında) göstermektedir.

4.4. Hidroklorik Asit Giderimi

Hidroklorik asit gaz buharı giderimi gözlemlenirken, farklı sektörlerde kullanılan dört farklı gaz yıkama ünitesi sistemi incelenmiştir. Bu sistemler sırasıyla 10.000 m³/sa, iki adet 50.000 m³/sa ve 100.000 m³/sa debilere sahiptir ve gıda, havacılık, galvaniz ve havacılık sektörlerini kapsamaktadır. Gaz yıkama sisteminde gözlemlenen, Hidroklorik asit gaz buharının giderilmesine dair sonuçlar Tablo 4.4'te bulunmaktadır.

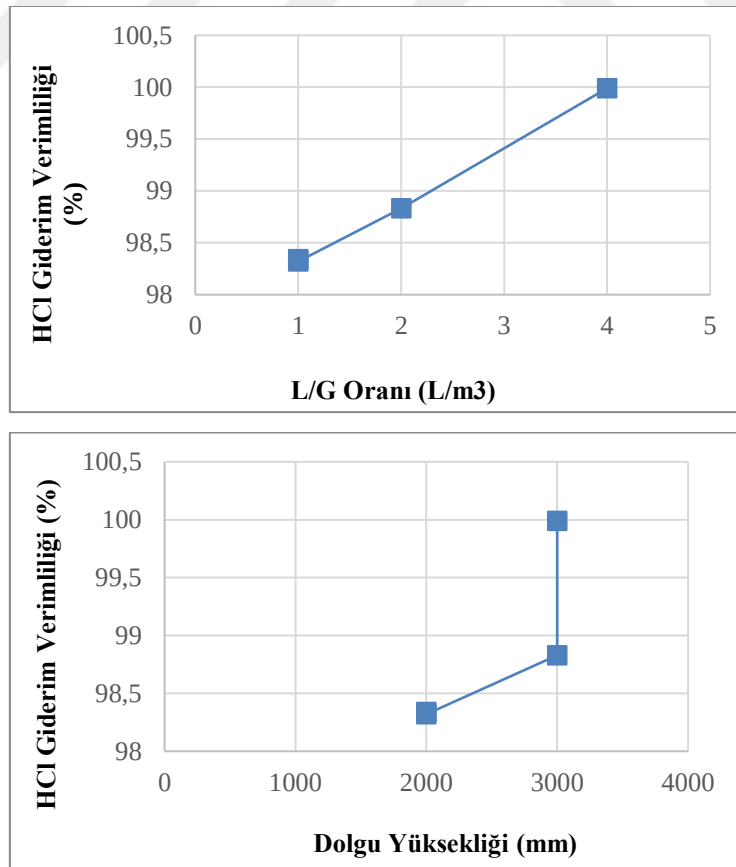
Tablo 4.4. Hidroklorik asit gözlem sonuçları

Gaz	Sektör	Gaz Yıkayıcı No	Gaz Debisi (m ³ /h)	Gaz Yık. Çapı, Ø (mm)	Gaz Hızı (m/sn)	Dolgu Yük. (mm)	Temas Süresi (sn)	Çözücü Sıvı	Ph	L/G (L/m ³)	Giriş Kons. (mg/m ³)	Çıkış Kons. (mg/m ³)	Gaz Yık. Verim. (%)
HCl	Galvaniz	4	50.000	3500	1,44	2000	1,39	Su	4	1	149	2,48	98,34
	Havacılık	6	100.000	4000	2,2	2000	0,90	Su+ NaOH	9	1	75	1,26	98,32
	Havacılık	5	50000	2600	2,62	3000	1,15	Su+ NaOH	9	2	75	0,88	98,83
	Gıda	3	10.000	1200	2,46	3000	1,22	Su+ NaOH	9	4	45	0,002	99,99

29211 sayılı Sanayi Kaynaklı Kontrol Yönetmeliği inorganik buhar ve gaz emisyonları sınır değerleri tablosuna göre; hidroklorik asit gaz buharı sınır değeri 30 mg/Nm³ olarak belirtilmiştir.

Hidroklorik asit giderimi gözlemlenirken, gaz yıkama ünitelerinden sadece galvaniz sektörüne ait dört numaralı gaz yıkama ünitesinde çözücü sıvı olarak su kullanılmıştır. En yüksek giderim oranı 3 numaralı gaz yıkama ünitesinde elde edilmiştir. 10.000 m³/sa debili bu ünite, pH düzeyini ayarlamak için sodyum hidroksit kimyasalı gaz yıkayıcının sirkülasyon haznesine dozlanmıştır. Hidroklorik asit buharının gaz yıkayıcıdaki giderimi, diğer parametrelerle karşılaştırıldığında, çözücü sıvı debisi ile gaz debisi oranı ve pall halkası kullanılan dolgu bölüm yüksekliğinin artışının giderim verimliliğini belirgin şekilde artırdığı Tablo 4.4'e göre gözlemlenmiştir.

Pall halkası (2 inç boyutunda) kullanıldığında, Şekil 4.8'de L/G oranı ve dolgu bölüm yüksekliğinin hidroklorik asit giderim verimliliği üzerindeki etkisini gösteren grafik bulunmaktadır.



Şekil 4.8. HCl giderim verimliliği

Dolgu bölüm yükseklinin artması, temas süresinin artması nedeniyle absorpsiyon prosesine yardımcı olmaktadır. Dolayısıyla dolgu bölüm yüksekliği arttıkça, gaz yıkayıcı verimliliği artmıştır. Sıvı-gaz (L/G) oranı arttıkça ise, gaz fazındaki kirleticilerin sıvı fazıyla temas etme olasılığı artar. Bu durum, kirleticilerin sıvı tarafından emilmesi veya çözülmesi için daha fazla fırsat sağlar. Kirleticilerin sıvı tarafından emilmesi, giderim verimliliğini artırır. Dolayısıyla sıvı-gaz oranı arttıkça, gaz yıkayıcı giderim verimliliğinde artış gözlemlenmiştir.

4.5. Hidroflorik Asit Giderimi

Tablo 4.5’de, hidroflorik asit gaz buharı, pall halkası kullanılan gaz yıkayıcıda artırılmasına dair gözlem sonuçları bulunmaktadır.

Tablo 4.5. Hidroflorik asit gözlem sonuçları

Gaz	Sektör	Gaz Yıkayıcı No	Gaz Debisi (m ³ /h)	Gaz Yık. Çapı, Ø (mm)	Gaz Hızı (m/sn)	Dolgu Yük. (mm)	Temas Süresi (sn)	Çözücü Sıvı	Ph	L/G (L/m ³)	Giriş Kons. (mg/m ³)	Çıkış Kons. (mg/m ³)	Gaz Yık. Verim. (%)
HF	Havacılık	6	100.000	4.000	2,2	2.000	0,90	Su+ NaOH	9	1	41	1,00	97,56
	Kimya	2	7.500	1.600	1,03	1.500	1,45	Su+ NaOH	9	2	82	<0,45	99,45
	Havacılık	5	50.000	2.600	2,62	3.000	1,15	Su+ NaOH	9	2	41	0,33	99,2
	Gıda	3	10.000	1.200	2,46	3.000	1,22	Su+ NaOH	9	4	25	0,001	99,99

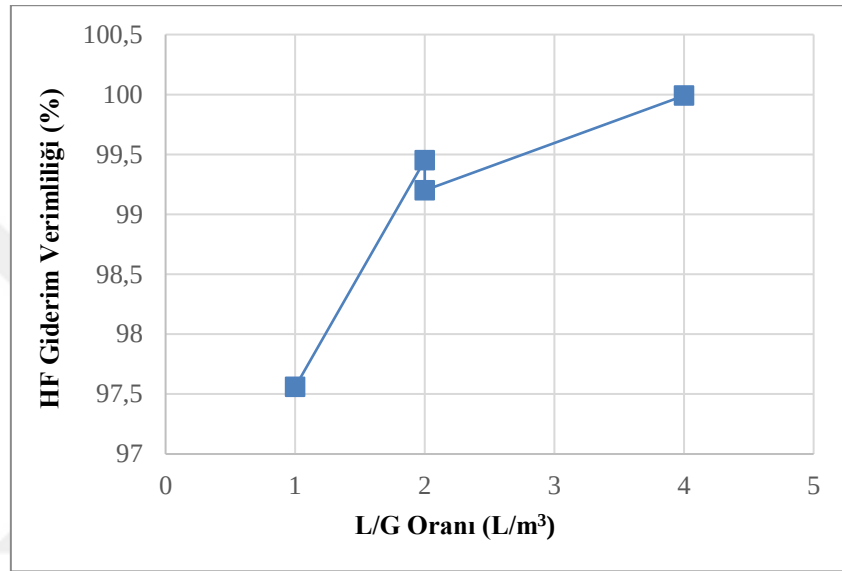
29211 sayılı Sanayi Kaynaklı Kontrol Yönetmeliği inorganik buhar ve gaz emisyonları sınır değerleri tablosuna göre; hidroflorik asit gaz buharı sınır değeri 5 mg/Nm³ olarak belirtilmiştir.

HF gaz buharı giderimi gözlemlenirken, kimya, gıda ve havacılık sektörlerinde sırasıyla 7.500 m³/sa, 10.000 m³/sa, 50.000 m³/sa ve 100.000 m³/sa debilere sahip her biri farklı ve dört adet olacak şekilde gaz yıkama ünitesi sistemi uygulanmıştır. Gaz yıkayıcıların her birinin sirkülasyon haznesinde çözücü olarak su ve NaOH kimyasalı kullanılmıştır.

En yüksek giderim oranı Tablo 4.5’e göre, üç numaralı gaz yıkama sisteminde elde edilmiştir. 10.000 m³/sa debiye sahip üç numaralı gaz yıkama sisteminde, pH değerini ayarlamak amacıyla gaz yıkayıcıya kimyasal olarak sodyum hidroksit dozlanmıştır.

HF asit gaz buharının gaz yıkayıcıda giderimi üzerine yapılan kıyaslamalarda, L/G, çözen sıvı debisinin çözünen gaz debisine oranı artış gösterdikçe giderim verimliliğinin belirgin bir şekilde arttığı gözlenmiştir.

Gaz yıkayıcıya pall halkası (2 inç boyutunda) entegre edildiğinde, Şekil 4.9'daki grafikte çözücü sıvının gaz oranına bağlı HF asit buharı giderim verimliliği görülmektedir.



Şekil 4.9. HF giderim verimliliği

Sıvı-gaz (L/G) oranı arttıkça ise, gaz fazındaki kirleticilerin sıvı fazıyla temas etme olasılığı artar. Bu durum, kirleticilerin sıvı tarafından emilmesi veya çözülmesi için daha fazla fırsat sağlar. Kirleticilerin sıvı tarafından emilmesi, giderim verimliliğini artırır. Dolayısıyla sıvı-gaz oranı arttıkça, gaz yıkayıcı giderim verimliliğinde artış gözlemlenmiştir.

4.6. Nitrik Asit Giderimi

HNO₃ gaz buharı arıtılması gözlemlenirken, kimya, gıda ve havacılık sektörlerinde sırasıyla 7.500 m³/sa, 10.000 m³/sa, 50.000 m³/sa ve 100.000 m³/sa debilere sahip her biri farklı dört adet gaz yıkayıcı sistemi kullanılmıştır. Gaz yıkayıcıların her birinde çözeltiyi oluşturan su ve kimyasal olarak NaOH kullanılmıştır.

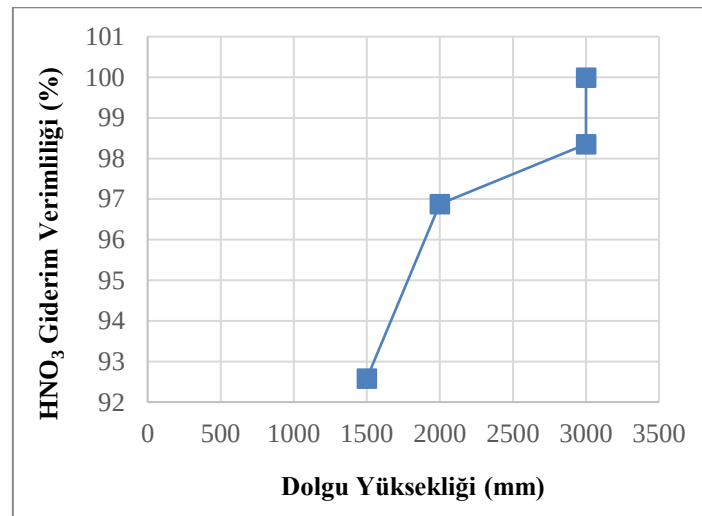
Nitrik asit gaz buharı, gaz yıkama ünitesinde giderim gözlem sonuçları Tablo 4.6'da bulunmaktadır.

29211 sayılı Sanayi Kaynaklı Kontrol Yönetmeliği inorganik buhar ve gaz emisyonları sınır değerleri tablosuna göre; nitrik asit gaz buharı sınır değeri 30 mg/Nm³ olarak belirtilmiştir.

Tablo 4.6. Nitrik asit gözlem sonuçları

Gaz	Sektör	Gaz Yıkayıcı No	Gaz Debisi (m ³ /h)	Gaz Yık. Çapı, Ø (mm)	Gaz Hızı (m/sn)	Dolgu Yük. (mm)	Temas Süresi (sn)	Çözücü Sıvı	Ph	L/G (L/m ³)	Giriş Kons. (mg/m ³)	Çıkış Kons. (mg/m ³)	Gaz Yık. Verim. (%)
HNO ₃	Kimya	2	7.500	1600	1,03	1500	1,45	Su+ NaOH	9	2	193	14,33	92,58
	Havacılık	6	100.000	4000	2,22	2000	0,90	Su+ NaOH	9	1	64	2,00	96,88
	Havacılık	5	50.000	2600	2,62	3000	1,15	Su+ NaOH	9	2	64	1,057	98,35
	Gıda	3	10.000	1200	2,46	3000	1,22	Su+ NaOH	9	4	129	0,003	99,99

En yüksek giderim oranı, Tablo 4.6'ya göre üç numaralı gaz yıkama sisteminde gözlemlenmiştir. Bu ünite, 10.000 m³/sa debisiyle öne çıkmakta olup, gaz yıkama sistemine kimyasallardan NaOH dozlama işlemi yapılarak pH değeri ayarlanmıştır. Nitrik asit buharının pall halkası entegre edilmiş gaz yıkayıcıda giderimi, diğer parametrelerle karşılaştırıldığında, dolgu bölüm yüksekliğinin artmasıyla birlikte giderim verimliliğinde belirgin bir artış görülmüştür. Ayrıca, üç numaralı gaz yıkama ünitesinin en yüksek L/G oranında olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.10. HNO₃ giderim verimliliği

Şekil 4.10’da, gaz yıkayıcıda pall halkası (2 inç boyutunda) kullanıldığında, dolgu yüksekliğine dayalı nitrik asit buharı giderim verimliliği görülmektedir.

Dolgu bölüm yükseklinin artması, temas süresinin artması nedeniyle absorpsiyon prosesine yardımcı olmaktadır. Dolayısıyla dolgu bölüm yüksekliği arttıkça, gaz yıkayıcı verimliliği artmıştır.

4.7. Sülfürik Asit Giderimi

Gaz yıkayıcıda sülfürik asit giderimi incelenirken, kimya, gıda ve havacılık sektörlerinde sırasıyla 7.500 m³/sa, 10.000 m³/sa ve 100.000 m³/sa debilere sahip üç farklı gaz yıkama ünitesi sistemi gözlemlenmiştir. Gaz yıkayıcıların her birinde çözeltiyi oluşturan su ve kimyasal olarak NaOH kullanılmıştır.

Tablo 4.7’de, sülfürik asit gaz buharının gaz yıkama sistemindeki giderim gözlemlerine ait sonuçlar bulunmaktadır.

Tablo 4.7. Sülfürik asit gözlem sonuçları

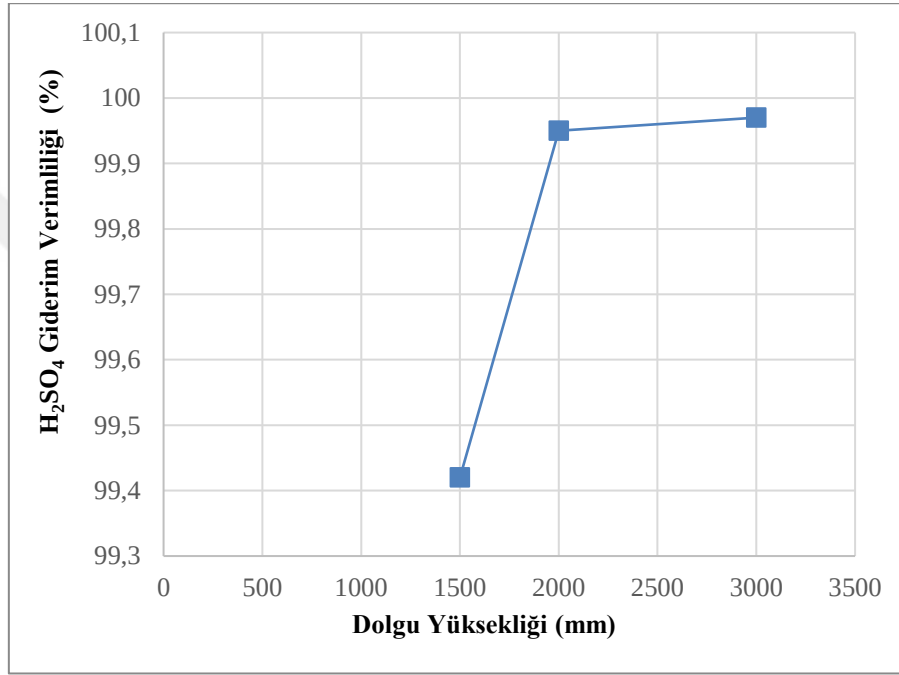
Gaz	Sektör	Gaz Yık. No	Gaz Debisi (m ³ /h)	Gaz Yık. Çapı, Ø (mm)	Gaz Hızı (m/sn)	Dolgu Yük. (mm)	Temas Süresi (sn)	Çözücü Sıvı	Ph	L/G (L/m ³)	Giriş Kons. (mg/m ³)	Çıkış Kons. (mg/m ³)	Gaz Yık. Verim. (%)
	Gıda	3	10.000	1200	2,46	3000	1,22	Su+ NaOH	9	4	100	0,03	99,97
H ₂ SO ₄	Havacılık	6	100.000	4000	2,2	2000	0,90	Su+ NaOH	9	1	201	0,0992	99,95
	Kimya	2	7.500	1600	1,03	1500	1,45	Su+ NaOH	9	2	120	0,696	99,42

29211 sayılı Sanayi Kaynaklı Kontrol Yönetmeliği inorganik buhar ve gaz emisyonları sınır değerleri tablosuna göre; sülfürik asit gaz buharı sınır değeri 5 mg/Nm³ olarak belirtilmiştir.

En yüksek giderim oranı, Tablo 4.7’deki verilere göre, üç numaralı gaz yıkama sisteminde elde edilmiştir. Bu ünite, 10.000 m³/sa debisiyle dikkat çekmekte olup, pH değerini ayarlamak amacıyla gaz yıkayıcıya kimyasallardan sodyum hidroksit dozlanmıştır. HNO₃ gaz buharının gaz yıkama ünitesinde giderimi diğer parametrelerle kıyaslandığında, belirgin bir özellik olarak dolgu yüksekliğinin artmasıyla birlikte

giderim verimliliğinde gözle görülür bir artış görülmektedir. Ayrıca, üç numaralı gaz yıkayıcının en yüksek sıvı-gaz oranına sahip olduğu gözlemlenmiştir, bu da sistemin verimli çalışmasına katkıda bulunmuştur.

Şekil 4.11’de, gaz yıkama sisteminde pall halkası (2 inç-50 mm boyutundaki) kullanıldığında, dolgu yüksekliğine göre H₂SO₄ gaz buharı giderim verimliliği gösterilmektedir.



Şekil 4.11. H₂SO₄ giderim verimliliği

Dolgu bölüm yüksekliğinin artması, temas süresinin artması nedeniyle absorpsiyon prosesine yardımcı olmaktadır. Dolayısıyla dolgu bölüm yüksekliği arttıkça, gaz yıkayıcı verimliliği artmıştır.

4.8. Fosforik Asit Giderimi

29211 sayılı Sanayi Kaynaklı Kontrol Yönetmeliği inorganik buhar ve gaz emisyonları sınır değerleri tablosuna göre; fosforik asit gaz buharı sınır değeri 5 mg/Nm³ olarak belirtilmiştir.

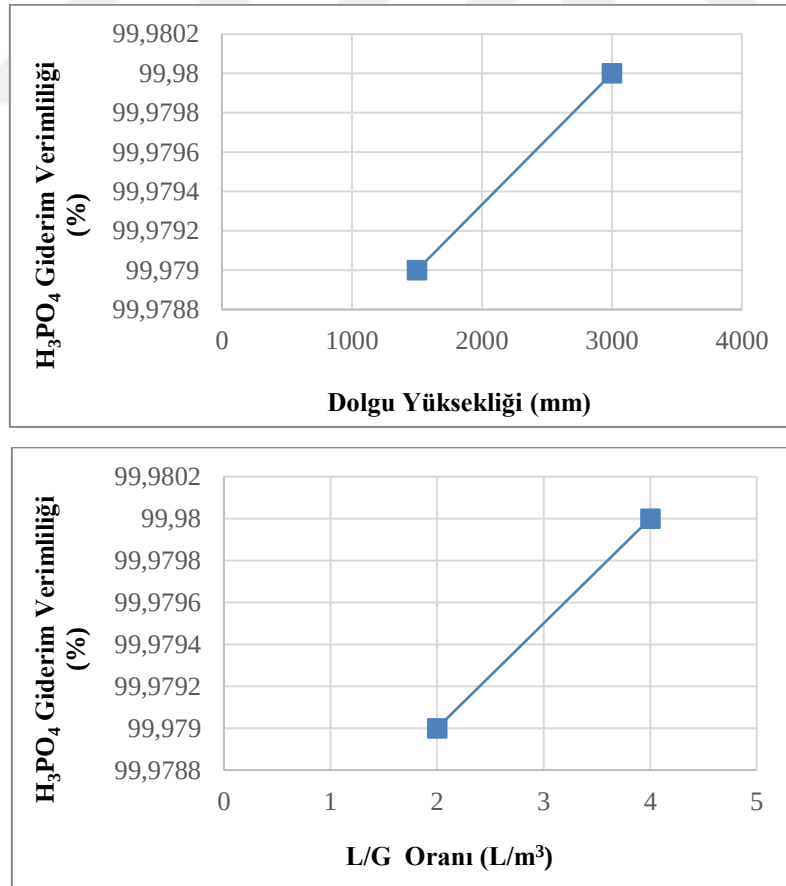
Tablo 4.8’de, pall halkası kullanılan gaz yıkayıcıda fosforik asit gaz buharı gideriminin gözlem sonuçları bulunmaktadır. En yüksek giderim oranı, Tablo 4.8’e göre, üç numaralı gaz yıkama ünitesinde bulunmaktadır. Gaz debisi 10.000 m³/sa olan bu

ünitede, pH değerini düzenlemek amacıyla gaz yıkama sistemine kimyasallardan NaOH dozlaması yapılmıştır. Fosforik asit buharının gaz yıkayıcıda giderimi, diğer parametrelerle karşılaştırıldığında, sıvı- gaz oranının ve dolgu yüksekliğinin artmasıyla birlikte giderim verimliliğinde belirgin bir artış göstermektedir.

Tablo 4.8. Fosforik asit gözlem sonuçları

Gaz	Sektör	Gaz Yık. No	Gaz Debisi (m ³ /h)	Gaz Yık. Çapı, Ø (mm)	Gaz Hızı (m/sn)	Dolgu Yük. (mm)	Temas Süresi (sn)	Çözücü Sıvı	Ph	L/G (L/m ³)	Giriş Kons. (mg/m ³)	Çıkış Kons. (mg/m ³)	Gaz Yık. Verim. (%)
H ₃ PO ₄	Gıda	3	10.000	1200	2,46	3000	1,22	Su+ NaOH	9	4	20	0,004	99,98
	Kimya	2	7.500	1600	1,03	1500	1,45	Su+ NaOH	9	2	152	<0,031	99,979

Şekil 4.12’de, sistemde pall halkası (2 inç boyutundaki) kullanıldığında, sırasıyla sıvı-gaz oranına ve dolgu bölüm yüksekliğine göre fosforik asit giderim verimliliği gösterilmektedir.



Şekil 4.12. H₃PO₄ giderim verimliliği

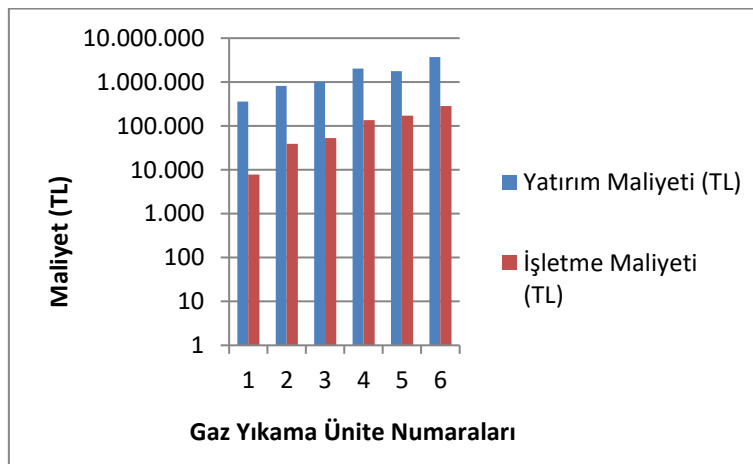
Dolgu bölüm yükseklinin artması, temas süresinin artması nedeniyle absorpsiyon prosesine yardımcı olmaktadır. Dolayısıyla dolgu bölüm yüksekliği arttıkça, gaz yıkayıcı verimliliği artmıştır. Sıvı-gaz (L/G) oranı arttıkça ise, gaz fazındaki kirleticilerin sıvı fazıyla temas etme olasılığı artar. Bu durum, kirleticilerin sıvı tarafından emilmesi veya çözülmesi için daha fazla fırsat sağlar. Kirleticilerin sıvı tarafından emilmesi, giderim verimliliğini artırır. Dolayısıyla sıvı-gaz oranı arttıkça, gaz yıkayıcı giderim verimliliğinde artış gözlemlenmiştir.

4.9. Yatırım ve İşletme Maliyetleri

Tablo 4.9’da sektörlere göre gaz yıkama üniteleri tahmini maliyet özet tablosu yer almaktadır.

Tablo 4.9. Gaz yıkama üniteleri özeti

Gaz Yıkayıcı No	Sektör Türü	Gaz Debisi (m ³ /h)
1	Lastik	2.500
2	Kimya	7.500
3	Gıda	10.000
4	Galvaniz	50.000
5	Havacılık	50.000
6	Havacılık	100.000



Şekil 4.13. İncelenen ünitelere ait maliyet grafiği

İncelenen ünitelere ait maliyet grafiği Şekil 4.13’de belirtilmiştir. Grafiğin yatay eksenini gaz yıkama ünitelerini ifade edip, dikey ekseninde ise Türk Lirası biriminden maliyetler

yer almaktadır. Şekil 4.13’de gösterilen grafiğe göre en yüksek yatırım ve işletme maliyeti, havacılık sektöründen 100.000 m³/sa debiye sahip 6 numaralı gaz yıkayıcıdır.

4.9.1. Lastik Sektörü Gaz Yıkama Ünitesi

Araştırmada, lastik sektöründe amonyak giderimi kapsamında bir numaralı gaz yıkayıcı kulesine ait 2.500 m³/sa debili pall halkası entegre edilmiş gaz yıkama sisteminin Türkiye’deki yatırım ve işletme maliyetleri incelenmiştir.

Bir numaralı ünitenin tahmini yatırım maliyet değerleri Tablo 4.10’da gösterilmiştir.

Tablo 4.10. Bir numaralı ünite yatırım maliyeti

No	Ekipman	Teknik Özellikler	Adet	Birim Maliyet (TL)	Toplam Maliyet (TL)
1	2.500 m ³ /sa Gaz Yıkama Kulesi	HDPE malzemeden ø800 mm çapında, toplamda 6000 mm yüksekliğinde gaz yıkama kulesi, iç dahili aksesuarları, ø50x50mm pall halkası, damla tutucu ve sıvı spreyleme tesisatları, baca, jetcap, bakım kapakları, gaz giriş ve çıkış flanş bağlantıları ile birliktedir.	1	109.060	109.060
2	2.500 m ³ /sa Salyangoz Fan	HDPE ve PP malzemeden, salyangoz fan, 300 mmSS basınçlı, 3 Kw motorludur.	1	38.950	38.950
3	Sirkülasyon Pompası	Sıvı tankından devir daim yapan sirkülasyon pompası, 316 L gövde, 9 m ³ /sa kapasiteli, 0.75 kW motor gücündedir. 1 adet asil, 1adet yedek olacak şekildedir.	2	9.161	18.322
4	Su Dolum Elektrik Aktüatörlü Vana	Elektrik aktüatörlü ve 220 V beslemelidir.	1	3.583	3.583
5	Su Boşaltma Elektrik Aktüatörlü Vana	Elektrik aktüatörlü ve 220 V beslemelidir.	1	3.957	3.957
6	Sıvı Haznesi Seviye Şalteri	PP malzemeden, yatay seviye şalteridir.	1	7.790	7.790
7	pH Metre ve pH Prob	0-14 ph arası ölçüm yapabilen, duvar tip ph metredir.	1	7.323	7.323
8	Termometre	-40 ile 60 derece arasında ölçüm yapılabilmektedir	1	1.558	1.558
9	Monometre	0-10 bar arası ölçüm yapılabilmektedir.	2	2.025	4.051
10	Amonyak Gaz Dedektörü	0-100 ppm arası ölçüm yapılabilmektedir.	1	17.294	17.294
11	Kontrol Panosu	Plc yazılım ile kontrol edilmektedir.	1	38.950	38.950
12	İşçilik ve Montaj		1	109.060	109.060
TOPLAM MALİYET					359.898 TL

Tahmini toplam yatırım maliyeti 359.898 TL olarak hesaplanılmıştır.

Maliyetler bölümünde firma gizliliğinden kaynaklı gaz yıkayıcı ekipmanları için marka ve model paylaşımı yapılamamıştır. Paylaşılan değerler tahmini maliyetlerdir.

Bu bölümde, 2.500 m³/sa debili amonyak giderimi için gaz arıtma sistemindeki ortalama yatırım maliyet değerleri paylaşılmıştır. Maliyet değerleri verilen ekipmanlar, fiyat ve performans olarak markalar kıyaslanarak en uygun değerler seçilmiştir.

Radial fan, 2.500 m³/sa debili, 300 mmSS ve 3 kW olarak fiyatlandırılmıştır. Radial fan salyangozu yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) malzemedendir. Belirtilen fiyatlara fan motoru dahildir.

Sirkülasyon pompası ise, santrifüj 316L malzemeden seçilmiş olup, 9 m³/sa debilidir. Ph metre ve ph prob sirkülasyon sıvısının düzenli olarak kontrolünü sağlamaktadır. Fiyatlandırmada ph metre tipi olarak duvar tip seçilmiştir.

Termometre gaz sıcaklığının kontrol edilmesi için fiyatlandırılmıştır. Manometre ise, sirkülasyon pompaları için konumlandırılmış olup, bu sayede sirkülasyon pompalarının çalışma kontrolü sağlanmıştır.

Amonyak gaz dedektörü ile, baca çıkışındaki gaz konsantrasyon değerleri ppm olarak sürekli ölçülmüştür. Bu sayede gaz çıkış değerleri düzenli olarak izlenmiştir. Kontrol panosu, plc aracılığıyla sağlanıp, tüm sistem otomatik olarak kontrol edilmiştir.

Tablo 4.11. Bir numaralı ünite işletme maliyeti

No	Tüketim	Birim/aylık		Birim Maliyet (TL)	Toplam Maliyet (TL)
1	Su	10	m ³	9,42	94,20
2	Elektrik	2700	kWh	2,84	7668
TOPLAM MALİYET					7762,20 TL

Amonyak giderimi kapsamında 2.500 m³/sa debili gaz arıtma sistemi için aşağıda işletmeden kaynaklı aylık maliyetler yer almaktadır. Bir numaralı ünitenin tahmini işletme maliyet değerleri Tablo 4.11’de gösterilmiştir.

İşletme maliyetlerinde, firma gizliliği kapsamında bakım ve onarım, işletme personeli maliyetleri paylaşılamadığından sadece elektrik ve su tüketimi tahmini maliyetleri paylaşılmıştır. Sistemde herhangi bir kimyasal dozlanmadığından kimyasal tüketim maliyetleri yer almamaktadır.

Su ve elektrik tüketim değerlerine göre sistem için aylık işletme maliyeti 7.762,20 Türk Lirası olacak şekilde tüketim hesaplanılmıştır. Su ve elektrik birim fiyatları tahmini olup, sırasıyla Su ve Kanalizasyon Dairesi Genel Müdürlüğü ve Enerji Atlası verilerinden alınmıştır (URL-8).

4.9.2. Kimya Sektörü Gaz Yıkama Ünitesi

Bu bölümde, 7.500 m³/sa debili, hidroflorik asit, fosforik asit, sülfürik asit, nitrik asit, amonyak gazları giderimi için gaz arıtma sistemindeki ortalama yatırım maliyet değerleri paylaşılmıştır. Maliyet değerleri verilen ekipmanlar, fiyat ve performans olarak markalar kıyaslanarak en uygun değerler seçilmiştir.

Gaz yıkama kulesi imalatı, yüksek yoğunluklu polietilen malzemeden (HDPE) olup, spreyci nozullar, damla tutucu, Ø50 mm pall halkaları, baca, jetcap, bakım kapakları maliyetlere dahildir.

Sirkülasyon pompası ise, polipropilen malzemeden seçilmiş olup, 15 m³/sa debilidir. Sirkülasyon sıvısının, nötralizasyon kapsamında uygun ph değerini ayarlayabilmek için fosforik asit ve sodyum hidroksit dozaj tankı ve dozaj pompası seçilmiştir. Aktüatörlü vanalar, sirkülasyon haznesine taze su alımı ve kirli suyun boşaltılması için seçilmiştir. Sirkülasyon haznesi ve dozaj tanklarının seviye kontrolleri için ultrasonik tip seviye ölçer seçilmiştir.

Radial fan, 7.500 m³/sa debili, 300 mmSS ve 11 kW olarak fiyatlandırılmıştır. Radial fan salyangozu yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) malzemedendir. Belirtilen fiyatlara fan motoru dahildir. Ph metre ve ph prob sirkülasyon sıvısının düzenli olarak

kontrolünü sağlamaktadır. Fiyatlandırmada ph metre tipi olarak duvar tip seçilmiştir. Kontrol panosu, plc aracılığıyla sağlanıp, tüm sistem otomatik olarak kontrol edilmiştir. 7.500 m³/sa debili gaz arıtma sistemi kapsamında aşağıda işletmeden kaynaklı aylık maliyetler yer almaktadır.

İki numaralı ünitenin tahmini yatırım maliyet değerleri Tablo 4.12’de gösterilmiştir.

Tablo 4.12. İki numaralı ünite yatırım maliyeti

No	Ekipman	Teknik Özellikler	Adet	Birim Maliyet (TL)	Toplam Maliyet (TL)
1	7.500 m ³ /sa Gaz Yıkama Kulesi	HDPE malzemeden ø1600 mm çapında, toplamda 6500 mm yüksekliğinde gaz yıkama kulesi, iç dahili aksesuarları, ø50x50mm pall halkası, damla tutucu ve sıvı spreyleme tesisatları, baca, jetcap, bakım kapakları, gaz giriş ve çıkış flanş bağlantıları ile birliktedir.	1	314.872	314.872
2	7.500 m ³ /sa Fan	HDPE ve PP malzemeden, salyangoz fan, 300 mmSS basınçlı 11 Kw motorludur.	1	171.380	171.380
3	Sirkülasyon Pompası	Sıvı tankından devir daim yapan sirkülasyon pompası, PP gövde, 15 m ³ /sa kapasiteli, 2.2 kW motor gücündedir. 1 adet asil, 1adet yedek olacak şeklidedir.	2	39.791	79.583
4	NaOH Dozaj Tankı	HDPE malzemeden, 500 L hacmindedir.	1	11.841	11.841
5	NaOH Dozaj Pompası	10 lt/h kapasiteli, 4 bar basınca sahip mekanik diyaframlı dozaj pompasıdır.	2	8.133	16.266
6	H ₃ PO ₄ Dozaj Tankı	HDPE malzemeden, 500 L hacmindedir.	1	11.841	11.841
7	H ₃ PO ₄ Dozaj Pompası	10 lt/h kapasiteli, 4 bar basınca sahip mekanik diyaframlı dozaj pompasıdır.	2	8.133	16.266
8	Su Doluma Elektrik Aktüatörlü Vana	Elektrik aktüatörlü ve 220 V beslemelidir.	1	3.583	3.583
9	Su Boşaltma Elektrik Aktüatörlü Vana	Elektrik aktüatörlü ve 220 V beslemelidir.	1	4.020	4.020
10	Sıvı Haznesi ve Dozaj Tankları Seviye Kontrolü	Ultrasonik seviye şalteridir.	3	7.790	23.370
11	pH Metre ve pH Prob	0-14 ph arası ölçüm yapabilen, duvar tip ph metredir. Prob dahildir.	1	7.323	7.323
12	PLC Kumanda Panosu	Plc yazılım ile kontrol edilmektedir.	1	132.430	132.430
13	İşçilik ve Montaj		1	21.812	21.812
TOPLAM MALİYET					814.585 TL

Tahmini yatırım maliyeti 814.585 Türk Lirası olarak hesaplanılmıştır.

Firma gizliliği kapsamında, bakım ve onarım, işletme personeli maliyetleri paylaşılamadığından sadece elektrik, su, kimyasal tüketimi tahmini maliyetleri paylaşılmıştır. Su ve elektrik birim fiyatları tahmini olup, sırasıyla Su ve Kanalizasyon Dairesi Genel Müdürlüğü ve Enerji Atlası verilerinden alınmıştır (URL-8).

İki numaralı ünitenin tahmini işletme maliyet değerleri Tablo 4.13’de gösterilmiştir.

Tablo 4.13. İki numaralı ünite işletme maliyeti

No	Tüketim	Birim/aylık		Birim Maliyet (TL)	Toplam Maliyet (TL)
1	Su	46	m ³	9,42	433,32
2	Elektrik	10.080	kWh	2,84	28627,2
3	Sodyum Hidroksit	300	Lt	4,5	1350
4	Fosforik Asit	150	Lt	57	8550
TOPLAM MALİYET					38.960,52 TL

Su, elektrik, sodyum hidroksit ve fosforik asit tüketim değerlerine göre sistem için aylık işletme maliyeti 38.960,52 Türk Lirası olacak şekilde tüketim hesaplanılmıştır.

4.9.3. Gıda Sektörü Gaz Yıkama Ünitesi

Bu bölümde, 10.000 m³/sa debili, HF, H₃PO₄, H₂SO₄, HNO₃, HCl, NH₃ gazları giderimi için gaz arıtma sistemindeki ortalama yatırım maliyet değerleri paylaşılmıştır.

Maliyet değerleri verilen ekipmanlar, fiyat ve performans olarak markalar kıyaslanarak en uygun değerler seçilmiştir.

Gaz yıkama kulesi imalatı, yüksek yoğunluklu polietilen malzemeden (HDPE) olup, sprej nozullar, damla tutucu, Ø50 mm pall halkaları, baca, jetcap, bakım kapakları maliyetlere dahildir.

Üç numaralı ünitenin tahmini yatırım maliyet değerleri Tablo 4.14’de gösterilmiştir.

Tablo 4.14. Üç numaralı ünite yatırım maliyeti

No	Ekipman	Teknik Özellikler	Adet	Birim Maliyet (TL)	Toplam Maliyet (TL)
1	10.000 m ³ /sa Gaz Yıkama Kulesi	HDPE malzemeden ø1200 mm çapında, toplamda 7000 mm yüksekliğinde gaz yıkama kulesi, iç dahili aksesuarları, ø50x50mm pall halkası, damla tutucu ve sıvı spreyleme tesisatları, baca, jetcap, bakım kapakları, gaz giriş ve çıkış flanş bağlantıları ile birliktedir.	1	572.939	572.939
2	10.000 m ³ /sa Fan	HDPE ve PP malzemeden, salyangoz fan, 200 mmSS basınçlı 11 Kw motorludur.	1	81.390	81.390
3	Sirkülasyon Pompası	Sıvı tankından devir daim yapan sirkülasyon pompası, PP gövde, 40 m ³ /sa kapasiteli, 5,5 kW motor gücündedir. 1 adet asil, 1adet yedek olacak şeklindedir.	2	42.066	84.132
4	NaOH Dozaj Tankı	HDPE malzemeden, 1000 L hacminde.	1	17.450	17.450
5	NaOH Dozaj Pompası	50 lt/h kapasiteli, 3 bar basınca sahip mekanik diyaframlı dozaj pompasıdır.	2	10.906	21.812
6	H ₂ SO ₄ Dozaj Tankı	HDPE malzemeden, 1000 L hacminde.	1	17.450	17.450
7	H ₂ SO ₄ Dozaj Pompası	50 lt/h kapasiteli, 3 bar basınca sahip mekanik diyaframlı dozaj pompasıdır.	2	10.906	21.812
8	Su Dolma Elektrik Aktüatörlü Vana	Elektrik aktüatörlü ve 220 V beslemelidir.	1	3.116	3.116
9	Su Boşaltma Elektrik Aktüatörlü Vana	Elektrik aktüatörlü ve 220 V beslemelidir.	1	3.428	3.428
10	Sıvı Haznesi ve Dozaj Tankları Seviye Kontrolü	Ultrasonik seviye şalteridir.	3	7.478	22.435
11	pH Metre ve PH Prob	0-14 ph arası ölçüm yapabilen, duvar tip ph metredir. Prob dahildir.	1	6.855	6.855
12	PLC Kumanda Panosu	Plc yazılım ile kontrol edilmektedir.	1	165.896	165.896
13	İşçilik ve Montaj		1	0	0
TAHMINİ TOPLAM MALİYET					1.018.714 TL

Yatırım maliyeti 1.018.714 Türk Lirası olarak hesaplanılmıştır.

Radial fan, 10.000 m³/sa debili, 200 mmSS ve 11 kW olarak fiyatlandırılmıştır. Radial fan salyangozu yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) malzemedendir. Belirtilen fiyatlara fan motoru dahildir. Sirkülasyon pompası ise, polipropilen malzemeden seçilmiş olup, 40 m³/sa debilidir. Sirkülasyon sıvısının, nötralizasyon kapsamında uygun ph değerini ayarlayabilmek için fosforik asit (H₂SO₄) ve sodyum hidroksit

(NaOH) dozaj tankı ve dozaj pompası seçilmiştir. Aktüatörlü vanalar, sirkülasyon haznesine taze su alımı ve kirli suyun boşaltılması için seçilmiştir.

Sirkülasyon haznesi ve dozaj tanklarının seviye kontrolleri için ultrasonik tip seviye ölçer seçilmiştir.

Ph metre ve ph prob sirkülasyon sıvısının düzenli olarak kontrolünü sağlamaktadır. Fiyatlandırmada ph metre tipi olarak duvar tip seçilmiştir.

Kontrol panosu, plc aracılığıyla sağlanıp, tüm sistem otomatik olarak kontrol edilmiştir.

10.000 m³/sa debili gaz arıtma sistemi kapsamında aşağıda işletmeden kaynaklı aylık maliyetler yer almaktadır.

Firma gizliliği kapsamında, bakım ve onarım, işletme personeli maliyetleri paylaşılamadığından sadece elektrik, su, kimyasal tüketimi tahmini maliyetleri paylaşılmıştır.

Üç numaralı ünitenin tahmini işletme maliyet değerleri Tablo 4.15’de gösterilmiştir.

Tablo 4.15. Üç numaralı ünite işletme maliyeti

No	Tüketim	Birim/aylık	Birim Maliyet (TL)	Toplam Maliyet (TL)
1	Su	51 m ³	9,42	480,42
2	Elektrik	12.960 kWh	2,84	36806,4
3	Sodyum Hidroksit	1500 Lt	4,5	6750
4	Sülfürik Asit	300 Lt	30	9000
TOPLAM MALİYET				53.036,82 TL

Su, elektrik, sodyum hidroksit ve sülfürik asit tüketim değerlerine göre sistem için aylık tahmini işletme maliyeti 53.036,82 Türk Lirası olacak şekilde tüketim hesaplanılmıştır. Su ve elektrik birim fiyatları tahmini olup, sırasıyla Su ve Kanalizasyon Dairesi Genel Müdürlüğü ve Enerji Atlası verilerinden alınmıştır (URL-8).

4.9.4. Galvaniz Sektörü Gaz Yıkama Ünitesi

Bu bölümde, 50.000 m³/sa debili hidroklorik asit giderimi için gaz arıtma sistemindeki ortalama yatırım maliyet değerleri paylaşılmıştır. Maliyet değerleri verilen ekipmanlar, fiyat ve performans olarak markalar kıyaslanarak en uygun değerler seçilmiştir.

Dört numaralı ünitenin tahmini yatırım maliyet değerleri Tablo 4.16’da gösterilmiştir.

Tablo 4.16. Dört numaralı ünite yatırım maliyeti

No	Ekipman	Teknik Özellikler	Adet	Birim Maliyet (TL)	Toplam Maliyet (TL)
1	50.000 m ³ /sa Gaz Yıkama Kulesi	HDPE malzemeden ø3500 mm çapında, toplamda 8000 mm yüksekliğinde gaz yıkama kulesi, iç dahili aksesuarları, ø50x50mm pall halkası, damla tutucu ve sıvı spreyleme tesisatları, baca, jetcap, bakım kapakları, gaz giriş ve çıkış flanş bağlantıları ile birliktedir.	1	1.104.622	1.104.622
2	50.000 m ³ /sa Salyangoz Fan	HDPE ve PP malzemeden, salyangoz fan, 250 mmSS basınçlı, 55 Kw motorludur.	1	467.400	467.400
3	Sirkülasyon Pompası	Sıvı tankından devir daim yapan sirkülasyon pompası, PP gövde, 50 m ³ /sa kapasiteli, 11 kW motor gücündedir. 1 adet asil, 1 adet yedek olacak şeklindedir.	2	79.988	159.975
4	Su Dolum Elektrik Aktüatörlü Vana	Elektrik aktüatörlü ve 220 V beslemelidir.	1	3.583	3.583
5	Su Boşaltma Elektrik Aktüatörlü Vana	Elektrik aktüatörlü ve 220 V beslemelidir.	1	3.957	3.957
6	Sıvı Haznesi Seviye Şalteri	PP malzemeden, yatay seviye şalteridir.	2	935	1.870
7	pH Metre ve pH Prob	0-14 ph arası ölçüm yapabilen, duvar tip ph metredir.	1	7.323	7.323
8	Kontrol Panosu	Plc yazılım ile kontrol edilmektedir.	1	225.910	225.910
9	İşçilik ve Montaj		1	46.740	46.740
TOPLAM MALİYET					2.021.380 TL

Yatırım maliyeti 2.021.380 Türk Lirası olarak hesaplanılmıştır.

Gaz yıkama kulesi imalatı, yüksek yoğunluklu polietilen malzemeden (HDPE) olup, spray nozullar, damla tutucu, Ø50 mm pall halkaları, baca, jetcap, bakım kapakları maliyetlere dahildir. Radial fan, 50.000 m³/sa debili, 250 mmSS ve 55 kW olarak

fiyatlandırılmıştır. Radial fan salyangozu yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) malzemedendir. Belirtilen fiyatlara fan motoru dahildir. Sirkülasyon pompası ise, polipropilen malzemeden seçilmiş olup, 50 m³/sa debilidir. Ph metre ve ph prob sirkülasyon sıvısının düzenli olarak kontrolünü sağlamaktadır. Fiyatlandırmada ph metre tipi olarak duvar tip seçilmiştir.

Kontrol panosu, plc aracılığıyla sağlanıp, tüm sistem otomatik olarak kontrol edilmiştir.

Hidroklorik asit buharı giderimi kapsamında 50.000 m³/sa debili gaz arıtma sistemi için aşağıda işletmeden kaynaklı aylık maliyetler yer almaktadır.

Dört numaralı ünitenin tahmini işletme maliyet değerleri Tablo 4.17’de gösterilmiştir.

Tablo 4.17. Dört numaralı ünite işletme maliyeti

No	Tüketim	Birim/aylık	Birim Maliyet (TL)	Toplam Maliyet (TL)
1	Su	173 m ³	9,42	1629,66
2	Elektrik	47.520 kWh	2,84	134956,8
TOPLAM MALİYET				136.586,46 TL

Su ve elektrik tüketim değerlerine göre sistem için aylık işletme maliyeti 136.586,46 Türk Lirası olacak şekilde tüketim hesaplanılmıştır.

Firma gizliliği kapsamında, bakım ve onarım, işletme personeli maliyetleri paylaşılamadığından sadece elektrik ve su tüketimi tahmini maliyetleri paylaşılmıştır. Sistemde herhangi bir kimyasal dozlanmadığından kimyasal tüketim maliyetleri yer almamaktadır.

4.9.5. Havacılık Sektörü Gaz Yıkama Ünitesi

Bu bölümde, 50.000 m³/sa ve 100.000 m³/sa debili gaz yıkama ünitelerinin maliyetleri incelenecektir.

4.9.5.1. Debisi 50.000 m³/sa Gaz Yıkama Ünitesi

Bu bölümde, 50.000 m³/sa debili, HCl, HF, sülfürik ve nitrik asit gazları giderimi için gaz arıtma sistemindeki ortalama yatırım maliyet değerleri paylaşılmıştır. Maliyet değerleri verilen ekipmanlar, fiyat ve performans olarak markalar kıyaslanarak en uygun değerler seçilmiştir.

Beş numaralı ünitenin tahmini yatırım maliyet değerleri Tablo 4.18’de gösterilmiştir.

Tablo 4.18. Beş numaralı ünite yatırım maliyeti

No	Ekipman	Teknik Özellikler	Adet	Birim Maliyet (TL)	Toplam Maliyet (TL)
1	50.000 m ³ /sa Gaz Yıkama Kulesi	HDPE malzemeden ø2600 mm çapında, toplamda 7000 mm yüksekliğinde gaz yıkama kulesi, iç dahili aksesuarları, ø50x50mm pall halkası, damla tutucu ve sıvı spreyleme tesisatları, baca, jetcap, bakım kapakları, gaz giriş ve çıkış flanş bağlantıları ile birliktedir.	1	1.161.489	1.161.489
2	50.000 m ³ /sa Fan	HDPE ve PP malzemeden, salyangoz fan, Heri biri 50000 m ³ /sa kapasiteli 250 mmSS basınçlı 55 Kw motorludur.	1	233.700	233.700
3	Sirkülasyon Pompası	Sıvı tankından devir daim yapan sirkülasyon pompası, PP gövde, 50 m ³ /sa kapasiteli, 11 kW motor gücündedir. 2 adet asil, 1adet yedek olacak şekildedir.	3	46.740	140.220
4	NaOH Dozaj Tankı	HDPE malzemeden, 2000 L hacmindedir.	1	25.863	25.863
5	NaOH Dozaj Pompası	50 lt/h kapasiteli, 3 bar basınca sahip mekanik diyaframalı dozaj pompasıdır.	2	9.971	19.942
6	H ₂ SO ₄ Dozaj Tankı	HDPE malzemeden, 1000 L hacmindedir.	1	14.022	14.022
7	H ₂ SO ₄ Dozaj Pompası	30 lt/h kapasiteli, 3 bar basınca sahip mekanik diyaframalı dozaj pompasıdır.	2	8.569	17.138
8	Su Dolma Elektrik Aktüatörlü Vana	Elektrik aktüatörlü ve 220 V beslemelidir.	1	2.804	2.804
9	Su Boşaltma Elektrik Aktüatörlü Vana	Elektrik aktüatörlü ve 220 V beslemelidir.	1	2.804	2.804
10	Sıvı Haznesi ve Dozaj Tankları Seviye Kontrolü	Ultrasonik seviye şalteridir.	3	4.674	14.022
11	pH Metre ve PH Prob	0-14 ph arası ölçüm yapabilen, duvar tip ph metredir. Prob dahildir.	1	6.170	6.170
12	PLC Kumanda Panosu	Plc yazılım ile kontrol edilmektedir.	1	140.220	140.220
13	İşçilik ve Montaj		1	-	-
TOPLAM MALİYET					1.778.395 TL

Yatırım maliyeti 1.778.395 Türk Lirası olarak hesaplanılmıştır.

Gaz yıkama kulesi imalatı, yüksek yoğunluklu polietilen malzemeden (HDPE) olup, spreyci nozullar, damla tutucu, Ø50 mm pall halkaları, baca, jetcap, bakım kapakları maliyetlere dahildir. Radial fan, 50.000 m³/sa debili, 250 mmSS ve 55 kW olarak fiyatlandırılmıştır. Radial fan salyangozu yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) malzemedendir. Belirtilen fiyatlara fan motoru dahildir.

Sirkülasyon pompası ise, polipropilen malzemeden seçilmiş olup, her biri 50 m³/sa debili olup toplamda iki adet asil olacak şekilde sirkülasyon pompası kullanılmıştır. Toplam sirkülasyon pompa debisi 100 m³/sa debilidir. Sirkülasyon sıvısının, nötralizasyon kapsamında uygun ph değerini ayarlayabilmek için sülfürik asit ve sodyum hidroksit dozaj tankı ve dozaj pompası seçilmiştir.

Aktüatörlü vanalar, sirkülasyon haznesine taze su alımı ve kirli suyun boşaltılması için seçilmiştir. Sirkülasyon haznesi ve dozaj tanklarının seviye kontrolleri için ultrasonik tip seviye ölçer seçilmiştir.

Ph metre ve ph prob sirkülasyon sıvısının düzenli olarak kontrolünü sağlamaktadır. Fiyatlandırmada ph metre tipi olarak duvar tip seçilmiştir. Kontrol panosu, plc aracılığıyla sağlanıp, tüm sistem otomatik olarak kontrol edilmiştir.

50.000 m³/sa debili gaz arıtma sistemi kapsamında aşağıda işletmeden kaynaklı aylık maliyetler yer almaktadır.

Beş numaralı ünitenin tahmini işletme maliyet değerleri Tablo 4.19’da belirtilmiştir.

Tablo 4.19. Beş numaralı ünite işletme maliyeti

No	Tahmini Tüketim	Birim/aylık	Birim Maliyet (TL)	Toplam Maliyet (TL)
1	Su	120 m ³	9,42	1.130,4
2	Elektrik	56.880 kWh	2,84	161.539,2
3	Sodyum Hidroksit	1.500 Lt	4,5	6.750
4	Sülfürik Asit	30 Lt	30	900
TOPLAM MALİYET				170.319,6 TL

Su, elektrik, sodyum hidroksit ve sülfürik asit tüketim değerlerine göre sistem için aylık tahmini işletme maliyeti 170.319,6 Türk Lirası olacak şekilde tüketim hesaplanılmıştır. Su ve elektrik birim fiyatları tahmini olup, sırasıyla Su ve Kanalizasyon Dairesi Genel Müdürlüğü ve Enerji Atlası verilerinden alınmıştır (URL-8).

Firma gizliliği kapsamında, bakım ve onarım, işletme personeli maliyetleri paylaşılamadığından sadece elektrik, su, kimyasal tüketimi tahmini maliyetleri paylaşılmıştır.

4.9.5.2. Debisi 100.000 m³/sa Gaz Yıkama Ünitesi

Bu bölümde, 100.000 m³/sa debili, HCl, HF, H₂SO₄ ve HNO₃ gazları giderimi için gaz arıtma sistemindeki ortalama yatırım maliyet değerleri paylaşılmıştır. Maliyet değerleri verilen ekipmanlar, fiyat ve performans olarak markalar kıyaslanarak en uygun değerler seçilmiştir.

Gaz yıkama kulesi imalatı, yüksek yoğunluklu polietilen malzemeden (HDPE) olup, spreyci nozullar, damla tutucu, Ø50 mm pall halkaları, baca, jetcap, bakım kapakları maliyetlere dahildir. Radial fan, her biri 50.000 m³/sa debili, 250 mmSS ve 55 kW olacak şekilde toplamda 2 adet asil, 1 adet yedek olacak şekilde fiyatlandırılmıştır. Gaz arıtma kulesine gönderilen toplam toksik hava 100.000 m³/sa debilidir. Radial fan salyangozu yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) malzemedendir. Belirtilen fiyatlara fan motoru dahildir.

Sirkülasyon pompası ise, polipropilen malzemeden seçilmiş olup, her biri 50 m³/sa debili olup toplamda iki adet asil olacak şekilde sirkülasyon pompası kullanılmıştır. Toplam sirkülasyon pompa debisi 100 m³/sa debilidir.

Sirkülasyon sıvısının, nötralizasyon kapsamında uygun pH değerini ayarlayabilmek için sülfürik asit ve sodyum hidroksit dozaj tankı ve dozaj pompası seçilmiştir.

Aktüatörlü vanalar, sirkülasyon haznesine taze su alımı ve kirli suyun boşaltılması için seçilmiştir.

Sirkülasyon haznesi ve dozaj tanklarının seviye kontrolleri için ultrasonik tip seviye ölçer seçilmiştir.

Ph metre ve ph prob sirkulasyon sıvısının düzenli olarak kontrolünü sağlamaktadır. Fiyatlandırmada ph metre tipi olarak duvar tip seçilmiştir.

Kontrol panosu, plc aracılığıyla sağlanıp, tüm sistem otomatik olarak kontrol edilmiştir.

Altı numaralı ünitenin tahmini yatırım maliyet değerleri Tablo 4.20’de gösterilmiştir.

Tablo 4.20. Altı numaralı ünite yatırım maliyeti

No	Ekipman	Teknik Özellikler	Adet	Birim Maliyet (TL)	Toplam Maliyet (TL)
1	100.000 m ³ /sa Gaz Yıkama Kulesi	HDPE malzemeden ø4000 mm çapında, toplamda 8000 mm yüksekliğinde gaz yıkama kulesi, iç dahili aksesuarları, ø50x50mm pall halkası, damla tutucu ve sıvı spreyleme tesisatları, baca, jetcap, bakım kapakları, gaz giriş ve çıkış flanş bağlantıları ile birliktedir.	1	2.305.840	2.305.840
2	100.000 m ³ /sa Fan	HDPE ve PP malzemeden, salyangoz fan, Heri biri 50000 m ³ /sa kapasiteli 250 mmSS basınçlı 55 Kw motorludur. Toplamda 2 adet asildir.	2	289.788	579.576
3	Sirkulasyon Pompası	Sıvı tankından devir daim yapan sirkulasyon pompası, PP gövde, 50 m ³ /sa kapasiteli, 11 kW motor gücündedir. 2 adet asil, 1adet yedek olacak şeklindedir.	3	57.646	172.938
4	NaOH Dozaj Tankı	HDPE malzemeden, 10000 L hacmindedir.	1	131.963	131.963
5	NaOH Dozaj Pompası	100 lt/h kapasiteli, 3 bar basınca sahip mekanik diyaframlı dozaj pompasıdır.	2	12.308	24.616
6	H ₂ SO ₄ Dozaj Tankı	HDPE malzemeden, 1000 L hacmindedir.	1	15.580	15.580
7	H ₂ SO ₄ Dozaj Pompası	50 lt/h kapasiteli, 3 bar basınca sahip mekanik diyaframlı dozaj pompasıdır.	2	10.127	20.254
8	Su Dolma Elektrik Aktüatörlü Vana	Elektrik aktüatörlü ve 220 V beslemelidir.	1	3.116	3.116
9	Su Boşaltma Elektrik Aktüatörlü Vana	Elektrik aktüatörlü ve 220 V beslemelidir.	1	3.428	3.428
10	Sıvı Haznesi ve Dozaj Tankları Seviye Kontrolü	Ultrasonik seviye şalteridir.	3	5.609	16.826
11	pH Metre ve pH Prob	0-14 ph arası ölçüm yapabilen, duvar tip ph metredir. Prob dahildir.	1	6.793	6.793
12	PLC Kumanda Panosu	Plc yazılım ile kontrol edilmektedir.	1	405.080	405.080
13	İşçilik ve Montaj	-	1	-	-
TOPLAM MALİYET					3.686.010 TL

Yatırım maliyeti 3.686.010 Türk Lirası bedel olarak hesaplanılmıştır.

100.000 m³/sa debili gaz arıtma sistemi kapsamında aşağıda işletmeden kaynaklı aylık maliyetler yer almaktadır.

Firma gizliliği kapsamında, bakım ve onarım, işletme personeli maliyetleri paylaşılamadığından sadece elektrik, su, kimyasal tüketimi tahmini maliyetleri paylaşılmıştır.

Altı numaralı ünitenin tahmini işletme maliyet değerleri Tablo 4.21’de gösterilmiştir.

Tablo 4.21. Altı numaralı ünite işletme maliyeti

No	Tahmini Tüketim	Birim/aylık		Birim Maliyet (TL)	Toplam Maliyet (TL)
1	Su	225	m ³	9,42	2.119,5
2	Elektrik	95.040	kWh	2,84	269.913,6
3	Sodyum Hidroksit	2.100	Lt	4,5	9.450
4	Sülfürik Asit	90	Lt	30	2.700
TOPLAM MALİYET					284.183,1 TL

Su, elektrik, sodyum hidroksit ve sülfürik asit tüketim değerlerine göre sistem için aylık tahmini işletme maliyeti 284.183,1 Türk Lirası olacak şekilde tüketim hesaplanılmıştır.

Su ve elektrik birim fiyatları tahmini olup, sırasıyla Su ve Kanalizasyon Dairesi Genel Müdürlüğü ve Enerji Atlası verilerinden alınmıştır (URL-8).

4.10. İşletmede Karşılaşılan Problemler

Bu bölümde gaz arıtma sistemi işletmesinde karşılaşılan problemlere değinilmiştir.

Gaz arıtma kulelerinin iç aksesuarlarından olan damla tutucu, sistem verimliliği ve toksik gaz giderimi açısından büyük rol oynamaktadır. Damla tutucu kule çıkışına konumlandırılmadığında bacalardan atık gaz çıkışları gözlenebilmektedir. Başka bir deyişle, damla tutucu kuleye konumlandırılmayıp sirkülasyon sıvı damlacıklarının kaçmasına izin verilirse aşırı emisyon meydana gelebilir. Bacadan yayılan damlacıkların içindeki askıda ve çözünmüş katı maddeler, yakın çevrede rahatsız edici hasarlar oluşturabilir.

Radyal fanın konumu ve basıncı da önemlidir. Fanın konumlandırılmasında iki seçenek bulunmaktadır. Birincisi; toksik gazların fan aracılığıyla toplanıp gaz yıkama kulesine aktarımı şeklinde olmaktadır. Bu seçenekte, toksik gaz karışımında büyük çaplı partikül olması durumunda fanın arıza yapabilmesi muhtemeldir. Diğer bir seçenek ise; fanın gaz yıkama kulesi çıkışına konumlandırılıp arıtılmış gazın fan aracılığıyla toplanıp bacaya verilmesi şeklindedir. Bu seçenekte ise; fanın basıncı iyi seçilmelidir. Fan gaz yıkama kulesi çıkışına konumlandırıldığında, kulenin ve toksik gazı toplayan borulardaki basınç kayıpları detaylıca hesaplanılmalıdır. Aksi halde fanın gücü yetersiz kalıp, arıza verebilmektedir. Bu konumlandırmada bir diğer konu ise; fanın basıncı ve debi fazlalığından, toksik gazı arıtılmadan atmosfere atabilme ihtimalidir.

Gaz yıkama kuleleri içinde yer alan dolgu malzemesinin hacmi ve yüksekliği kulenin basıncı veya basınç kaybı açısından önem taşımaktadır. Fanın basıncı seçilirken, kule içindeki dolgu malzemesinin basıncı etkileyen en önemli faktörlerden biri olduğu atlanmamalıdır. Aksi durumda, fan basıncı yetersiz kalıp, istenen toksik gaz arıtma debisi verimli olacak şekilde sağlanamayabilir. Bir diğer ihtimal ise, dolgu hacminin ve dolgu yüksekliğinin giderim verimliliği açısından düşük veya yetersiz olma durumunda, kule içi basınç düşük olsa dahi giderim verimliliği istenen oranda sağlanamayabilir.

Gaz yıkama sistemlerinde dolgu malzemesi kulenin kalbidir. Kule içindeki dolgunun malzemesi, hacmi ve dolgu yüksekliği çok iyi belirlenmelidir. Gazın sıvaya transferi bu bölümde gerçekleşeceğinden dolgu türü iyi seçilmelidir. Çok yüksek sıcaklıklarda, dolgunun deforme olmaması için dolgu malzemesi seramik olarak tercih edilmelidir. Polipropilen, polietilen gibi termoplastik ürünler çok fazla sıcaklığa maruz kaldığında erime gibi problemlere neden olmaktadır.

Gaz arıtma kulesine kimyasal dozlama yapılması durumunda, sirkülasyon sıvısı kontrol cihazlarından olan ph ve orp problemlerinin kontrolü düzenli aralıklarla yapılmalıdır. Aksi durumda, ph veya orp prob bozulduğunda ya da kalibrasyonu yapılmadığında kimyasal dozlamalarda hatalar gözlemlenebilmektedir.

Gaz yıkama kulesi sirkülasyon bölümünde bulunan sıvının eşit dağılması gaz arıtma performansı ve verimliliği açısından önemlidir. Kule içerisinde sıvının eşit dağılması önemlidir. Kule içerisindeki yıkama sıvısının eşit dağılım gösterdiğinden emin

olunmalıdır. Aksi durumda, toksik gaz istenen verimlilikte arıtılamayabilir. Bacadan toksik gaz kaçırları yaşanabilir.

Gaz arıtma sistemi otomatik olarak çalıştırıldığında gaz yıkama sisteminde mevcut olan bütün ekipmanlar çalışmalar başlar, fakat sirkülasyon pompasının kuru çalışmasını ve dolayısıyla arızasını önlemek amaçlı, sirkülasyon pompasının çalışması için sirkülasyon haznesindeki minimum çalışma seviyesini geçmesi gerekmektedir. Aksi durumda, sirkülasyon pompalarında arıza gözlemlenmektedir.

Toksik gazların nötralizasyon sonucunda sirkülasyon tankı içerisinde tortular, katı birikintiler gözlemlenebilmektedir. Su katı parçacıkların sirkülasyon pompalarına zarar vermemesi için sirkülasyon pompaları önüne filtre takılmalıdır. Aksi durumda sirkülasyon pompalarından arıza gözlemlenebilmektedir.

Gaz yıkama kulesin içi ve dışı düzenli aralıklarla kontrol edilmelidir. Bu durum, giderim verimliliği açısından çok önemlidir. Kulenin içi ve kule içindeki aksesuarlar düzenli olarak temizlenmelidir. Zamana bağlı olarak, kule içerisinde katı partiküller oluşup, kule içi aksesuarlarda tıkanmaya neden olabilmektedir. Bu durumda kulenin basıncının artması, gaz arıtmanın gerçekleşmemesi muhtemeldir.

Kulenin içinde bulunan dolgu malzemeleri düzenli aralıklarla kontrol edilmeli veya temizlenmelidir. Deforme olmuş dolgu malzemeleri yenilenmelidir. Dolgu malzemesi absorpsiyon verimliliği açısından büyük önem taşıdığından, gaz arıtmada en önemli faktörlerden biridir. Dolgu malzemeleri deforme olduğunda gaz arıtma gerçekleşmeyebilir.

Kule içinde yer alan damla tutucunun düzenli bakımı için, çıkarılıp takılabilecek yapıda olması ya da damla tutucunun yıkanabilmesi için ek olarak sprey hattı yerleştirilmesi bakım açısından daha efektif olabilmektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Farklı sektörlerde dolgu malzemeli ıslak gaz yıkama sistemi uygulamalarının incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen bu çalışmada, farklı işletme koşulları altında amonyak, hidroklorik, hidroflorik, nitrik, fosforik ve sülfürik asit gaz ve buharlarının pall halkası entegre edilmiş tek kademeli gaz yıkama sistemi ile giderilmesi incelenmiştir. Her sistemde çalışma koşulları altında Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği emisyon sınır değerlerine göre inorganik gazların giderimi sağlanmıştır.

Dolgu malzemesi olarak pall halkası kullanılan tek kademeli gaz yıkama üniteleri, atmosferdeki inorganik gaz ve buharları giderme konusunda önemli bir rol oynamaktadır. Bu araştırmada, farklı ve yüksek debilere sahip olan gaz yıkama ünitelerinde amonyak, hidroklorik asit, hidroflorik asit, nitrik asit, sülfürik asit ve fosforik asit gibi inorganik gaz ve buharları etkili bir şekilde giderdiği gözlemlenmiştir. Giderim verimliliğini artırmak amacıyla çeşitli öneriler bulunmaktadır. Lastik sektöründe, amonyak giderimi için asidik kimyasal dozlaması yapılması önerilmektedir. Galvaniz sektöründe, hidroklorik asit gideriminde NaOH dozlaması uygulanması tavsiye edilmektedir. Havacılık sektöründe, hidroflorik asit gideriminde ise sıvı-gaz oranının artırılması önerilmektedir. Kimya sektöründe, nitrik asit giderimi için pall halkası dolgu bölüm yüksekliğinin artırılması önerilirken, sülfürik asit gideriminde pall halkası dolgu yüksekliğinin önemli olduğu vurgulanmaktadır. Ayrıca, fosforik asit giderim verimimin artırılmasında pall halkası dolgu bölüm yüksekliğinin ve sıvı-gaz oranının yüksek olmasının etkili bir yöntem olduğunu düşünülmektedir.

Çeşitli gaz hızları ve debilerinde giderim verimliliği konusunda değerlendirme yapabilmek adına daha fazla gaz yıkama ünitesi bulunması gerekmektedir. Artan gaz yıkama sistemi sayısı ile çeşitli parametrelerin dikkate alınabileceği bir çerçeve oluşturulabilir. Bu durum, sistemin geniş bir yelpazede performansını değerlendirme ve optimize etme imkanı sunarak, çeşitli işletme koşullarında daha etkili sonuçlar elde edilebileceği düşünülmektedir.

Pall halkasının giderim verimliliğine etkisini gözlemlemek için ise, aynı kulelerde farklı dolgu malzemeleri kullanılıp giderim verimliliklerin gözlemlenmesi önerilmektedir.

Gaz debisi arttıkça, gaz arıtma sistemi yatırım maliyetlerinin artış gösterdiği gözlemlenmiştir. İşletme maliyetleri ise kimyasal dozlamaya göre değişiklik göstermekte olup, gaz debisi artış gösterdikçe genel olarak işletme maliyetleri artmıştır.



KAYNAKLAR

- Anderson H.H. (1993). *Centrifugal Pumps* (3rd ed.). Oxford: Elsevier.
- Bangwoo H., Yong-Jin K. (2007). Removal Characteristics of Gaseous Contaminants by a Wet Scrubber with Different Packing Materials, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 23(6), 744-751.
- Barbour W., Vataavuk W.M. (1995). Wet Scrubbers For Acid Gas, *U.S. Environmental Protection Agency*, EPA/452/B-02-001.
- Biard, P.F., Couvert A., Renner C., Zozor P., Levasseur J. (2013). Research Gate. *Hall Archives-Ouverstes*, 4 (2), 2166-2174. DOI:10.2166/wpt.2009.023
- Cheremisinoff P.N. (1993). *Air Pollution Control and Design For Industry* (1st ed.). New York: Marcel Dekker.
- Coulson J.M., Richardson J.F. (2002). *Coulson and Richardson's Chemical Engineering* (5th ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Danzomo B. A., Salami M.J.E. (2012). Asian Research Publishing Network. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 7(12), 1669-1677.
- EPA. (1982). Control Techniques for particulate Emissions from Stationary Sources- Volume 1 (EPA-450/3-81-005a). Research Triangle Park, NC.
- EPA. (1984). *Air pollution Training Institute- APTI Course SI:412C Wet Scrubber Plan Review* (EPA-450/2-82-020). Research Triangle Park, NC.
- EPA. (1991). *Control Technologies for Hazardous Air Pollutants* (EPA/625/6-91-014), Washington, D.C.
- EPA. (1992). *Office of Air Quality Planning and Standards Control Technologies for Volatile Organic Compound Emissions from Stationary Sources* (EPA 453/R-92-018). Research Triangle Park, NC.
- EPA. (1998). *Air Pollution Control Technology Fact Sheet* (EPA 452/F-03-015). Research Triangle Park, NC.
- European Sulphuric Acid Association ESA, Fertilizers Europe. (2000). *Best Available Techniques for Pollution Prevention and Control in the European Sulphuric Acid and Fertilizer Industries* (EUR 13006 EN). Brüksel.
- Galecki R., Dabrowski M., Bakula T., Obremski K., Novak A., Gutarowska B. (2019). The Influence of the mineral-Microbial Preparation on Ammonia Concentration and Productivity in Laying Hens Houses. *Atmosphere* (10)751, 1-10.

- Gerald T.J., Beachler, D.S. (1998). *Scrubber Systems Operation Review* (2nd ed.). United States of America: North Carolina State University.
- Gregory G.L., Burt R., Emerson Jr., Hudgins C.H. (1978). Summary of Airborne Chlorine and Hydrogen Chloride Gas Measurements for August 20 and September 5 1977 Voyager Launches at Air Force Eastern Test Range Florida, *National Aeronautics and Space Administration*, 78673, 5-22.
- Green D. W., Southard M. Z. (2019). *Perrys's Chemical Engineers' Handbook* (9th ed.). United States: Mc Graw Hill Education.
- Hull, T.R., Stec, A.A., Paul, K.T. (2008). Hydrogen Chloride in Fires, *Fire Safety Science—Proceedings of The Ninth International Symposium*, Karlsruhe, Almany, 21-26 Eylül 2008.
- Kiil S., Johansen K.D., Michelsen L. (1998). Environmental Investigation and Modeling of a Wet Flue Gas Desulfurization Pilot Plant. *American Chemical Society Ind. Eng. Chem. Res.*, 37(7), 2792-2806.
- Kim H.T., Jung C.H., Oh S.N., Lee K.W. (2001). Mary Ann Liebert Inc. *Environmental Engineering Science*, 18 (2), 125-136.
- Kolev N. (2006). *Packed Bed Columns for Absorption, Desorption, Rectification and Direct Heat Transfer* (1st ed.). Oxford: Elsevier
- Lawrence K.W., Norman C.P., Yung-Tse H. (2004). *Air Pollution Control Engineering* (1st ed.). New Jersey: Humana Press Inc.
- Le T.C., Hong G.H., Lin G.Y., Li Z., Pui D.Y.H., Liou Y.L., Wang B.T., Tsai C.J. (2021). Honeycomb Wet Scrubber for Acidic Gas Control: Modeling and Long Term Test. *BMC Sustainable Environment Research*, 31(21), 1-12.
- Manuzon R.B., Hadlocon L.S., Zhao L.Y. (2014). Optimization of Ammonia Using Acid Spray Wet Scrubbers. *American Society of Agricultural and Biological Engineers Transactions of the ASABE*, 57(2), 647-659. DOI: 10.13031/trans.57.10481
- Montazerin N., Akbari G., Mahmoodi M. (2015). *Developments in Turbomachinery Flow Forward Curved Centrifugal Fans* (1st ed.). Oxford: Elsevier.
- Mussatti D. C., Hemmer P. (2002). Wet Scrubbers for Particulate Matter, *Environmental Protection Agency*, EPA/452/B-02-001, 2-60.
- National Industrial Chemicals Notification and Assessment Scheme, NICNAS. (2001). *Hydrofluoric Acid, HF* (19). Sidney.

- Pansang S., Kasikamphaiboon P., Chungsiriporn J. (2014). Removal of NH₃ in Air Released from Rubber Latex Process Using Skim Serum Absorbent. *Trans Tech Publications Ltd.* 8(44), 441-444.
- Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği (2014). *T.C. Resmi Gazete* (29211, 20 Aralık 2014), ÇŞB (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı).
- Sluis S. (1987). *A Clean Technology Phosphoric Acid Process* (1st ed.). Hollanda: Delft University Press.
- Treybal, R. E. (1980). *Mass Transfer Operations* (3rd ed.), New York: McGraw-Hill Book Company.
- URL-1: <https://www.environmentalpollutioncenters.org/air/>, (Ziyaret Tarihi: 10 Nisan 2022).
- URL-2: <http://www.ensotek.com.tr/>, (Ziyaret Tarihi: 30 Mart 2022).
- URL-3: <https://www.apzem.com/india/products/packed-bed-scrubber.html>, (Ziyaret Tarihi: 10 Mart 2022).
- URL-4: <https://wet-scrubber.com/industrial-scrubber-terms-and-definition/horizontal-scrubber/>, (Ziyaret Tarihi: 10 Mart 2022).
- URL-5: <http://www.istanbulvakum.com.tr/>, (Ziyaret Tarihi: 10 Mart 2022).
- URL-6: <https://www.kobold.com/tr>, (Ziyaret Tarihi: 14 Nisan 2022).
- URL-7: <https://www.isu.gov.tr/sufiyatlari/>, (Ziyaret Tarihi: 20 Aralık 2023).
- URL-8: <https://www.enerjiatlasi.com/elektrik-fiyatlari/>, (Ziyaret Tarihi: 20 Aralık 2023).
- U.S. Department of Health Education and Welfare, HEW. (1976). *Occupational Exposure to Nitric Acid* (NIOSH 76 -141). Boston.
- Yap, L. J. (2005). Evaluation of Wet Scrubber Systems, Bachelor dissertation, University of Southern Queensland Faculty of Engineering and Surveying, Australia, 0050027395.
- Yetiş Ü., Küçük E. (2016). Sektörel Atık Kılavuzları Galvaniz Kaplama, *T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü*, 10-12.
- Zhu Z., Xin H., Li H., Dong H. (2012). Assessment of Tubing Type on Ammonia Gas Adsorption. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 28 (2), 265-269.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Sever, D., Özbay B. (2022). Farklı Sektörlerde Pall Halkası Entegre Edilmiş Gaz Yıkama Sistemlerinde İnorganik Gazların Giderim Verimliliğinin Araştırılması. *International Marmara Sciences Congress*, Kocaeli, Türkiye, 9-10 Aralık 2022.



ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini Kocaeli ilinde tamamladı. 2012 yılında girdiği Marmara Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nden 2019 yılında Çevre Mühendisi olarak mezun oldu. 2020-2024 yılları arasında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Bölümün'de Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 2019 yılından beri özel sektörde Çevre Mühendisi olarak görev yapmaktadır.

