

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

**STATİK VE DOLGULU YIKAYICI SİSTEMLERDE H₂S VE NH₃
GİDERİMİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ**

Ersin ÜRESİN

KOCAELİ 2012

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

STATİK VE DOLGULU YIKAYICI SİSTEMLERDE H₂S VE NH₃
GİDERİMİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Ersin ÜRESİN

Prof.Dr. Halil İbrahim SARAÇ
Danışman, Kocaeli Üniv.

Prof.Dr. Durmuş KAYA
Eş Danışman, Karabük Üniv.

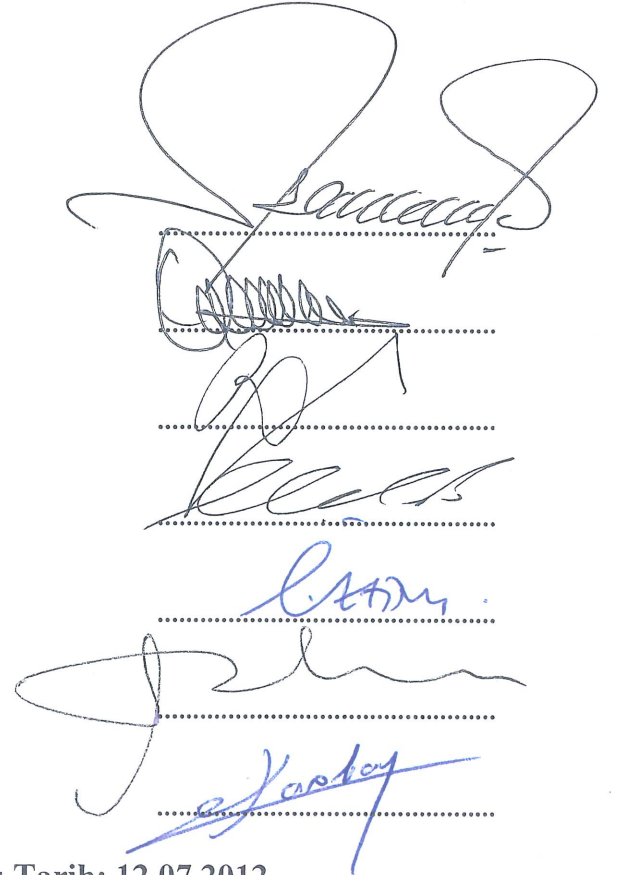
Prof.Dr. Hasan Rıza GÜVEN
Jüri Üyesi, İstanbul Üniv.

Yrd.Doç.Dr. Cenk ÇELİK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Prof.Dr. İlhan Tekin ÖZTÜRK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Prof.Dr. İbrahim KILIÇARSLAN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Doç.Dr. Hasan KARABAY
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.



The image shows six handwritten signatures in blue ink, each placed above a horizontal dotted line. The signatures are: 1. A large, stylized signature starting with a large 'S'. 2. A signature starting with 'C'. 3. A signature starting with 'H'. 4. A signature starting with 'K'. 5. A signature starting with 'I'. 6. A signature starting with 'H'.

Tezin Savunulduğu Tarih: 12.07.2012

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Ülkemizde ve dünyada bacalardan salınan zararlı gazların emisyon standartları içerisinde olması veya gazlaştırma prosesi gibi alternatif teknolojiler sonucu elde edilen sentez gazının kimyasal, sıvı yakıt sentezi ve yakıt pili ile güç üretimi için kullanılabilmesi gaz temizleme teknikleri dahilinde gerçekleşmektedir. Bu teknikler içerisinde gaz yıkayıcılar geniş bir yelpazede yer almaktadır. Kirleticilerin gideriminde uygun gaz yıkayıcı türünün belirlenmesi ve performansını etkileyen parametrelerin araştırılması endüstriyel sistemlerin kurulumunda fayda sağlayacaktır. Bu çalışmada öngörülen gazlı kirleticilerin giderimi için bir gaz yıkayıcı sistemi geliştirilmiş olup; kolon içerisinde yapılan tasarımlar çerçevesinde verim değerleri karşılaştırılmıştır.

Tez çalışmalarım sırasında değerli görüş ve katkılarıyla beni yönlendiren tez danışmanım Sayın Prof.Dr. Halil İbrahim SARAÇ'a en derin saygılarımla teşekkürlerimi sunarım.

Değerli görüş, katkı ve desteklerinden dolayı tez ikinci danışmanım Sayın Prof.Dr. Durmuş KAYA'ya, Sayın Prof.Dr. Hasan Rıza GÜVEN'e, Sayın Yrd.Doç.Dr. Cenk ÇELİK'e; tez çalışmalarım için imkan sağlayan TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi ve Enerji Enstitüsü yöneticilerine ve Sayın Doç.Dr. Fehmi AKGÜN'e teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmalarım sırasında yardımlarını ve manevi katkılarını esirgemeyen Sayın Dr. Alper SARIOĞLAN'a ve eşim Şiringül ÜRESİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım

Ayrıca, Sayın Yrd.Doç.Dr.Müslüm ARICI'ya, Ceren GENÇ'e, imalat çalışmalarında katkıda bulunan teknisyen arkadaşlarım İmdat DENİZ'e ve Erdal GÜGÜK'e teşekkür ederim. Hayatım boyunca beni destekleyen ve bugünlere getiren babam Mehmet ÜRESİN'e, annem Sevim ÜRESİN'e minnet duygularımı sunarım, her zaman yanımda olan, yardımlarını esirgemeyen ablam Ayla ŞENER'e, yeğenim Beyzanur ŞENER'e ve eniştem Ali ŞENER'e teşekkürlerimi sunarım.

Temmuz-2012

Ersin ÜRESİN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iii
TABLolar DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	viii
ÖZET.....	x
İNGİLİZCE ÖZET	xi
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	3
2.1. Gaz Yıkayıcıların Çalışma Prensibi Ve Literatürde Yapılmış Çalışmalar.....	4
2.2. Gaz Yıkayıcı Türleri	14
2.2.1. Venturi gaz yıkayıcıları.....	14
2.2.2. Plakalı gaz yıkayıcıları.....	18
2.2.3. Orifis gaz yıkayıcıları.....	21
2.2.4. Püskürtmeli gaz yıkayıcıları.....	22
2.2.5. Dolgulu gaz yıkayıcıları	23
2.2.6. Siklonik gaz yıkayıcıları	26
2.2.7. Dinamik gaz yıkayıcıları	27
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	31
3.1. Gaz Yıkayıcı Kolon Tasarımı	32
3.2. Yıkayıcı Akışkan Karakterizasyonu	38
3.3. Kirletici Gazın Arıtılması İçin Kullanılan Deneysel Yöntem.....	42
3.3.1. Dolgu malzemesi seçimi	48
3.3.2. Statik mikser tasarımı.....	51
4. YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE ELDE EDİLEN BULGULAR.....	56
4.1. Dolgulu Kolonda Hidrojen Sülfür Giderim Çalışmaları.....	57
4.1.1. Azot içerikli hidrojen sülfür giderim çalışmaları	57
4.1.2. Karışım gazı içerikli hidrojen sülfür giderim çalışmaları	59
4.2. Dolgulu Kolonda Karbondioksit Giderimi.....	67
4.3. Dolgulu Kolonda Amonyak Giderim Çalışmaları	71
4.4. Statik Mikser İle Hidrojen Sülfür Giderim Çalışmaları.....	73
4.5. Statik Mikser İle Karbondioksit Giderimi.....	80
4.6. Statik Ve Dolgulu Kolona Ait Deneysel Çalışmaların Karşılaştırılması	84
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	92
KAYNAKLAR	96
EKLER	104
KİŞİSEL KAYNAKLAR VE ESERLER.....	131
ÖZGEÇMİŞ	132

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Tipik bir gaz yıkayıcı	4
Şekil 2.2. Partiküllerin giderimi	5
Şekil 2.3. Gazlı kirletici giderim aşamaları.....	6
Şekil 2.4. Gaz yıkayıcı sistemlerinde kirli gaz-sıvı teması ve nem tutumu	7
Şekil 2.5. Asidik çözeltinin pH değerinin artmasının amonyak gideriminde etkisi ...	8
Şekil 2.6. Amonyak gideriminde su debisinin zamana göre etkisi	9
Şekil 2.7. Gaz debisinin giderim verimi üzerindeki etkisi	11
Şekil 2.8. Yıkayıcı sıvı debisinin giderim verimi üzerindeki etkisi	12
Şekil 2.9. Bazik çözeltinin pH değerinin giderim verimi üzerindeki etkisi	12
Şekil 2.10. Yapısal dolgu malzemesine sahip bir gaz yıkayıcıda gaz hızı artmasıyla giderim veriminde azalma meydana gelmesi	13
Şekil 2.11. Venturi gaz yıkayıcı konfigürasyonu.....	15
Şekil 2.12. Bir venturi gaz yıkayıcıda boğaz uzunluğunun giderim verimine etkisi	15
Şekil 2.13. Sıvının birleşme bölümünden verildiği venturi gaz yıkayıcı	16
Şekil 2.14. Sıvının boğaz bölümünden sağlandığı venturi gaz yıkayıcı	17
Şekil 2.15. Dikdörtgen boğazlı püskürtmeli venturi gaz yıkayıcı.....	17
Şekil 2.16. Boğaz bölümü ayarlanabilen venturi gaz yıkayıcı.....	18
Şekil 2.17. Plakalı gaz yıkayıcı	19
Şekil 2.18. Delikli plaka.....	19
Şekil 2.19. Çarpmalı tip plaka.....	20
Şekil 2.20. Kovanlı tip plaka.....	20
Şekil 2.21. Valfli tip plaka	21
Şekil 2.22. Orifis gaz yıkayıcı.....	21
Şekil 2.23. Karşıt akışlı püskürtmeli gaz yıkayıcı	22
Şekil 2.24. Karşıt akışlı dolgulu gaz yıkayıcı.....	23
Şekil 2.25. Dolgu malzemesi çeşitleri.....	24
Şekil 2.26. Yıkayıcı sıvı dağıtıcıları (a) oluklu (b) delikli tüp (c) nozul.....	25
Şekil 2.27. Siklonik gaz yıkayıcı.....	26
Şekil 2.28. Püskürtme manifoldlu siklonik gaz yıkayıcı.....	27
Şekil 2.29. Santrifüj destekli dinamik gaz yıkayıcı	28
Şekil 2.30. Endüklenmiş püskürtme destekli dinamik gaz yıkayıcı.....	29
Şekil 3.1. Dolgulu kolonlarda taşma ve basınç düşmesi için genelleştirilmiş diyagram.....	33
Şekil 3.2. Amonyak gideriminde kolondaki giriş ve çıkış değerleri.....	40
Şekil 3.3. Suda çözünen gazlar için Henry katsayıları.....	41
Şekil 3.4. Deney düzeneğinin şematik olarak gösterimi	42
Şekil 3.5. Karışım gazı ortamında karşıt akışlı hidrojen sülfür H ₂ S giderimi için akış diyagramı	46
Şekil 3.6. Kurulan gaz yıkayıcı sisteminin fotoğrafı.....	47
Şekil 3.7. Kolon içerisinde kullanılan ticari dolgu malzemesi	49
Şekil 3.8. Yapısal dolgu malzemesi formu	49
Şekil 3.9. Tasarlanan statik mikserin teknik resmi	51
Şekil 3.10. Statik mikser modüllerinin birleştirilmiş görüntüsü	53

Şekil 3.11. Tasarlanan statik mikser ve içerisinde kullanıldığı kolon.....	53
Şekil 4.1. Dolgulu kolonda karşıt akışlı modda azot içerikli H ₂ S gideriminde gaz debisinin verim üzerine etkisi.....	58
Şekil 4.2. Dolgulu kolonda eş-yönlü akışlı modda azot içerikli H ₂ S gideriminde gaz debisinin verim üzerine etkisi.....	59
Şekil 4.3. Dolgulu kolonda, karşıt akışlı modda 3 (L/dk) karışım gazı içerikli çalışmada giriş akımındaki H ₂ S miktarlarına göre çıkış akımındaki H ₂ S miktarları ve H ₂ S giderim verimleri	61
Şekil 4.4. Dolgulu kolonda, karşıt akışlı modda 4 (L/dk) karışım gazı içerikli çalışmada giriş akımındaki H ₂ S miktarlarına göre çıkış akımındaki H ₂ S miktarları ve H ₂ S giderim verimleri	63
Şekil 4.5. Dolgulu kolonda, karşıt akışlı modda 5 (L/dk) karışım gazı içerikli çalışmada giriş akımındaki H ₂ S miktarlarına göre çıkış akımındaki H ₂ S miktarları ve H ₂ S giderim verimleri	64
Şekil 4.6. Dolgulu kolonda, eş-yönlü akışlı modda 3 (L/dk) karışım gazı içerikli çalışmada giriş akımındaki H ₂ S miktarlarına göre çıkış akımındaki H ₂ S miktarları ve H ₂ S giderim verimleri	65
Şekil 4.7. Dolgulu kolonda öngörülen kirletici giderim verimi ile karışım gazı içeriğinde farklı koşullardaki deneysel çalışmaların karşılaştırılması	66
Şekil 4.8. Dolgulu kolonda karışım gazı içeriğinde karşıt akışlı deneylerde H ₂ S giriş akımına göre farklı L/G oranlarının verim üzerine etkisi.....	67
Şekil 4.9. Dolgulu kolonda, karşıt akışlı modda 3 (L/dk) karışım gazı içerikli çalışmada giriş akımındaki H ₂ S miktarlarına göre çıkış akımındaki CO ₂ miktarları ve CO ₂ giderim verimleri	68
Şekil 4.10. Dolgulu kolonda, karşıt akışlı modda 4 (L/dk) karışım gazı içerikli çalışmada giriş akımındaki H ₂ S miktarlarına göre çıkış akımındaki CO ₂ miktarları ve CO ₂ giderim verimleri	69
Şekil 4.11. Dolgulu kolonda, karşıt akışlı modda 5 (L/dk) karışım gazı içerikli çalışmada giriş akımındaki H ₂ S miktarlarına göre çıkış akımındaki CO ₂ miktarları ve CO ₂ giderim verimleri	70
Şekil 4.12. Dolgulu kolonda, eş-yönlü akışlı modda 3 (L/dk) karışım gazı içerikli çalışmada giriş akımındaki H ₂ S miktarlarına göre çıkış akımındaki CO ₂ miktarları ve CO ₂ giderim verimleri	70
Şekil 4.13. Dolgulu kolonda karşıt akışlı modda azot içerikli NH ₃ gideriminde gaz debisinin verim üzerine etkisi.....	71
Şekil 4.14. Dolgulu kolonda eş-yönlü akışlı modda azot içerikli NH ₃ gideriminde gaz debisinin verim üzerine etkisi.....	72
Şekil 4.15. Azot içerikli NH ₃ giderim verimlerinin karşıt ve eş yönlü akışlı deneyler için karşılaştırılması.	73
Şekil 4.16. Statik mikserli kolonda, karşıt akışlı modda 3 (L/dk) karışım gazı içerikli çalışmada giriş akımındaki H ₂ S miktarlarına göre çıkış akımındaki H ₂ S miktarları ve H ₂ S giderim verimleri	74
Şekil 4.17. Statik mikserli kolonda 3 (L/dk) karışım gazı içeriğinde karşıt akışlı deney çalışmasında çıkış akımındaki H ₂ S miktarlarının zamana göre değişimleri	75
Şekil 4.18. Dolgulu ve statik mikserli kolonlarda, karşıt akışlı modda 3 (L/dk) karışım gazı içerikli çalışmada giriş akımındaki H ₂ S miktarına göre çıkış akımındaki H ₂ S miktarlarının karşılaştırılması	75

Şekil 4.19. Statik mikserli kolonda, karşıt akışlı modda 4 (L/dk) karışım gazı içerikli çalışmada giriş akımındaki H ₂ S miktarlarına göre çıkış akımındaki H ₂ S miktarları ve H ₂ S giderim verimleri	76
Şekil 4.20. Statik mikserli kolonda 4 (L/dk) karışım gazı içeriğinde karşıt akışlı deney çalışmasında çıkış akımındaki H ₂ S miktarlarının zamana göre değişimleri	77
Şekil 4.21. Dolgulu ve statik mikserli kolonlarda, karşıt akışlı modda 4 (L/dk) karışım gazı içerikli çalışmada giriş akımındaki H ₂ S miktarına göre çıkış akımındaki H ₂ S miktarlarının karşılaştırılması	78
Şekil 4.22. Statik mikserli kolonda, karşıt akışlı modda 5 (L/dk) karışım gazı içerikli çalışmada giriş akımındaki H ₂ S miktarlarına göre çıkış akımındaki H ₂ S miktarları ve H ₂ S giderim verimleri	79
Şekil 4.23. Statik mikserli kolonda 5 (L/dk) karışım gazı içeriğinde karşıt akışlı deney çalışmasında çıkış akımındaki H ₂ S miktarlarının zamana göre değişimleri	79
Şekil 4.24. Dolgulu ve statik mikserli kolonlarda, karşıt akışlı modda 5 (L/dk) karışım gazı içerikli çalışmada giriş akımındaki H ₂ S miktarına göre çıkış akımındaki H ₂ S miktarlarının karşılaştırılması	80
Şekil 4.25. Statik mikserli kolonda, karşıt akışlı modda 3 (L/dk) karışım gazı içerikli çalışmada giriş akımındaki H ₂ S miktarlarına göre çıkış akımındaki CO ₂ miktarları ve CO ₂ giderim verimleri	81
Şekil 4.26. Statik mikserli kolonda 3 (L/dk) karışım gazı içeriğinde karşıt akışlı deney çalışmasında çıkış akımındaki CO ₂ oranlarının zamana göre değişimleri	81
Şekil 4.27. Statik mikserli kolonda, karşıt akışlı modda 4 (L/dk) karışım gazı içerikli çalışmada giriş akımındaki H ₂ S miktarlarına göre çıkış akımındaki CO ₂ miktarları ve CO ₂ giderim verimleri	82
Şekil 4.28. Statik mikserli kolonda 4 (L/dk) karışım gazı içeriğinde karşıt akışlı deney çalışmasında çıkış akımındaki CO ₂ oranlarının zamana göre değişimleri	83
Şekil 4.29. Statik mikserli kolonda, karşıt akışlı modda 5 (L/dk) karışım gazı içerikli çalışmada giriş akımındaki H ₂ S miktarlarına göre çıkış akımındaki CO ₂ miktarları ve CO ₂ giderim verimleri	83
Şekil 4.30. Statik mikserli kolonda 5 (L/dk) karışım gazı içeriğinde karşıt akışlı deney çalışmasında çıkış akımındaki CO ₂ oranlarının zamana göre değişimleri	84
Şekil 4.31. Dolgulu kolonda karşıt akış ve eş yönlü akışlı deney çalışmalarında azot ve karışım gazı içerikli H ₂ S giderim verimlerinin karşılaştırılması ..	85
Şekil 4.32. Dolgulu kolonda karışım gazı içerikli karşıt akışlı deney çalışmasında H ₂ S ve CO ₂ giderim verimleri	86
Şekil 4.33. Dolgulu ve statik mikserli kolon içerisinde karışım gazı içerikli karşıt akışlı deneyde 250 ppmv H ₂ S giderim verimleri	87
Şekil 4.34. Karışım gazı içeriğinde karşıt akışlı deney çalışmasında H ₂ S giderim verimleri.....	88
Şekil 4.35. Karışım gazı içerikli karşıt akışlı deneyde dolgulu ve statik mikserli kolonda gaz hızlarına göre H ₂ S giderim verimleri.....	89
Şekil 4.36. Karışım gazı içerikli karşıt akışlı deney çalışmasında CO ₂ giderim verimleri.....	90

Şekil 4.37. Statik mikserli kolonda karışım gazı içerikli karşıt akışlı deney çalışmasında H ₂ S ve CO ₂ giderim verimleri.....	90
---	----

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Gazlaştırma sonucu ortaya çıkan gazların ve kirleticilerin dağılım oranları	3
Tablo 2.2. Bazı proseslerde gazlı kirleticilerin sınır değerleri	3
Tablo 2.3. Gaz yıkayıcı sistemlerinde partikül giderim verimleri	29
Tablo 2.4. Gaz yıkayıcı sistemlerinde gazlı kirleticilerin giderim verimleri	30
Tablo 3.1. Tasarım parametreleri	36
Tablo 3.2. Tasarım parametreleri dahilinde hesaplanan değerler	37
Tablo 3.3. Kütle akış kontrolörlerinin teknik özellikleri	43
Tablo 3.4. Kontrol ekipmanının teknik özellikleri	44
Tablo 3.5. Gaz kromotografi-I teknik özellikleri	48
Tablo 3.6. Gaz kromotografi-II teknik özellikleri	48
Tablo 3.7. Gaz ölçüm cihazı teknik özellikleri	48
Tablo 3.8. Ticari dolgu malzemesinin teknik özellikleri	50
Tablo 3.9. Statik mikserin teknik özellikleri	52
Tablo 4.1. Dolgulu kolonda azot içerikli hidrojen sülfür giderimi için işletme parametreleri	58
Tablo 4.2. Dolgulu kolonda 3 (L/dk) karışım gazı içeriğinde karşıt akışlı modda deney için gaz kompozisyonları	60
Tablo 4.3. Dolgulu kolonda 4 (L/dk) karışım gazı içeriğinde karşıt akışlı modda deney için gaz kompozisyonları	62
Tablo 4.4. Dolgulu kolonda 5 (L/dk) karışım gazı içeriğinde karşıt akışlı modda deney için gaz kompozisyonları	64
Tablo 4.5. Dolgulu kolonda azot içerikli amonyak giderimi için işletme parametreleri	71
Tablo 4.6. Statik mikserli kolonda 3 (L/dk) karışım gazı içeriğinde karşıt akışlı modda deney için gaz kompozisyonları	74
Tablo 4.7. Statik mikserli kolonda 4 (L/dk) karışım gazı içeriğinde karşıt akışlı modda deney için gaz kompozisyonları	76
Tablo 4.8. Statik mikserli kolonda 5 (L/dk) karışım gazı içeriğinde karşıt akışlı modda deney için gaz kompozisyonları	78
Tablo 4.9. Deney çalışmalarında kullanılan dolgu malzemesi ve statik mikserin geometrik özellikleri	87

SİMGELER VE KISALTMALAR

a	: Özgül yüzey alanı (m^2/m^3)
A	: Kesit alanı (m^2)
b	: Dolgu malzemesi kanal tabanının genişliği (mm)
C	: Konsantrasyon
d	: Çap (mm)
f	: Taşma oranı
F	: Dolgu faktörü (m^2/m^3)
g	: Yerçekimi ivmesi (m/s^2)
G'	: Kütle akısı (kg/m^2s)
h	: Yükseklik (mm)
H	: Henry katsayısı
l	: Plaka kalınlığı (mm)
\dot{m}	: Kütleli debi (kg/s)
M	: Moleküler ağırlık (g/mol)
n	: Molar debi (mol/s)
P	: Basınç (atm)
\dot{Q}	: Hacimsel debi (L/dk)
s	: Dolgu malzemesi kanalının kenar uzunluğu (mm)
u	: Hız (m/s)
V	: Hacim (m^3)
\bar{x}	: Sherwood diyagramında boyutsuz absis değeri (Şekil 3.1)
ρ	: Yoğunluk (kg/m^3)
ε	: Sherwood diyagramında boyutsuz ordinat değeri (Şekil 3.1)
β	: Boşluk oranı (boş hacimin dolu hacime oranı)
Φ	: Yıkayıcı sıvı çözeltisi yoğunluğunun suyun yoğunluğuna oranını
μ	: Mutlak viskozite (Pa.s)
θ	: Eğim açısı ($^\circ$)
ΔP	: Basınç düşümü (mSS)
λ	: Deneysel katsayı
η	: Verim (%)

Alt indisler

c	: Kolon
d	: Dolgu
g	: Gaz
G	: Giderim
h	: Hidrolik
İ	: İşletme
k	: Kanal
k,g	: Kolona giren
k,ç	: Kolondan çıkan
l	: Sıvı
p	: Plaka

s : Statik mikser
t : Transfer ünite
T : Taşma

Kısaltmalar

H₂S : Hidrojen sülfür
NH₃ : Amonyak
CO₂ : Karbondioksit
NaOH : Sodyum hidroksit
Na₂CO₃ : Sodyum karbonat
H₂SO₄ : Sülfürik asit
NaOCl : Sodyum hipoklorit
KOH : Potasyum hidroksit

STATİK VE DOLGULU YIKAYICI SİSTEMLERDE H₂S VE NH₃ GİDERİMİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada kirletici gideriminde verimi etkileyen faktörleri incelemek amacıyla bir gaz yıkayıcı sistemi tasarlanıp kurulmuştur ve simulasyon gazından hidrojen sülfür (H₂S), karbondioksit (CO₂) ve amonyak (NH₃) giderimi üzerine farklı gaz debilerinde, farklı akış modunda ve farklı kirli gaz kompozisyonlarında deneysel incelemelerde bulunulmuştur. İçerisinde ticari dolgu malzemesi ve statik mikser bulunan iki farklı kolon kirletici giderimi bakımından karşılaştırılmıştır. Çalışmalarımızın ilk bölümünde dolgulu kolon ile H₂S ve NH₃ giderim deneyleri gerçekleştirilmiştir. H₂S giderim veriminin en iyi sağlandığı yöntemin karşıt akışlı olduğu deney çalışmalarında gözlenmiştir. Dolgu malzemesi ile elde edilen deney sonuçlarına karşı kirletici giderimini iyileştirmeye yönelik araştırmalar yapılmıştır. Çapı dolgu malzemesine göre daha büyük, boşluk oranı yüksek ve yaklaşık dolgulu ile aynı hacimde olan bir statik mikser tarafımızdan tasarlanmıştır. Tasarladığımız bu statik mikser ayrı bir kolon içerisinde konumlandırılarak aynı deney koşullarında H₂S giderim incelemeleri yapılmıştır. Statik mikserli kolon ile deney çalışmasında gaz hızının mevcut yapısal dolgulu kolondaki hıza göre az olması ile giderim veriminde yaklaşık %25 olumlu etki sağlamıştır. CO₂ ve H₂S'in bir arada bulunması gaz yıkayıcı kolonu boyunca sodyum hidroksit tüketimini artırdığından yüksek kirletici yüklerinde her iki kolonda da H₂S giderim verimini azaltmaktadır. Deneysel çalışmalar sonucunda yıkayıcı sistemlerde kirletici gideriminde kalma süresinin de gaz hızı kadar etkili olduğu görülmüştür. Statik mikserli kolonda, 250-1000 ppmv kirletici konsantrasyonları arasında üç saniyelik veya üzeri bir gaz kalma süresinin optimum noktaya daha yakın olduğu gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Amonyak Giderimi, Gaz Temizleme, Gaz Yıkayıcı Sistemleri, Hidrojen Sülfür Giderimi.

THE EXPERIMENTAL ANALYSIS OF H₂S AND NH₃ REMOVAL IN STATIC AND PACKED SCRUBBING SYSTEMS

ABSTRACT

In this study, to investigate the factors on removal efficiency a scrubbing system has been designed and removal of hydrogen sulfide (H₂S), carbondioxide (CO₂) and ammonia (NH₃) from simulated gas has been studied with different flow rates, flow modes and gaseous pollutant concentrations. Structured packing and static mixer in the two different columns are compared for removal of pollutants. In the first part of our investigation, H₂S and NH₃ removal has been studied with packed column. Better H₂S scrubbing efficiencies have been obtained in countercurrent flow mode. Against to results which are obtained by packed column in experiments, studies were carried out to improve pollutants removal. We designed a static mixer which has larger diameter and void fraction than structured packing and has approximately same volume as packed column. Static mixer has been located in a separate column to investigate the H₂S removal with same experimental conditions. Experiments with static mixer column, because of gas velocity is less than the structured packed column, has approximately 25% positive effect on removal efficiency. The coexistence of CO₂ and H₂S have been shown to increase the sodium hydroxide consumption along the scrubber column thereby decreasing the H₂S removal efficiency at higher H₂S loads in each column. The residence time is as effective as gas velocity in scrubbing systems to remove the gaseous pollutants has been shown in experimental studies. A gas residence times of equal or above 3 seconds were seemed to be closer to the optimum point in static mixer column between 250-1000 ppmv gaseous pollutant concentrations.

Keywords: Ammonia Removal, Gas Clean Up, Gas Scrubbers, Hydrogen Sulfide Removal.

1. GİRİŞ

Partikül, amonyak (NH_3) ve hidrojen sülfür (H_2S) genellikle kömürün gazlaştırılması sonucu elde edilen sentez gazında yer alan başlıca kirleticileri oluşturmaktadır. Malzeme ve çevre üzerindeki zarar verici etkileri ele alındığında kömür ve biyokütle gazlaştırma prosesinde bu kirleticilerin giderilmesi önemli bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Kirletici gazlar olan hidrojen sülfür (H_2S) ve amonyak (NH_3) özellikle boru hatlarında korozyon meydana getirdiği gibi sistemin ömrünü de olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca bu kirleticiler, reaktörlerde yer alan katalizör malzemelerin zehirlenmelerine de neden olmaktadır. Bu nedenle, gaz türbini, yakıt pili, Fischer-Tropsch prosesi, metanol ürünleri için gazlaştırma sonrası elde edilen yakıt veya sentez gazından yararlanabilmek için efektif bir gaz temizleme teknolojisine ihtiyaç duyulmaktadır [1,2].

Gaz yıkayıcı sistemleri temizleme yöntemlerinin büyük bir payını oluşturmaktadır. Bu sistemlerin özellikle tasarımları üzerine yapılan AR-GE faaliyetleri ve araştırmalar katlanarak artmaktadır. Bu açıdan bakıldığında gelecek vadeden bu teknoloji üzerinde yapılan araştırmalar, bu sistemlerin performansının artırılması noktasında yoğunlaşmaktadır.

Bu tezin amacı bir gaz yıkayıcı sistemi tasarlayıp kurmak ve kirletici giderimine etki eden gaz konsantrasyonu, gaz debisi, akış modu, gaz hızı ve kalma süresi gibi faktörlerin incelenerek gaz temizleme açısından verimliliği artırmaya yönelik iyileştirme çalışmalarının yapılmasıdır.

Bu çalışmada hidrojen sülfür (H_2S) ve amonyak (NH_3) giderimine yönelik incelemelerde bulunuldu. Literatür incelemelerinde genellikle gaz yıkayıcı sisteminde tek bir kolon türü kullanılarak kirletici giderim çalışmaları yapılmıştır. Bu tezde literatürden farklı olarak;

- iki farklı kolonun kullanıldığı yıkayıcı sistemi, kirletici giderim verimleri açısından karşılaştırıldı ve optimum çalışma şartları belirlendi,

- farklı akış modlarında (karşıt akışlı ve eş yönlü akışlı) kirletici giderimleri incelenerek akış modunun verime etkisi araştırıldı,
- azot ve karışım gazları ortamında çalışmalar yaparak farklı gaz ortamlarının kirletici giderimi üzerine etkileri incelendi,
- kurulan bir gaz yıkayıcı sisteminde verimi iyileştirmeye yönelik araştırmalarda bulunuldu ve kolon içi kirletici giderimine yönelik farklı tasarım çalışmaları yapıldı,
- yapılan tasarım çalışmaları sonucunda statik mikser olarak tanımlanan akım kırıcı bir ekipmanın kolon içerisine yerleştirilerek akım yönünün değiştirilmesinin verime olan etkisi araştırıldı, buna bağlı olarak gaz hızının ve kalma süresinin de etkileri üzerine odaklanıldı.

Tezin ikinci bölümünde bugüne kadar konu ile ilgili yapılmış çalışmalar göz önünde bulundurularak literatürde yer alan kirletici giderim verimlerini etkileyen faktörler incelenmiştir. Gaz yıkayıcıların tüm çeşitleri detaylı olarak incelenmiş ve kirletici giderimi uygunluğuna yönelik çalışma prensipleri araştırılmıştır.

Üçüncü bölümde gaz yıkayıcı sisteminin kolon tasarımıyla ilgili hesaplamalara ve kurulan deney düzeneği hakkında bilgilere yer verilmiştir. Hidrojen sülfür (H_2S) ve amonyak (NH_3) giderimi için etkili olan yıkayıcı sıvıların karakterizasyonları bu bölümde anlatılmıştır. Kolon içerisinde kullanılan ticari dolgu malzemesi ve tasarlanan statik mikserin teknik özellikleri de deneysel yöntemin içerisinde yer almaktadır.

Dördüncü ve son bölümde ise dolgu malzemeli ve statik mikserli kolonla yapılan deney çalışmalarının sonuçları karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Kurulan sistemin verimi değerlendirilmiş ve verimin yüksek olduğu uygun çalışma koşulları belirtilmiştir. Özellikle karışım işlemi için kullanılan statik mikserlerin gaz yıkayıcı sistemlerinde kolon içerisinde kullanıldıklarında verim bakımından iyileşme sağladığı gösterilmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

Endüstriyel prosesler sonucu elde edilen gazın içerisinde bulunan kirleticilerin temizlenmesi hususu emisyon standartlarına uygun olma zorunluluğunun yanı sıra elde edilen gazın verimli kullanılması açısından da oldukça önemlidir. Örneğin; kömürün gazlaştırılması sonucu ortaya çıkan gazların ve kirleticilerin dağılım oranları Tablo 2.1’de verilmektedir.

Tablo 2.1. Gazlaştırma sonucu ortaya çıkan gazların ve kirleticilerin dağılım oranları [3]

Gaz ve Kirletici Türü	Gaz ve Kirletici Kompozisyonu
H ₂ (Hidrojen)	% 25-30
CO (Karbonmonoksit)	% 30-60
CO ₂ (Karbondioksit)	% 5-15
CH ₄ (Metan)	% 0-5
H ₂ O (Su buharı)	% 2-30
COS (Karbonil sülfid)	% 0- 0,1
H ₂ S (Hidrojen sülfür)	% 0,2-1
NH ₃ (Amonyak)	% 0,3

Tablo 2.1’de belirtilen H₂S hidrojen sülfür ve NH₃ (amonyak) kirleticilerinin sıvı yakıt eldesi ve yakıt pili ile güç üretimi gibi proses uygulamalarında müsaade edilen değerleri Tablo 2.2’de verilmektedir.

Tablo 2.2. Bazı proseslerde gazlı kirleticilerin sınır değerleri [3]

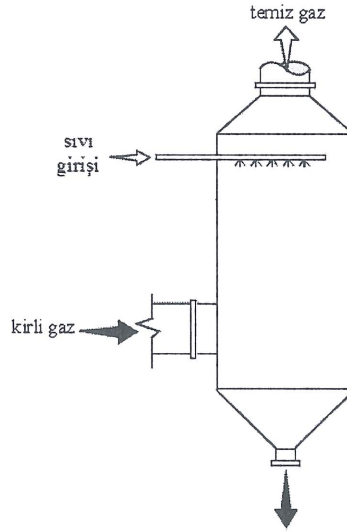
Proses Türü	Kirletici Türü	Sınırlamalar
Sıvı Yakıt Eldesi	H ₂ S	< % 6.10 ⁻⁶
	NH ₃	< % 0,001
Yakıt Pili ile Güç Üretimi	H ₂ S	< % 1.10 ⁻⁵
	NH ₃	< % 0,5

Bu bölümde gazların içerisinde yer alan kirleticilerin gideriminde kullanılan yıkayıcı sistemlerinin çalışma prensipleri, gaz içerisinde bulunan kirleticilerin giderimi için kullanılan kimyasal çözelti çeşitleri ve gaz yıkayıcı sistemleri ile ilgili literatürde

yapılmış bazı çalışmalar anlatılmıştır. Farklı tasarım ve çalışma prensiplerine sahip gaz yıkayıcıların türleri hakkında bilgilere yer verilmiştir.

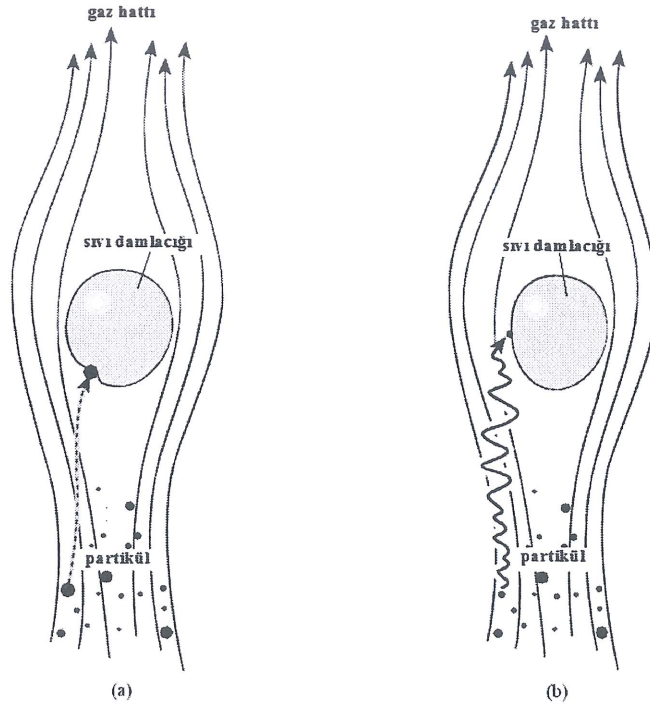
2.1. Gaz Yıkayıcıların Çalışma Prensibi Ve Literatürde Yapılmış Çalışmalar

Gaz yıkayıcılar, yüksek verimlerinden dolayı hem endüstriyel alanda, hem de deneysel amaçlı gaz temizleme proseslerinde yaygın olarak kullanılan sistemlerdir. Gaz yıkayıcılar tasarım ve çalışma bakımından farklı konfigürasyonlara sahip olup; gazın içerisinde yer alabilen partiküllerin giderilmesini sağlayabildiği gibi gazlı kirleticilerin (H_2S, NH_3, vb) uzaklaştırılması için de kullanılabilir. Bu sistemler proses esnasında, partiküllerin sıvı damlacıkları tarafından tutulmasını, kirletici gazların ise sıvı içinde çözünmesini veya absorbe edilmesini sağlamaktadır [4-11].



Şekil 2.1. Tipik bir gaz yıkayıcı [7]

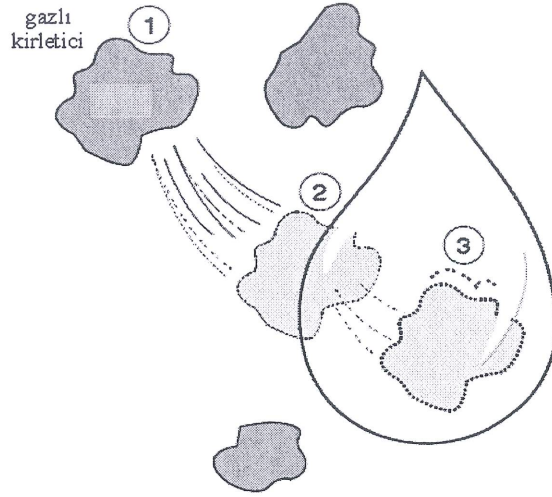
Şekil 2.1'de tipik bir gaz yıkayıcı gösterilmektedir. Sıvı, kolonun üst kısmından nozullar vasıtasıyla atomize olmuş halde verilir. Damlalar serbest olarak nihai çökme hızları ile aşağıya doğru inerler. Kolonun alt kısmından verilen kirli gaz yukarı doğru hareket ederek sıvı damlacıklarla temas etme neticesinde tutulur ve temizlenmiş gaz üst taraftan kolonu terk eder. Tutulan partikülleri ve/veya gaz halindeki kirleticileri içeren kirlenmiş sıvı kolonun alt tarafından bir atık tankına gönderilmektedir.



Şekil 2.2. Partiküllerin giderimi [7]

Şekil 2.2'de gaz hattında partiküllerin çarpışma ve yayılım etkisiyle giderimi gösterilmektedir. Yıkayıcı sistemlerde kirli gaz içerisinde bulunan partiküller gaz hattını izleyerek yoluna devam ederler ancak kolonun üst kısmından püskürtülen sıvı bu kirli gaza temas ettiğinde Şekil 2.2a'da görüldüğü gibi damlacıklar ile çarpışmaları sonucu partiküllerin hareketleri kısıtlanabilir. Bu durumda partiküller gaz hattını izleyemez ve damlacıkların kinetik enerjisi partiküllerden yüksek olduğundan damlacıklarla beraber partiküller kolonun alt kısmına doğru sürüklenir. Damlacıklar ile partiküllerin çarpışma sayısı partikül boyutunun artmasıyla ya da partiküller ile damlacıklar arasındaki hızın artmasıyla artabilir. Partikül boyutunun artması sıvı damlacığı ile çarpışma olasılığını da arttırmaktadır. Çarpışma mekanizması denilen bu koşulda $1 \mu\text{m}$ 'den büyük partiküller tutunmaktadır [7].

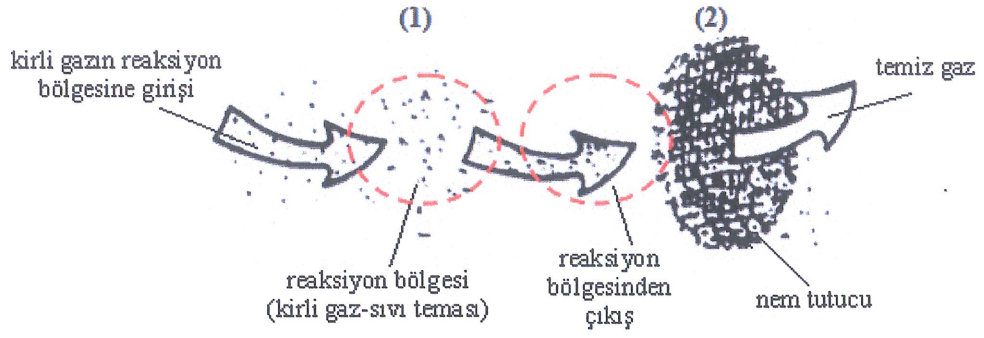
Kirli gaz içerisinde yer alan daha küçük boyutlu partiküller ($< 0,1 \mu\text{m}$), Şekil 2.2b'deki gösterildiği gibi gelişigüzel hareket etmektedir. Bu partiküller çok küçük olduğundan kirli gaz hattı içerisinde gaz molekülleri tarafından savrulularak yayılma etkisi gösterirler. Partiküllerin bu düzensiz hareketleri diğer giderim mekanizmasına benzer bir şekilde sıvı damlacığı ile çarpışmasına ve kolonun alt kısmına doğru sürüklenmesine neden olmaktadır [7].



Şekil 2.3. Gazlı kirletici giderim aşamaları [7]

Gazlı kirleticilerin giderimi kimyasal reaksiyon ya da fiziksel davranıştan dolayı absorpsiyon sonucu gerçekleşmektedir. Hidrojen sülfürün (H_2S) sodyum hidroksit ($NaOH$) ile tepkimeye girmesiyle tutunması kimyasal reaksiyon, amonyakın (NH_3) suda çözünerek tutunması ise fiziksel davranış sonucu oluşmaktadır. Şekil 2.3'te absorpsiyon işlemi esnasında gerçekleşen üç adım belirtilmektedir. Şekildeki (1) nolu kısım kirli gazın bulunduğu ana bölgeyi ifade etmektedir. Gazlı kirletici (NH_3 vb) bu bölgeden sıvı damlacığına doğru yayılarak (2) nolu gaz-sıvı arayüzeyinde konumlanır. Bu bölgede gaz, sıvı damlacığının arayüzeyinden sıvı faza geçer. (3) nolu kısım sıvının yoğun olduğu bölgedir ve gaz moleküllerinin bu bölgeye tamamen intikal etmesi sonucunda absorblama işlemi gerçekleşerek kirletici tutunur [7-8].

Hidrojen sülfür (H_2S) ve amonyak (NH_3) gibi gazlı kirleticilerin uzaklaştırılmasında da yaygın olarak kullanılan gaz yıkayıcılarda solüsyon seçimi kimyasal reaksiyon oranını belirleme açısından önemli bir faktördür. Fiziksel giderim prosesinde bazik yapıdaki kirleticiler asidik solüsyonlar ile giderilebildiği gibi, asidik yapıdaki kirleticiler de bazik solüsyonlar yardımıyla giderilebilmektedir. Ticari gazlaştırma tesislerinde kirleticilerin giderimi için sulu metildietanolamin (MDEA)'e dayalı kimyasal giderim yöntemi ve dimetil eter, polietilen glikol karışımlarının kullanıldığı fiziksel giderim kaynaklı Selexol prosesleri halen kullanılmaktadır [2,13-20].



Şekil 2.4. Gaz yıkayıcı sistemlerinde kirli gaz-sıvı teması ve nem tutumu

Şekil 2.4'te kirli gazın sıvı ile temasını ve daha sonra gaz içerisindeki nemin alınmasını göstermektedir. (1) nolu bölgede kirli gaz ile sıvı temas eder ve absorblama işlemi gerçekleşir. Kirli gazın sıvı ile temasından sonra elde edilen temiz gazın neminin alınması gerekmektedir. Bu yüzden (2) nolu bölgede gaz bir nem tutucu içerisinde geçirilmektedir.

Gaz yıkayıcılarda fiziksel kaynaklı prosesler için kullanılan alkalin hipoklorit, hidrojen peroksit veya kostik çözeltileri ekonomik alternatif solüsyonlardır ve giderim verimi bakımından güzel sonuçlar vermektedir. Yıkayıcı sıvı olarak kullanılan sodyum hidroksit (NaOH) çok efektif bir çözelti olup; karbondioksit (CO₂) ve hidrojen sülfür (H₂S) gideriminde rejenere edilemeyen bir absorbandır. Proseste kullanıldıktan sonra atık kostik gerekli kalite kontrol işlemleri sonucu kağıt sanayinde kullanılabilir [2,9,14-15,21-28].

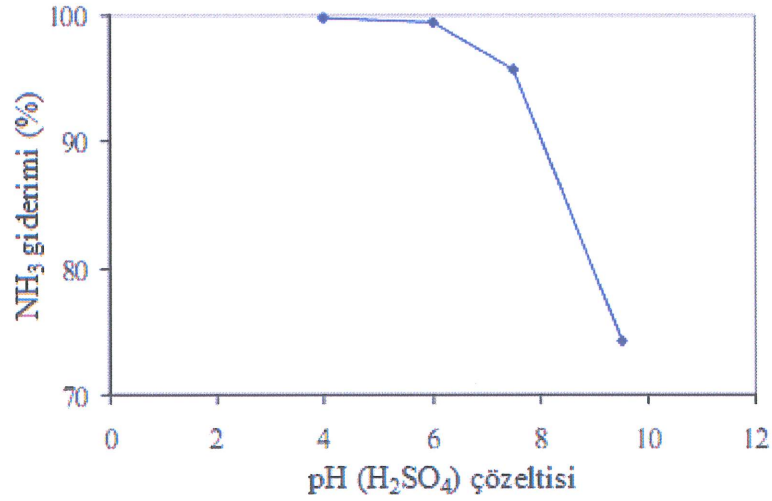
Hidrojen sülfür gideriminde aşağıda verilen (2.1) nolu reaksiyon minimum sodyum hidroksit (NaOH) kullanımını sağlamasından dolayı ve suda çözünebilir ürün oluşturduğu için tercih edilen reaksiyondur. Bunun yanında, ikinci reaksiyon da yan reaksiyon olarak gerçekleşmektedir. Reaksiyon (2.2) sonunda hidrojen sülfürün giderilmesine rağmen sistemde iki kat sodyum hidroksit solüsyonunun tüketilmesi ve oluşan ürünün sudaki çözünürlüğünün düşük olmasından (%10) dolayı bu reaksiyon tercih edilmemektedir [9,14,28-29].



Hidrojen sülfür giderimine benzer şekilde aynı tasarıma sahip ilave bir gaz yıkayıcı sistemi desteğiyle kömür gazından amonyak giderimi de yapılabilir. Amonyakın saf su içerisinde çözünürlüğünün yüksek olmasına rağmen, sodyum hipoklorit (NaOCl) veya sülfürik asit (H₂SO₄) solüsyonları da yaygın olarak kullanılmaktadır. Amonyakın giderildiği gaz yıkayıcılarda yan ürün olarak ticari bir değere sahip olan sıvı amonyum sulfat elde edilmektedir [30-36].

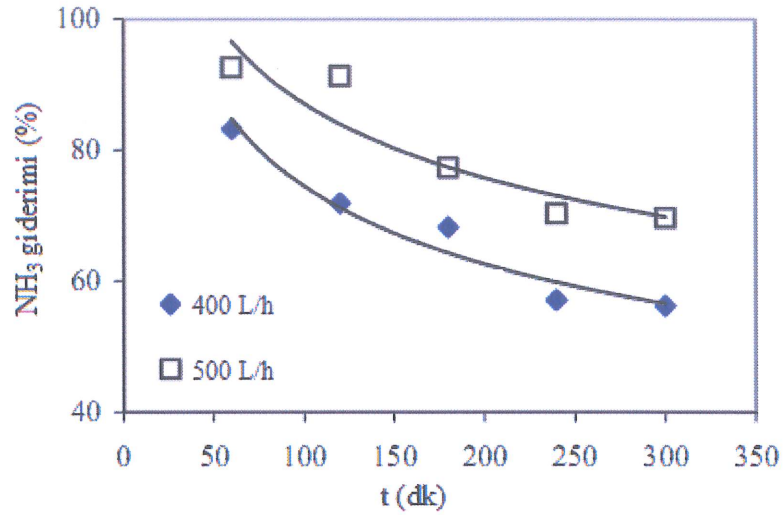


Amonyak giderimini ifade eden (2.3) nolu reaksiyonda 1 mol sülfürik asit (H₂SO₄) çözeltisi ile 2 mol amonyak giderimi sağlanabilmektedir. Gaz yıkayıcı ajanı olarak seyreltik sülfürik asit (H₂SO₄) çözeltisi kullanılarak yapılan amonyak gideriminde, giderim oranı çözeltinin pH değerine bağlıdır [36].



Şekil 2.5. Asidik çözeltinin pH değerinin artmasının amonyak gideriminde etkisi [35]

Amonyak bazik bir kirletici gaz olduğundan sülfürik asit (H₂SO₄) gibi asidik çözeltiler ile giderimi sağlanabilmektedir. Şekil 2.5'de amonyak gideriminde sülfürik asit (H₂SO₄) pH değerinin etkisi belirtilmektedir. Şekilde pH değeri 7'den yüksek olduğunda bazik durum sergilendiğinden asidik bir çözelti olan sülfürik asit (H₂SO₄) giderek bazik bölüme geçmektedir. Bu durumda asidik bir çözelti ile absorblanması gereken amonyakın giderilme verimi sülfürik asitin (H₂SO₄) pH değerinin artmasıyla azalmaktadır [36].



Şekil 2.6. Amonyak gideriminde su debisinin zamana göre etkisi [36]

Sülfürik asit çözeltisi ile optimum şartlarda ($\text{pH} < 4$) %100'lere varan amonyak giderimi sağlanabilirken, bu değer su kullanımı ile Şekil 2.6'da da görüldüğü gibi sıvı debisine bağlı olarak %90-95 arasında değişmektedir [36].

Gaz yıkayıcılarda giderim veriminin iyileştirilmesi için yıkayıcı akışkanın seçimi kadar tasarım da önemli bir rol oynamaktadır. Gaz ve sıvı reaksiyonunun daha efektif olması açısından yapısal dolgu malzemeleri içeren çoklu absorpsiyon kolonları kullanılmaktadır. Bazik solüsyonların kullanıldığı hidrojen sülfür (H_2S) gideriminde ticari yapısal dolgu malzemelerinin yüksek verim sağlaması, gaz ve sıvı fazları arasında geniş bir temas alanı oluşturmasına ve kalma süresini artırmasına dayalıdır. Bununla birlikte yapısal dolgu malzemelerin birim hacim başına fazla maliyet içermesi olumsuz bir etki teşkil etmektedir. Tasarımı iyi yapıldığı takdirde statik mikserler, yatırım maliyetinin ekonomik ve tıkanmalara karşı dayanıklı olması bakımından uygun olabilmektedir ancak yapısal dolgu malzemelerindeki kadar yüksek kütle transfer performansı elde edilemeyebilir. Bu yüzden statik mikserlerin tasarımı geniş temas yüzey alanı sağlamak ve kütle transfer oranlarını geliştirmek açısından önemlidir [1,13,26,37-46].

Yapısal dolgulu gaz yıkayıcıların temel tasarım parametreleri, hidrodinamik akış karakteristiği, dolgu malzemesinin geometrisi, kalma süresi, sıvı-gaz oranı, sıvının pH 'ı ve reaktivitesi olarak sıralanabilir. Yatırım ve işletme maliyetlerinin azaltılması

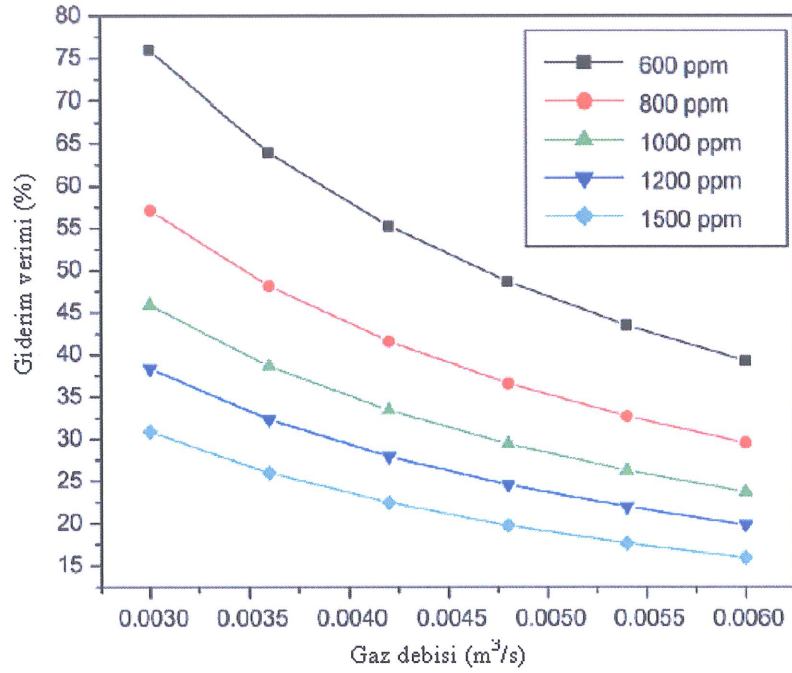
bakımından gaz yıkayıcıların tasarımında bu parametreler göz önünde bulundurulmalıdır [47-49].

Tasarım çalışmaları ve ticari uygulamalar bakımından yapısal dolgular üzerine araştırmalar oldukça geniş bir yer kaplamaktadır. Buna karşılık gazlı kirleticilerin giderilmesinde statik mikserler ile dolgu malzemelerin performans karşılaştırmasına yönelik çalışmalar sınırlı sayıdadır. Karışım oluşturma yeteneğinin yüksek olması nedeniyle statik mikserler mükemmel bir sıvı-gaz teması sağlamaktadır [49-53]. Yüksek verimle kirletici gideriminin sağlanabilmesi için bir gaz yıkayıcı tasarımında aşağıda belirtilen faktörler göz önünde bulundurulmaktadır:

- Gaz ve sıvı arasında yeterli yüzey temas alanının sağlanması,
- İyi bir sıvı ve gaz karışımının oluşturulması,
- Sıvı ve gaz arasında yeterli temas süresinin sağlanması.

Gaz yıkayıcıları ile ilgili yapılmış araştırmalarda genellikle sistem performansı ve verimi üzerine odaklanılmıştır. Bu yüzden, tez çalışmaları esnasında gaz yıkayıcılarda kirletici giderim verimini etkileyen faktörler incelenmiştir.

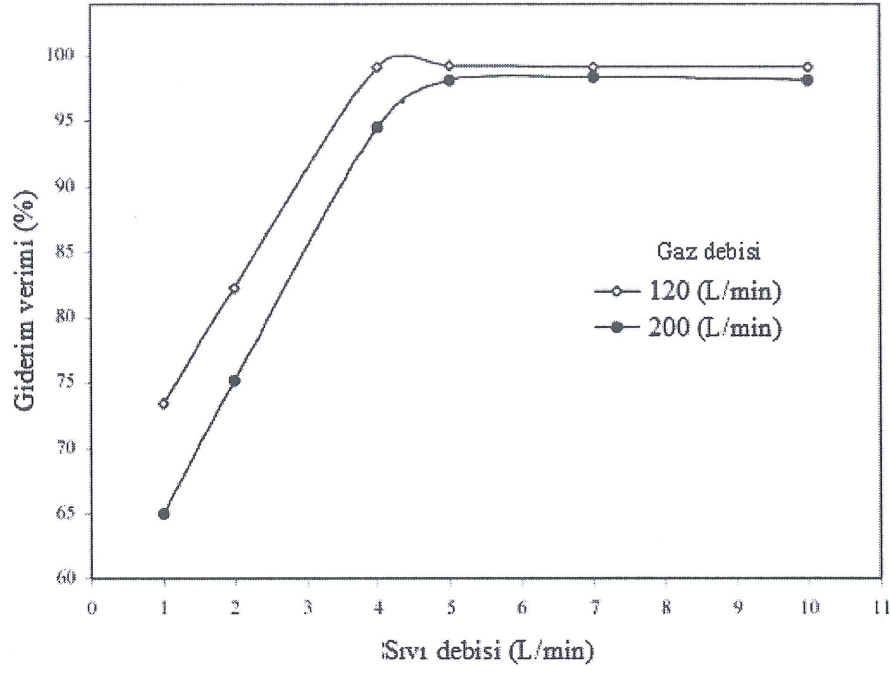
Gaz debisinin artmasıyla birim zaman içerisindeki kirli gaz miktarı da artmakta ve ıslak bölgedeki kalma zamanı azalmaktadır. Gaz debisinin ve giriş gazı konsantrasyonunun artmasıyla giderim verimi azalırken yıkayıcı solüsyon debisinin artmasıyla verimde artış gözlenmektedir. Bu durum, sıvı-gaz oranının artmasıyla daha fazla miktarda kirletici giderimi sağlanabileceğini göstermektedir. Buna karşılık sıvı damlacık boyutunun oldukça küçük olması ve sıvı-gaz oranının yüksek olması temizlenmiş gaz içerisinde küçük damlacıkların giderilmesini zorlaştırabilmektedir [1,9,13-17,37,46,55].



Şekil 2.7. Gaz debisinin giderim verimi üzerindeki etkisi [56]

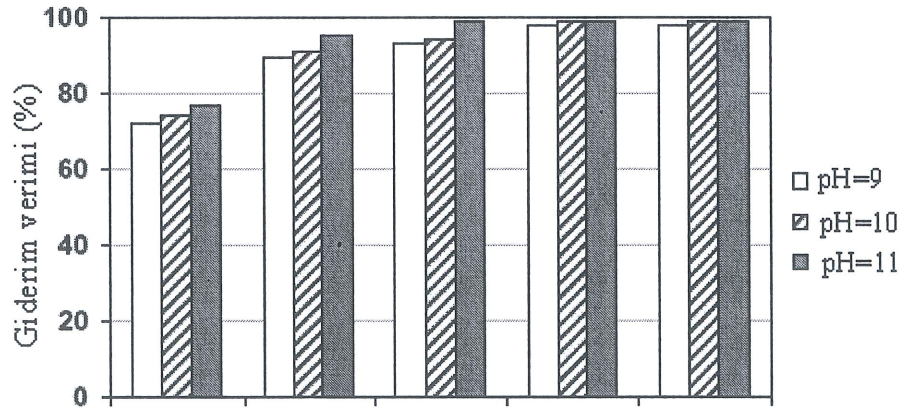
Şekil 2.7’de Sarkar ve arkadaşlarının baca gazlarındaki sülfür dioksitin (SO₂) giderilmesi için gaz yıkayıcı ile yaptıkları bir çalışmada gaz debisinin ve kirli gaz konsantrasyonunun artması sonucu SO₂ giderim verimindeki değişim gösterilmektedir. Şekilde gaz debisinin artmasıyla giderim veriminde azalma meydana geldiği belirtilmektedir. Ayrıca kirli gazın konsantrasyonu arttıkça giderim veriminde azalma olmuştur. Gaz debisinin 0,0030 m³/s olduğu durumda 600 ppm kirli gazın giderimi %75 civarında sağlandığı görülürken aynı gaz debisinde 1500 ppm kirli gazın giderimi için giderim değeri yaklaşık %30’dur [56].

Şekil 2.8’de Moussavi ve arkadaşlarının dolgulu bir gaz yıkayıcı sisteminde hidrojen peroksit (H₂O₂) kullanarak yapmış oldukları hidrojen sülfür (H₂S) giderim çalışmalarında sıvı debisi artışının verim üzerindeki etkisi görülmektedir. Şekilde de görüldüğü üzere sıvı debisi arttıkça kirletici gazın giderim veriminde de artış olmaktadır. Bununla birlikte gaz debisinin 120 (L/dk) olduğu durumda elde edilen giderim verimi gaz debisinin 200 (L/dk) olduğu durumda elde edilen giderim veriminden yüksek olduğu şekilde belirtilmektedir [1].



Şekil 2.8. Yıkayıcı sıvı debisinin giderim verimi üzerindeki etkisi [1]

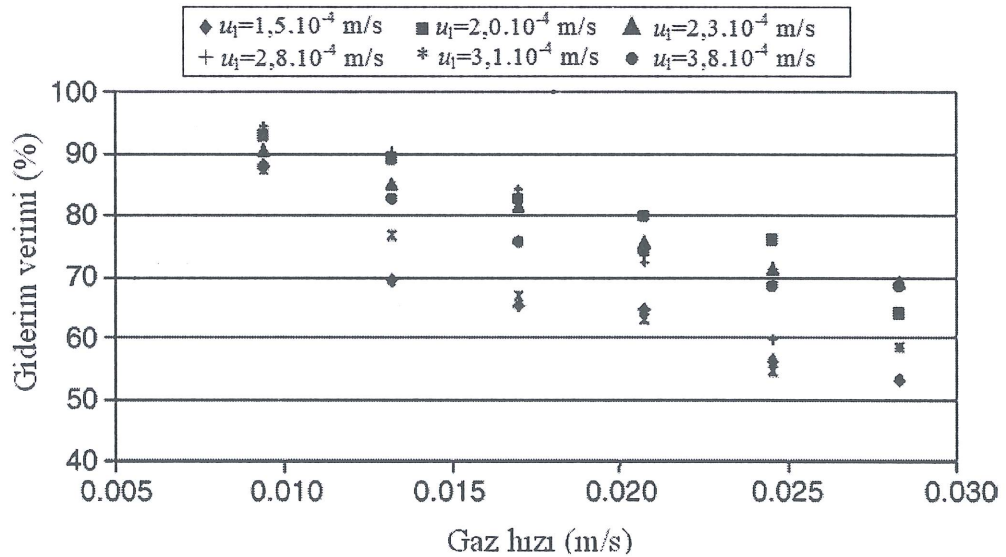
Gaz yıkayıcılarda giderim verimini etkileyen parametrelerden biri de yıkayıcı sıvı olarak kullanılan solüsyonun pH değeridir. Gazlı kirleticilerin gideriminde pH değerinin optimum bir noktada tutulmasına dikkat edilmelidir. Hidrojen sülfür (H_2S) asidik bir kirleticidir ve giderilmesi için Şekil 2.5'te de belirtilen amonyağın giderilmesinden farklı olarak yıkayıcı sıvı olarak bazik bir çözelti kullanılmalıdır. Dolayısıyla, yıkayıcı sıvının bazik bir çözelti olması durumunda pH değerinin yükseltilmesi kimyasal reaksiyon sonucu kirleticilerin giderimini artırmaktadır [13-15,25-27,56-62].



Şekil 2.9. Bazik çözeltinin pH değerinin artmasının giderim verimine etkisi [13]

Şekil 2.9’da Couvert ve arkadaşlarının asidik bir kirletici olan hidrojen sülfür (H_2S) giderimi için gaz yıkayıcı sistemi ile yaptıkları çalışmada kullanılmış olan çözeltinin pH değerinin artırılmasıyla giderim verimindeki etki belirtilmektedir. Yaptıkları incelemede kullandıkları sıvı bazik bir çözelti (sodyum hidroksit) olmasından dolayı çözeltinin pH değeri arttıkça şekilde de görüldüğü gibi giderim veriminde artış sağlanmıştır [13]. Giderim verimindeki artış durumu Moussavi ve arkadaşlarının dolgulu kolonlu gaz yıkayıcıda hidrojen sülfür (H_2S) giderimi için kullandıkları bazik bir çözelti olan hidrojen peroksitin pH değerinin artırılmasıyla da görülmüştür. Çözeltinin pH değeri 7’den 10’a artırıldığında, giderim verimi %20’den %99’a yükselmiştir. Aynı çalışmada çözeltinin pH değerinin daha fazla artırılması verimde herhangi bir değişiklik göstermemiştir [1].

Gazın debisinin artırılmasından dolayı kolon içerisindeki hızın artması yıkayıcı akışkan damlacıklarının sürüklenmesine veya kalma sürelerinin artarak taşma meydana gelmesine neden olabilmektedir. Buna karşılık, bazı deneysel çalışmalarda gaz hızının artmasıyla kütle transfer katsayısının arttığı ve bunun neticesinde giderim veriminin olumlu yönde etkilendiği görülmüştür [1,13,17,41,63-65].



Şekil 2.10. Yapısal dolgu malzemesine sahip bir gaz yıkayıcıda gaz hızının artmasıyla giderim veriminde azalma meydana gelmesi [2]

Şekil 2.10’de Turpin ve arkadaşlarının hidrojen sülfür giderimi çalışmalarında püskürtmeli bir gaz yıkayıcı sisteminde gaz ve sıvı hızının giderim verimine etkisi verilmektedir. Gaz hızının artmasıyla, gazın sıvı ile temas süresi azaldığından

giderim veriminde azalma meydana gelmiştir. Sıvı debisinin artırılması ise giderim veriminde olumlu bir sonuç göstermiştir çünkü sıvı damlacıklarının artmasıyla daha fazla miktarda kirli gaz giderimi olmaktadır [2].

Yıkayıcı sistemlerde sıvı debisi sabit tutulduğunda gaz hızının artırılması sıvı-gaz oranını azaltmaktadır. Dolayısıyla yıkayıcı sıvının ve kirli gazın birbirine temas etme süresi yetersiz kalmaktadır. Kütle dengesine göre gaz fazı daha fazla olduğundan sınırlı miktardaki sıvı ile giderim veriminde azalma meydana gelmektedir [2,16,35,43,66].

2.2. Gaz Yıkayıcı Türleri

Gaz yıkayıcı sistemleri, farklı tasarımları bakımından gaz fazlı, sıvı fazlı, gaz ve sıvı fazlı olarak üçe ayrılmaktadır. Gaz fazlı olanlara venturi, plakalı, orifis gaz yıkayıcılar örnek verilebilir. Püskürtmeli ve dolgulu gaz yıkayıcıları ise sıvı fazlı yıkayıcılar sınıfına girmektedir. Siklonik ve dinamik gaz yıkayıcıları, gaz ve sıvı fazlı gaz yıkayıcıları grubu içerisindedir [7].

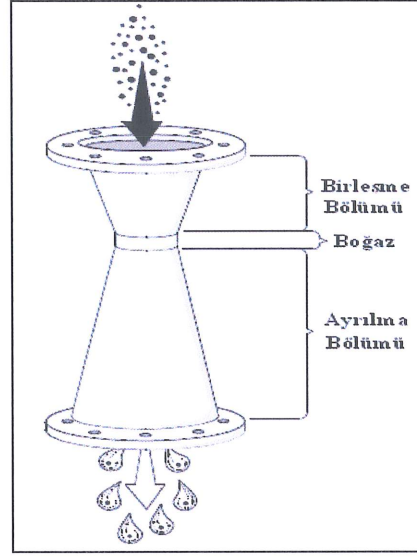
Gaz fazlı yıkayıcılarda kirli gaz akımı, sıvı içerisinden geçerken parçalamalar yaparak küçük damlacıklar oluşturmaktadır. Sıvının parçalanarak daha küçük damlacıkların oluşturulması partikül ve gazlı kirleticilerin tutulma oranını artırmaktadır [9]. Sıvı fazlı yıkayıcılarda ise sıvı-gaz teması, özel tasarlanmış nozullar ile kolon içerisine yıkayıcı çözeltinin yüksek basınçla gönderilmesiyle sağlanmaktadır [7].

2.2.1. Venturi gaz yıkayıcıları

Venturi gaz yıkayıcılar hem partikül gideriminde hem de gazlı kirleticilerin gideriminde kullanılabilir ancak gazlı kirleticilerin gideriminden daha çok partikül gideriminde etkindir [7,67-68].

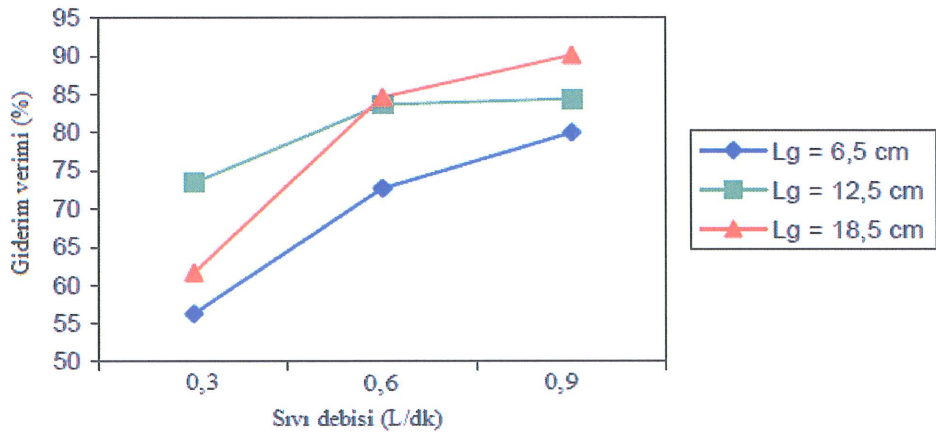
Şekil 2.11'de tipik venturi gaz yıkayıcının bölümleri gösterilmektedir. Bu tür gaz yıkayıcıları tasarımları bakımından birleşme bölümü, boğaz bölümü ve ayrılma bölümü olarak üç bölümden oluşur. Birleşme bölümündeki geniş çap daralarak bir koni parçasını sergilemekte olup; ayrılma bölümü bu geometrik tasarımın asimetric

kısmını oluşturmaktadır. İki koninin birleşme noktası boğaz bölümü olarak tanımlanmaktadır [7].



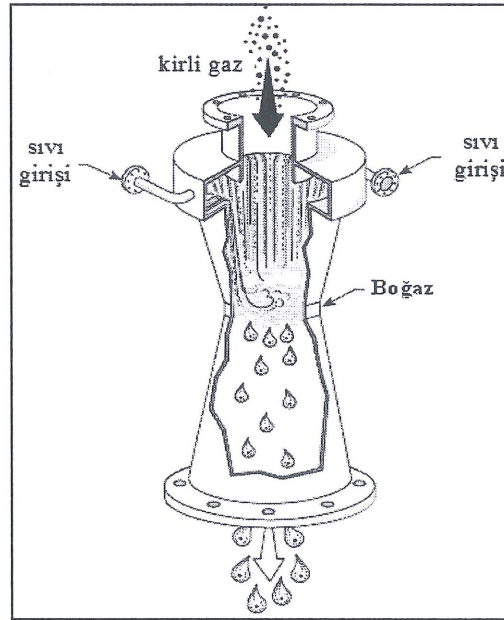
Şekil 2.11. Venturi gaz yıkayıcı konfigürasyonu [7]

Sistemde kirli gaz birleşme bölümünden girmekte ve boğaz noktasında daralma meydana geldiğinden kirli gazın hızı artmaktadır. Şekil 2.13'te verilen sistemin dışındaki bazı tasarımlarda sıvı tedarigi venturi gaz yıkayıcının boğaz noktasından veya birleşme bölümünün giriş kısmından sağlanabilmektedir. Kirli gazın boğaz noktasında daha yüksek hızda ilerlemesiyle turbulanslı bir karışım meydana gelmektedir ve sıvı damlacıkları parçalanarak daha küçük boyutlara ayrılmaktadır. Böylece daha küçük damlacıkların oluşturulması, daha fazla miktarda kirletici giderimi sağlamaktadır [69-70].



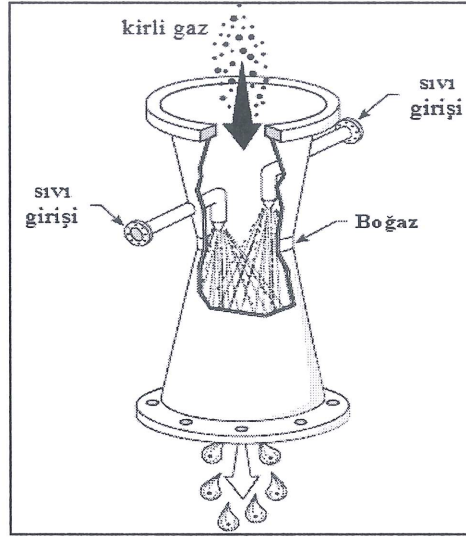
Şekil 2.12. Bir venturi gaz yıkayıcıda boğaz uzunluğunun giderim verimine etkisi [71]

Şekil 2.12’de venturi gaz yıkayıcısının boğaz bölümüne ait uzunluğun kirletici giderim verimi üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü üzere sıvı debisinin 0,6 (L/dk) olduğu durumda boğaz kısmının daha uzun olması giderim verimi bakımından daha olumlu sonuç vermiştir. Venturi gaz yıkayıcılarda boğaz kısmında hız artmaktadır. Sıvı debisinin 0,3 (L/dk) olduğu durumda ise yeterli hız sağlanamamış ve giderim verimi azalmıştır. Bu durumda boğaz uzunluğu olumlu etki gösterememiştir.



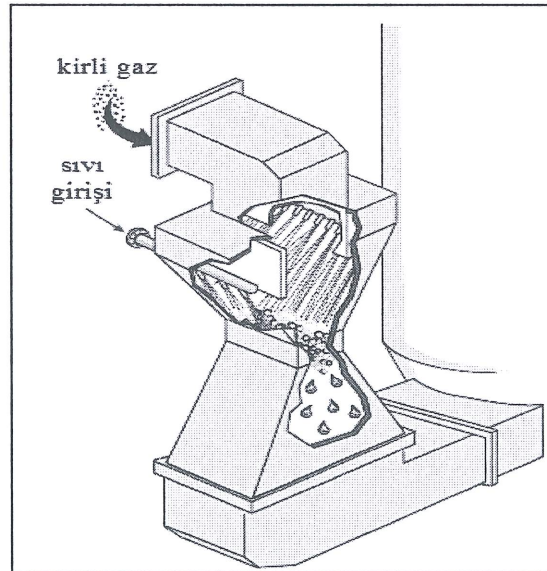
Şekil 2.13. Sıvının birleşme bölümünden verildiği venturi gaz yıkayıcı [7]

Venturi gaz yıkayıcıları çeşitli türde tasarlanabilmektedir. Bu tür gaz yıkayıcılarda sıvı giriş noktası farklı bölgelerde olabilmektedir. Şekil 2.13’te yıkayıcı sıvının birleşme bölümünün giriş kısmından sağlandığı bir venturi gaz yıkayıcı görülmektedir. Bu tür sistemde sıvı, boğaz bölümünün üst kısmından verildiği için boğaz bölümünün tamamı sıvı ile kaplanmaktadır. Bu durumda yıkayıcı sistem kirleticileri tutmak için daha efektif hale gelmektedir. Ayrıca kirli gaz içerisinde bulunan partiküller, boğaz bölümünün tüm duvarları sıvı ile kaplı olduğundan, bu bölümden geçerken daha az derecede aşınma meydana getirmektedir [7,67].



Şekil 2.14. Sıvının boğaz bölümünden sağlandığı venturi gaz yıkayıcı [7]

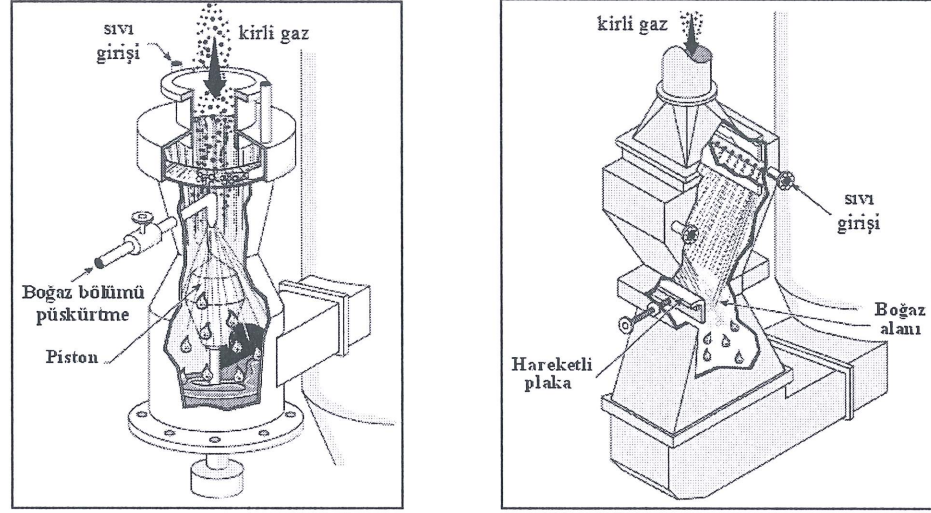
Şekil 2.14’de sıvının boğaz bölümünden sağlandığı venturi gaz yıkayıcı türü verilmektedir. Boğaz bölümünün hemen üzerinden verilmesinden dolayı, sıvı boğaz yüzeyini tamamen kaplamamaktadır. Düşük sıcaklıktaki gaz akımları için bu tür venturi gaz yıkayıcıları daha çok tercih edilmektedir [7,69].



Şekil 2.15. Dikdörtgen boğazlı püskürtmeli venturi gaz yıkayıcı [67]

Dairesel boğaz bölümüne sahip venturi yıkayıcı sistemlerinde gaz debisi yaklaşık 90.000 m³/h olabilir. Bu değerden daha yüksek gaz akışlarında şaşırtma plakaları kullanılmadıkça düzgün bir akışkan dağılımı sağlamak zordur. Yüksek debili gaz

akışları için Şekil 2.15'te görüldüğü gibi boğaz kısmı dikdörtgen, uzun ve dar olan venturi gaz yıkayıcılar geliştirilmiştir.



Şekil 2.16. Boğaz bölümü ayarlanabilen venturi gaz yıkayıcılar [67]

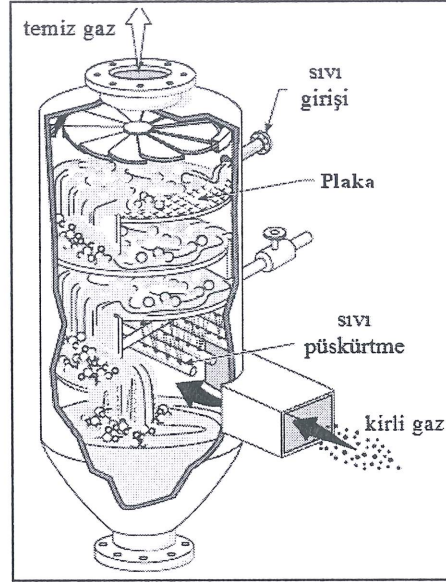
Venturi gaz yıkayıcılarında etkili bir nokta olan boğaz bölümü, farklı tasarımlar dahilinde istenilen düzeyde ayarlanabilmektedir. Boğaz kesit alanı, Şekil 2.16'da görüldüğü gibi pistonun aşağıya ve yukarıya doğru hareketiyle ya da hareketli plakalar yardımıyla ayarlanabilmektedir [7,72-73].

2.2.2. Plakalı gaz yıkayıcıları

Bu tür gaz yıkayıcıları dikey bir kolon içerisine yatay olarak yerleştirilmiş plakalardan oluşmaktadır. Şekil 2.17'de görüldüğü gibi, kirli gaz kolonun alt tarafından giriş yapmakta olup; plakaların üzerinde bulunan boşluklardan geçerek yukarıya doğru hareket etmektedir [7].

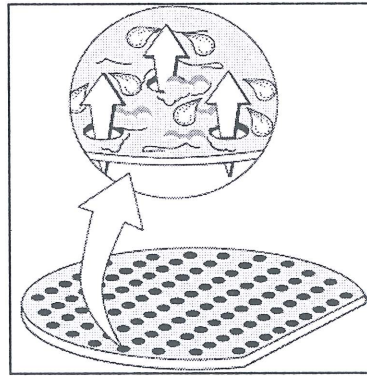
Yıkayıcı sıvı plakalı gaz yıkayıcılarda kolonun üst kısmından püskürtülmekte ve plakaların üzerinden aşağıya doğru yol almaktadır. Böylece her bir plakada sıvı-gaz teması geniş bir alanda sağlanarak kirleticilerin tutulması sağlanır. Plakalı gaz yıkayıcılar, gazlı kirleticilerin giderilmesinde oldukça efektif olup; aynı anda partikül giderimi için de kullanılabilir [7,74].

Plakalı gaz yıkayıcılarda absorpsiyona yardımcı olan plakalar farklı tasarlanabilir. Delikli plakalar, çarpmalı tip plakalar, kovanlı tip plakalar ve valfli plakalar bu tür gaz yıkayıcılarda yaygın olarak kullanılan plaka çeşitleridir.



Şekil 2.17. Plakalı gaz yıkayıcı [75]

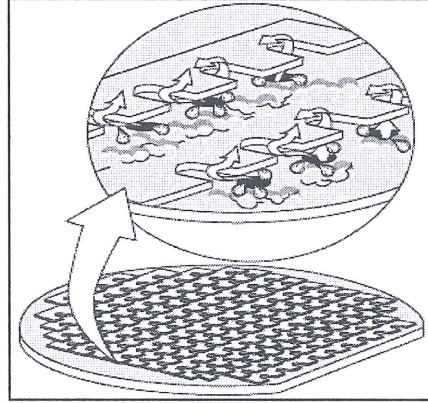
Delikli plakalarda, boşluk oranı yaklaşık $1800-1900 \text{ delik/m}^2$ 'dir. Absorbsiyon kolonu içerisinde yukarıya doğru hareket eden kirli gaz bu küçük deliklerden geçerek kolonun üst kısmından püskürtülen yıkayıcı sıvı ile plakalar üzerinde temas etmektedir.



Şekil 2.18. Delikli plaka [76]

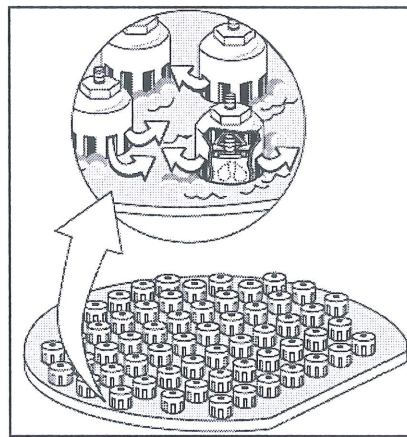
Şekil 2.18'de plakalı gaz yıkayıcı sistemlerinde kullanılan delikli bir plaka gösterilmektedir. Gaz akımı, püskürtülen sıvıyı parçalayarak $10-100 \mu\text{m}$ çapında damlacıklar oluşturmaktadır. Damlacıkların daha fazla olması absorpsiyonu kolaylaştırarak kirleticilerin tutulmasını sağlamaktadır. Plaka üzerindeki deliklerin boyutu azaldıkça partikül tutma verimi artmaktadır. Delik boyutlarının çok küçük olması gaz hızının artmasına ve daha küçük damlacıkların üretilmesine neden olmaktadır [7]

Çarpmalı tip plakalarda tasarım bakımından delikli plakalardan farklı olarak her bir deliğin üzerine belirli yükseklikte tabakalar yerleştirilmiştir. Şekil 2.19’de plakalı gaz yıkayıcı sistemlerinde kullanılan çarpmalı tip bir plaka gösterilmektedir. Gaz delik içerisinden geçerken bu tabakalara çarpmakta ve plaka üzerinden akmakta olan yıkayıcı sıvıyı parçalayarak küçük damlacıklar oluşturmaktadır. Böylece sıvı ve gaz karışımı için ek bir temas alanı sağlanarak tutma oranı artırılmaktadır [76].



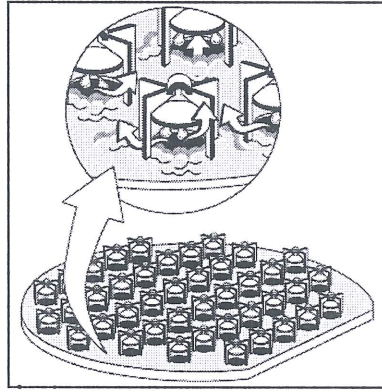
Şekil 2.19. Çarpmalı tip plaka [76]

Kovanlı tip plakalarda kirli gaz, deliklerin üzerinde bulunan ve oluklardan oluşan kovan içerisine girerek sıvı ile iyi bir karışım sağlamaktadır. Şekil 2.20’de kovanlı tip bir gaz yıkayıcı plakası gösterilmektedir. Bu tür plakalar delikli ve çarpmalı tip plakalara göre kolon içerisinde daha uzun bir kalma süresi sağlayarak kirletici tutma verimini artırmaktadır. Kompleks yapılarından dolayı kovanlı tip plakalarda tıkanma ve korozyon problemleri vardır [7].



Şekil 2.20. Kovanlı tip plaka [7]

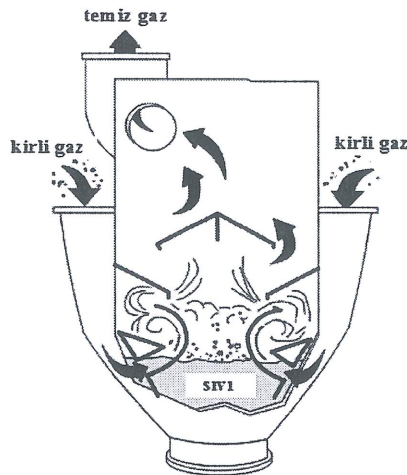
Valfli plakalarda her bir deliğin üzerinde dikey yönde hareket kabiliyeti olan metal tabakalar bulunmaktadır. Bu metal tabakalar birer valf gibi davranarak kirli gazın geçmesi esnasında plaka deliklerinin belirli seviyede açılmasını sağlar. Şekil 2.21’de valfli tip bir gaz yıkayıcı plakası gösterilmektedir. Şekilde de görüldüğü üzere metal tabakaların dikey yöndeki olan bu hareketi plakaya bağlı ayaklar ile sınırlandırılmıştır. Bu tip plakalar özellikle çok küçük partiküllerin tutulması için uygundur. Büyük partiküller bu tür plakalarda tıkanmalara yol açmaktadır [7].



Şekil 2.21. Valfli tip plaka [7]

2.2.3. Orifis gaz yıkayıcıları

Orifis gaz yıkayıcıları genellikle partiküllerin gideriminde kullanılmakta olup; kirli gaz dar bir delikten sıvı ile dolu hazneye gönderilmektedir. Gaz içerisinde bulunan büyük partiküller bu haznenin yüzeyine çarparak toplanmaktadır. Küçük partiküller ise, sıvı üzerinden yüksek hızla geçen gazın meydana getirdiği damlacıklara çarparak tutulmaktadır [7].



Şekil 2.22. Orifis gaz yıkayıcı [76]

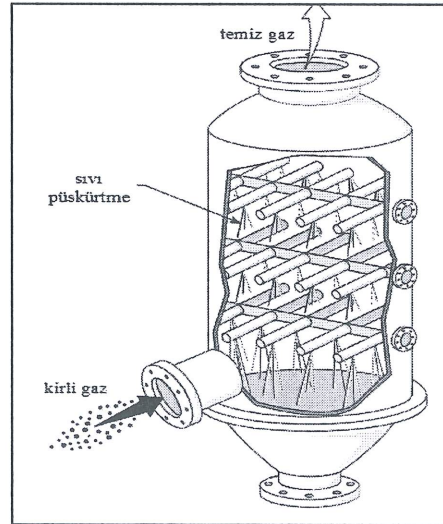
Orifis gaz yıkayıcılarda bütün partiküllerin giderilmesi sıvının seviyesine bağlıdır. Sıvı seviyesi gaz hızını belirlemektedir. Sıvı seviyesinin az olması, orifis açıklığının geniş olmasına neden olacağından gaz hızı azalmaktadır. Gaz hızının azalmasıyla damlacık üretimi de azalacağından daha az partikül tutulması gerçekleşmektedir. Şekil 2.22’de bir orifis gaz yıkayıcı gösterilmektedir [76].

Orifis gaz yıkayıcılarda gaz hızının yaklaşık 15 m/s olması çok sayıda damlacığın oluşmasını sağlamaktadır. Gaz ve sıvı damlacıklarının turbulanslı karışımını sağlamak için şaşırtma plakaları eklenebilmektedir.

Orifis gaz yıkayıcıları nadiren de olsa gazlı kirleticilerin giderimi için kullanılmaktadır. Hem iyi bir gaz-sıvı karışımının sağlanması hem de daha geniş bir temas alanı oluşturmasından dolayı bu sistemler, sıvı içerisinde çözülebilen gazlı kirleticilerin giderimi için efektif olabilmektedir.

2.2.4. Püskürtmeli gaz yıkayıcıları

Püskürtmeli gaz yıkayıcılar, tasarım bakımından çok basit bir yapıda olup; çalışma prensibi boş bir silindirik kolon içerisine nozullar vasıtasıyla yıkayıcı sıvının püskürtülmesine dayalıdır. Şekil 2.23’te karşıt akışlı püskürtmeli bir gaz yıkayıcı görülmektedir Diğer gaz yıkayıcı türlerinde olduğu gibi kirli gaz kolonun alt kısmından giriş yaparak yukarı doğru hareket etmektedir ve kolonun üst kısmındaki bir veya daha fazla noktadan aşağıya doğru yıkayıcı sıvı püskürtülmektedir. [2,7].



Şekil 2.23. Karşıt akışlı püskürtmeli gaz yıkayıcı [7]

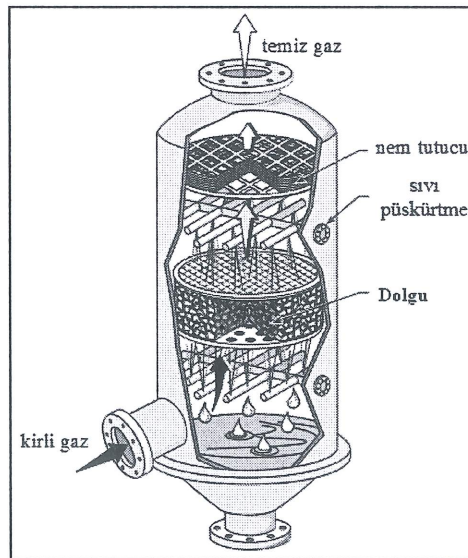
Püskürtmeli gaz yıkayıcıları eş yönlü akış konfigürasyonuna da sahip olabilir. Bu durumda, gazın ve akışkanın hareketi aynı yönde olduğundan gaz hızı karşıt akışlı konfigürasyondan daha yüksektir.

Küçük partiküller için püskürtmeli gaz yıkayıcıların tutma verimleri yüksek değildir. 10–25 μm boyutundaki partiküllerin tutulması için daha elverişli bir durum sergilemektedir. Kolon içerisinde yukarıya doğru hareket eden gaz içerisindeki partiküllerin hızı ile sıvı damlacıklarının hızı arasındaki fark yüksek olduğunda tutma verimi artmaktadır. Tutma verimini artırmak için daha fazla damlacığın üretilmesi nozullardaki akışkan basıncının artırılması ile sağlanabilmektedir.

Püskürtmeli gaz yıkayıcıları, gazlı kirleticilerin giderilmesinde de kullanılabilir fakat dolgulu gaz yıkayıcılar kadar efektif değildir. Gazlı kirleticilerin tutma verimi damlacık sayısı ve/veya sıvı-gaz oranı artırılarak iyileştirilebilir ancak bu durumda işletme maliyetleri yükselebilmektedir [2,7].

2.2.5. Dalgulu gaz yıkayıcıları

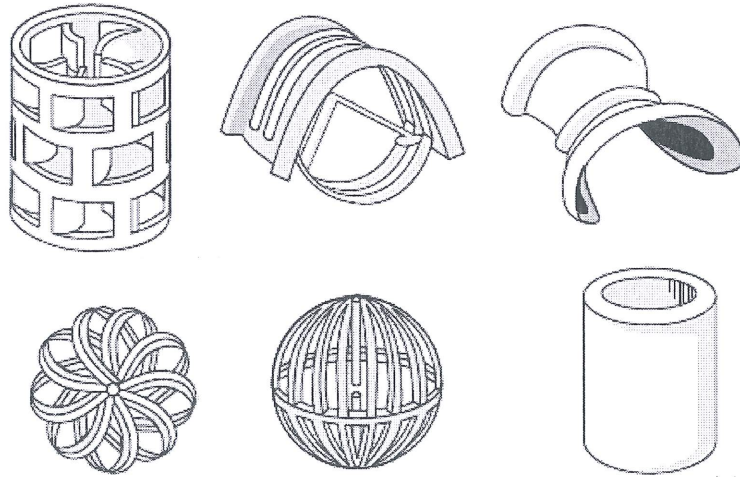
Bu tür gaz yıkayıcıları kolon içerisinde farklı tasarımlarda dolgu malzemelerinin bulunduğu sistemlerdir. Dalgulu gaz yıkayıcı sistemlerinde dolgu malzemeleri yüzey temas alanını ve kalma süresini artırarak sıvı-gaz temasının çok iyi olmasını sağlamak için kullanılmaktadır. [7,13-15].



Şekil 2.24. Karşıt akışlı dolgulu gaz yıkayıcı [7]

Şekil 2.24'te karşıt-akışlı bir dolgulu gaz yıkayıcı görülmektedir. Kirli gaz kolonun alt kısmından giriş yaparak dolgu malzemesinin boşluklarından yukarıya doğru hareket etmektedir. Yıkayıcı sıvı ise kolonun üst kısmından püskürtülerek dolgu malzemesine intikal etmesi sağlanır. Kolon içerisinde dolgu malzemesinin bulunduğu hacimde gaz ve yıkayıcı sıvı homojen bir şekilde karışarak kirleticilerin tutulması sağlanmaktadır [1,17,24,26].

Gaz yıkayıcılarda tüm dolgu malzemeleri, kolonun üst kısmından püskürtülen sıvıya ve kolonun alt kısmından gönderilen kirli gaza karşı bir yüzey oluşturarak kütle transferinin meydana gelmesi için geniş bir temas alanı sağlamaktadır. Şekil 2.25'te proseslerde yaygın olarak kullanılan dolgu malzemeleri gösterilmektedir. Boyutları genel olarak 0.6-10 cm arasında değişmektedir [78-79].



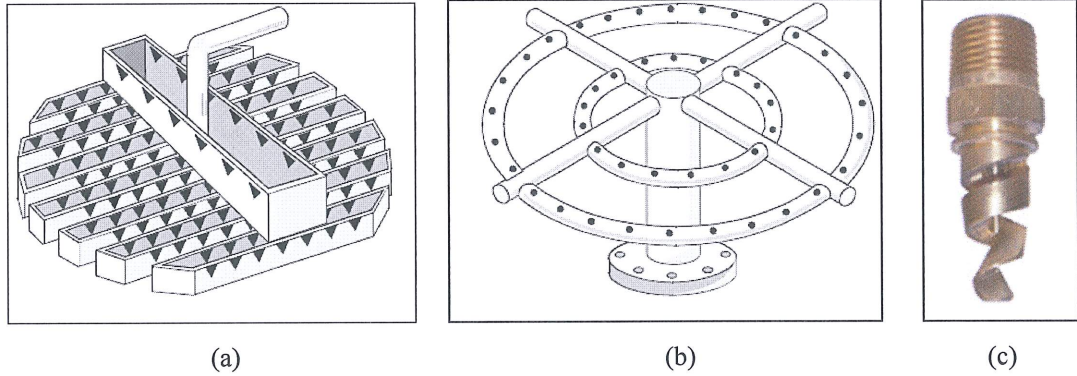
Şekil 2.25. Dolgu malzemesi çeşitleri [76]

Kolon içerisinde kullanılan dolgu malzemelerinin seçiminde, fiyat, basınç kaybı, korozyon dayanımı, geniş temas alanı, boşluk oranı, ağırlık ve esneklik faktörleri göz önünde bulundurulmalıdır [7].

Sıvı-gaz oranının değişkenlik göstermesi gaz yıkayıcının efektif çalışmasını olumsuz etkilemektedir. Sıvı püskürtme oranının veya gaz akış oranının yüksek olması özellikle karşıt akışlı gaz yıkayıcılarda taşmaya neden olabilmektedir. Taşma olayı, yıkayıcı sıvının dolgu malzemesi boyunca süzülmemiş dolgu ceplerinde biriktiği zamanlarda meydana gelmektedir. Bu durum sıvı püskürtme oranının veya kolon boyunca gaz hızının azaltılmasıyla giderilebilmektedir [13,32-33,64].

Dolgu gaz yıkayıcılarda diğer bir konfigürasyon, kirli gazın ve yıkayıcı sıvının kolonun üst kısmından aşağıya doğru verildiği eş yönlü akışlı gaz yıkayıcılardır. Bu konfigürasyon taşma gibi bir problem olmamasından dolayı yüksek sıvı ve gaz oranlarında çalışmasına olanak sağlamaktadır. Her iki akışın da aynı yönde olmasından dolayı sistemde meydana gelen basınç kaybı karşıt akışlı gaz yıkayıcılardaki basınç kaybindan daha düşüktür. Kolon boyunca sıvı ve gaz akımı aşağıya doğru olurken konsantrasyon farklılıkları olmasından dolayı giderim verimi eş yönlü akışlı sistemlerde sınırlıdır. Dolayısıyla uygulama alanları fazla değildir [7,48].

Yıkayıcı sıvının kolon içerisindeki akışını sağlamak amacıyla farklı tasarımlara sahip ekipmanlar kullanılmaktadır. Bunlar, oluklu sıvı dağıtıcı, delikli-tüp sıvı dağıtıcı ve püskürtme nozullarıdır. Şekil 2.26'da yıkayıcı sıvı dağıtıcıların türleri gösterilmektedir.



Şekil 2.26. Yıkayıcı sıvı dağıtıcıları (a) oluklu (b) delikli-tüp (c) nozul [7]

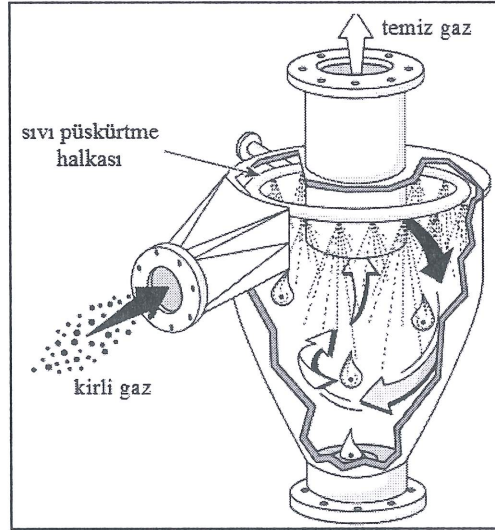
Dolgu gaz yıkayıcılarda sıvının transferinde az sayıda büyük ölçekli nozulların kullanılması çok sayıda küçük ölçekli nozulların kullanılmasından daha iyi bir performans sergilemektedir. Büyük ölçekli nozullarda tıkanma problemi daha az olmaktadır. Buna karşılık küçük ölçekli nozullar, ince damlacıklar üretmeleri sayesinde daha fazla oranda kirleticinin toplanmasını sağlamaktadır [6,57].

Dolgu gaz yıkayıcıları genellikle gazlı kirleticilerin giderilmesinde kullanılmaktadır. Tıkanma problemlerinden dolayı gaz içerisinde yüksek konsantrasyonlu partiküllerin bulunması halinde tercih edilmemektedir [7,80-82].

Kirli gazın sıcaklık dalgalanmalarına karşı dolgulu gaz yıkayıcıları, plakalı gaz yıkayıcılar kadar dayanıklı değildir. Sıcaklık değişimlerinden dolayı kabarma veya çarpılmalar meydana geldiği için dolgu malzemesi ezilebilmekte veya eriyebilmektedir. Buna karşılık dolgulu gaz yıkayıcıların imalatı plakalı gaz yıkayıcılardan daha ekonomiktir.

2.2.6. Siklonik gaz yıkayıcıları

Siklonik gaz yıkayıcılarda kirli gaz kolona teğetsel olarak girmekte ve kolon içerisinde spiral şeklinde bir girdap oluşturarak kolonu terk etmektedir. Bu proses esnasında kolon içerisine yıkayıcı sıvı püskürtülmektedir. Kirli gaz kolon etrafında girdap oluşturarak hareket ederken kirleticiler de sıvı damlacıklarına çarparak tutulmaktadır.

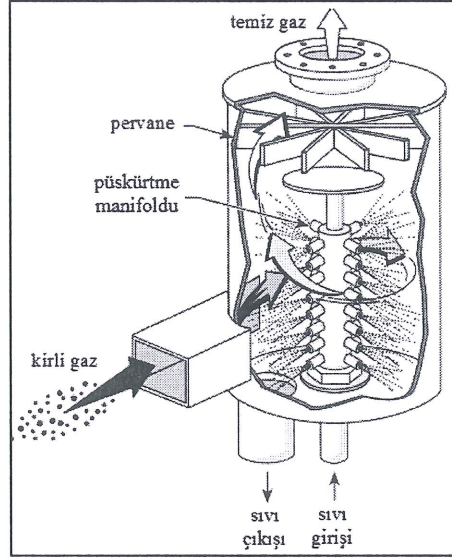


Şekil 2.27. Siklonik gaz yıkayıcı [7]

Şekil 2.27'de siklonik bir gaz yıkayıcı görülmektedir. Bu tür gaz yıkayıcılarda kolonun üst kısmında nozulların bağlı olduğu bir püskürtme halkası bulunmaktadır. Kirli gaz kolonun üst kısmına yakın bir noktadan bu sıvı püskürtme alanına doğru giriş yapmaktadır. Burada kirli gazın önce kolonun alt bölgesine doğru girdap oluşturması ve daha sonra yön değiştirerek temizlenmiş olarak spiral şeklinde üst bölgeye doğru çıkması hedeflenmektedir [7,57].

Şekil 2.28'da siklonik gaz yıkayıcının başka bir türü görülmektedir. Bu sistemde kolonun merkezinde bulunan bir manifold tarafından yıkayıcı akışkan kolon

duvarlarına doğru püskürtülmektedir. Oluşan damlacıklar diğer siklonik gaz yıkayıcıda olduğu gibi kirleticileri tutmaktadır.



Şekil 2.28. Püskürtme manifoldlu siklonik gaz yıkayıcı [76]

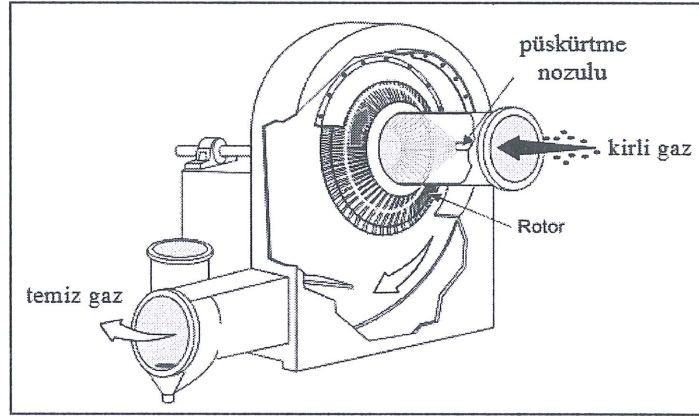
Siklonik gaz yıkayıcıları partikül giderim proseslerinde püskürtmeli gaz yıkayıcılardan daha efektiftir ancak venturi gaz yıkayıcılar kadar verimli değildir. Bu tür gaz yıkayıcılar 5 μm 'den daha büyük partiküller için %90 oranında giderim verimi sağlayabilmektedir. Püskürtmeli gaz yıkayıcılarda kirli gazın hızı 0,6 ila 1,5 m/s arasındayken kolona teğetsel girmesinden dolayı siklonik gaz yıkayıcılarda bu hız 60 m/s ile 180 m/s arasında değişmektedir. Bu değer venturi gaz yıkayıcılarda yaklaşık aynı olmasına rağmen siklonik gaz yıkayıcıları venturi gaz yıkayıcılar kadar efektif değildir çünkü aynı derecede turbulans sağlama kabiliyetine sahip değildirler. Siklonik gaz yıkayıcıları çok küçük boyuta sahip partiküllerin giderilmesinde etkili değildir. Kirli gaz hızının yüksek olması sıvı-gaz temas süresini azaltmasından dolayı gazlı kirleticilerin giderilme verimi azalmaktadır. Bu yüzden siklonik gaz yıkayıcılar bazı gazlı kirleticilerin giderimi için tercih edilmektedir [7].

2.2.7. Dinamik gaz yıkayıcıları

Kolon içerisinde püskürtülen sıvıya veya kirli gaz akımına ilave olarak gaz yıkayıcıları enerji sağlamak amacıyla rotor kullanırlar. Dinamik gaz yıkayıcılar olarak adlandırılan bu sistemlerde rotorun hareketiyle damlacıklar üretilerek

kirleticiler giderilmektedir. Diğer gaz yıkayıcılar ile karşılaştırıldığında daha fazla güç sarfiyatı gerçekleşmektedir.

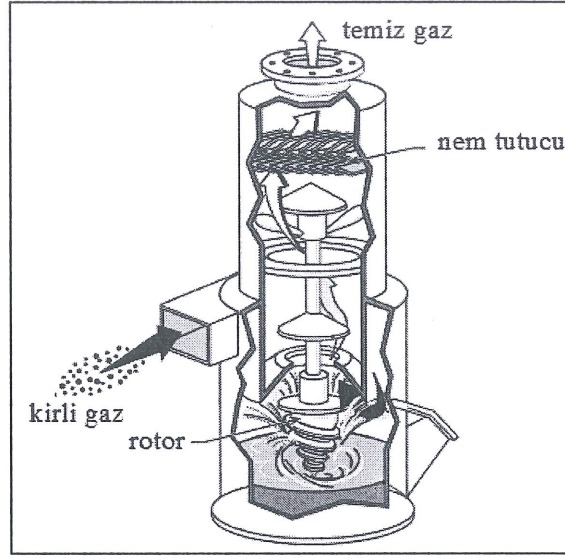
Dinamik gaz yıkayıcıları genellikle iki türde tasarlanmaktadır. Bunlar santrifüj destekli ve endüklenmiş püskürtme destekli sistemlerdir. Şekil 2.29'da santrifüj destekli bir dinamik gaz yıkayıcı görülmektedir. Sistemde yıkayıcı sıvı kirli gaz ile birlikte rotor kanatlarına eş yönlü olarak gönderilmektedir. Başlangıçta bazı gazlı kirleticiler ve partiküller püskürtülen yıkayıcı sıvı üzerinden geçerken giderilmektedir. Rotorun dönen kanatları, yıkayıcı sıvının partikülleri kanatlar üzerinde tutmasını sağlamaktadır [7,83].



Şekil 2.29. Santrifüj destekli dinamik gaz yıkayıcı [76]

Endüklenmiş püskürtme destekli gaz yıkayıcıları sıvı dolu bir hazne içerisinde monte edilmiş bir rotordan oluşmaktadır. Sıvı dolu hazne içerisinde dönme hareketi yapan rotor damlacıklar üretmektedir. Gaz akımının bu damlacıklar üzerine yönlendirilmesiyle partiküller ve gazlı kirleticiler toplanmaktadır.

Dinamik gaz yıkayıcıları 1 μm veya daha büyük boyutlara sahip partiküllerin giderilmesinde yüksek verim sağlamaktadır ancak aynı verimi sağlayan diğer gaz yıkayıcılardan daha fazla enerji sarfettirmektedir. Bu sistemler genellikle gazlı kirleticilerin gideriminde kullanılmaz çünkü gaz ile yıkayıcı sıvı arasındaki temas süresi çok düşüktür. Şekil 2.30'da endüklenmiş püskürtme destekli bir dinamik gaz yıkayıcı görülmektedir.



Şekil 2.30. Endüklenmiş püskürtme destekli dinamik gaz yıkayıcı [7]

Dinamik gaz yıkayıcılara bir enerji desteğinin ilave edilmesi, diğer gaz yıkayıcı sistemlerine oranla daha küçük boyutlara sahip olma imkanı sunmaktadır. Bununla birlikte bu sistemler düşük sıvı-gaz oranlarında çalışabilmektedir. Gazlı kirleticilerin giderim verimlerinin düşük, bakım ve işletme maliyetlerinin yüksek olması dinamik gaz yıkayıcıların dezavantajları arasındadır [83]. Partikül ve gazlı kirleticilerin gideriminde hangi gaz yıkayıcıların daha avantajlı olduğu karşılaştırmalı olarak Tablo 2.3'te ve Tablo 2.4'te belirtilmektedir.

Tablo 2.3. Gaz yıkayıcı sistemlerinde partikül giderim verimleri [7]

Gaz Yıkayıcı	Basınç Düşümü (mbar)	Sıvı/Gaz Oranı (L/m ³)	Giderim Verimi
Venturi	49 - 245	0,4 - 2,7	% 90-99
Plakalı	7 - 15	0,3 - 0,7	> 1 µm için verimli
Orifis	5 - 24	1,3 - 5,3	0,8 - 1 µm için verimli
Püskürtmeli	0,5 - 3	0,07 - 2,7	2 - 8 µm için verimli
Dolgulu	2,4 - 24	0,13 - 2,1	2 µm için verimli
Siklonik	4 - 24	0,3 - 1,3	2 - 3 µm için verimli
Dinamik	10 - 20	0,5 - 0,7	< 1 µm için verimli

Tablo 2.3'te farklı türdeki gaz yıkayıcılarda partikül giderim verimleri özetlenmektedir. Tabloda da görüldüğü üzere venturi gaz yıkayıcılar partikül gideriminde en yüksek verime sahiptir ancak diğer yıkayıcı sistemlerine göre daha fazla basınç düşümü meydana gelmektedir [7].

Tablo 2.4. Gaz yıkayıcı sistemlerinde gazlı kirleticilerin giderim verimleri [7]

Gaz Yıkayıcı	Basınç Düşümü (mbar)	Sıvı/Gaz Oranı (L/m ³)	Giderim Verimi
Venturi	12 - 240	2,7 - 5,3	% 30-60
Plakalı	2 - 19	> 2,5	> % 98
Orifis	5 - 24	0,07 - 0,7	% 15-30
Püskürtmeli	12 - 74	0,07 - 2,7	% 50-90
Dolgulu	2,4 - 24	> 2,5	% 99
Siklonik	4 - 24	0,3 - 1,3	% 15-30
Dinamik	10 - 20	0,5 - 0,7	-

Tablo 2.4'te ise farklı tasarımlara sahip gaz yıkayıcı sistemlerinde gazlı kirleticilerin giderim verimleri verilmektedir. Plakalı ve dolgulu gaz yıkayıcı sistemlerinde gazlı kirleticilerin giderimi diğerlerine göre daha yüksek olup yaklaşık %99 verim sağlanmaktadır [7].

Bu tezde deneysel çalışmalar, hidrojen sülfür (H₂S) ve amonyak (NH₃) gibi kirletici gazların giderimine yönelik olarak gerçekleştirilecektir. Bundan dolayı, Tablo 2.4'teki gazlı kirleticilerin giderimiyle ilgili verilen parametreler göz önüne alındığında, en yüksek giderim verimini dolgulu ve plakalı yıkayıcı sistemleri sağlamaktadır. Tablo 2.4'te de görüldüğü üzere dolgulu yıkayıcı sistemin giderim verimi %99, plakalı yıkayıcı sistemin ise %98 olup her iki sistemin de basınç düşümü oldukça düşüktür. Dolgu malzemesine alternatif olarak tasarlanmış olan statik mikserin de içerisinde plakalar bulunmaktadır. Bu yüzden sağlamış oldukları yüksek giderim verimlerinden dolayı çalışmalarımızın amacı olan H₂S ve NH₃ gibi gazlı kirleticilerin gideriminde dolgu malzemesi ve buna alternatif olarak da içerisinde plakalar bulunan statik mikser kullanılacaktır.

3. MALZEME VE YÖNTEM

Gazlı kirleticilerin yıkayıcı sistemler ile giderilmesiyle ilgili çalışmalarda absorpsiyon kolonu içerisinde gaz-sıvı temasını sağlayan malzemenin türü ve temizlenmesi istenen kirli gazın türüne göre yıkayıcı sıvının seçimi önemlidir.

Brettschneider ve arkadaşlarının kok fırını gazı içerisindeki hidrojen sülfür, amonyak ve karbondioksit giderimi incelemeleri için deneysel yöntem olarak dolgulu yıkayıcı sistemi kullanarak, 100 mm çapa sahip kolon içerisinde 15 mm çapında polipropilen malzemenen yapılmış pall halkaları kullanmışlardır. Bu halkalar kolon içerisine konumlandırıldıktan sonra kirli gaz kolonun alt kısmından verilmekte olup; kolonun üst kısmından hidrojen sülfür giderimi için sodyum hidroksit (NaOH), amonyak giderimi için ise sülfürik asit (H_2SO_4) çözeltisi püskürtülmüştür [26]. Godini ve arkadaşlarının yaptıkları bir çalışmada ise hidrojen sülfür ve karbondioksit giderimi için yıkayıcı sıvı olarak monoetanolamin (MEA) çözeltisi kullanılmıştır [16].

Wang ve arkadaşlarının dolgulu kolonda 1000 ppmv içeriğinde hidrojen sülfür ve içeriği %5-23 arasında değişen karbondioksit giderimi incelemelerinde kolon içerisinde yıkayıcı sıvı olarak sodyum karbonat (Na_2CO_3) çözeltisi kullanmışlardır. Deneysel çalışmalarının esnasında karbondioksit konsantrasyonu arttıkça, karbondioksit gideriminde azalma kaydetmişlerdir. Ayrıca karbondioksit konsantrasyonu arttıkça sodyum karbonat tüketimini artırdığını bundan dolayı sabit sıvı debisinde hidrojen sülfür giderim verimini azalttığını gözlemişlerdir [19].

Heidel ve arkadaşlarının karbondioksit giderimi için yaptıkları çalışmada kolon içerisinde yapısal dolgu malzemesi kullanmışlardır ve yıkayıcı sıvı olarak ise sodyum hidroksit (NaOH) ve potasyum hidroksit (KOH) çözeltisi kullanmışlardır. Deneysel çalışmaları esnasında karbondioksit gideriminde potasyum hidroksitin sodyum hidroksite göre daha etkin olduğunu gözlemişlerdir [84]. Adisorn ve arkadaşlarının karbondioksit giderimi çalışmalarında ise kolon içerisinde yapısal dolgu malzemesi kullanmışlardır. Karbondioksit gazını kolonun alt kısmından besleyerek, kolonun üst kısmından yıkayıcı sıvı olarak aminometilpropanol çözeltisinin gönderilmesini sağlamışlardır. Yapısal dolgu malzemesinin, diğer dolgu

malzemesi türlerine (pall halkaları, berl semerleri) göre daha iyi bir sonuç verdiğini görmüşlerdir [85].

Juntima ve arkadaşlarının amonyak giderimi için yaptıkları çalışmada kolon içerisine polivinil klorür malzemedan yapılmış rashing halkaları türünde dolgu malzemeleri doldurulmuştur ve kirli gazın kolonun alt kısmından yıkayıcı sıvının ise kolonun üst kısmından gönderilmesi sağlanmıştır. Amonyakın giderimi için yıkayıcı sıvı olarak su, sodyum hipoklorit (NaOCl), sodyum hipoklorit (NaOCl)-sodyum hidroksit (NaOH) karışımı ve sülfürik asit (H₂SO₄) kullanmışlardır. Yaptıkları incelemelerde sülfürik asitin amonyağın giderilmesinde daha etkin olduğu görmüşlerdir [36].

Çalışmalarımızda hidrojen sülfür (H₂S) ve amonyak (NH₃) gazlarının giderilmesini incelemek için toplam gaz debisi, kullanılan sıvı çözeltisi gibi işletme koşullarına bağlı olarak bir deneysel düzenek kurulmuştur. Bunun için önce sistemin kolon tasarımı yapılmıştır. Kolon, dolgu malzemesinin içerisinded bulunduğ, kirli gazın ve yıkayıcı sıvının temas etmesi için geniş bir alan oluşturulduğ, absorpsiyon işleminin gerçekleştiğ silindirik bir yapıdır.

Bu bölümde, kolon tasarımının nasıl yapıldığı, kirletici tipine göre yıkayıcı sıvı tipinin karakterize edilmesi, deneysel düzenek ve deneysel yöntem hakkında bilgi verilmektedir. Ayrıca dolgu malzemesi ile kirletici giderim oranlarının farklılıklarını karşılaştırmak amacıyla kolon içerisinde kullanılmak üzere tasarladığımız statik mikser ile ilgili bilgilere de yer verilmektedir.

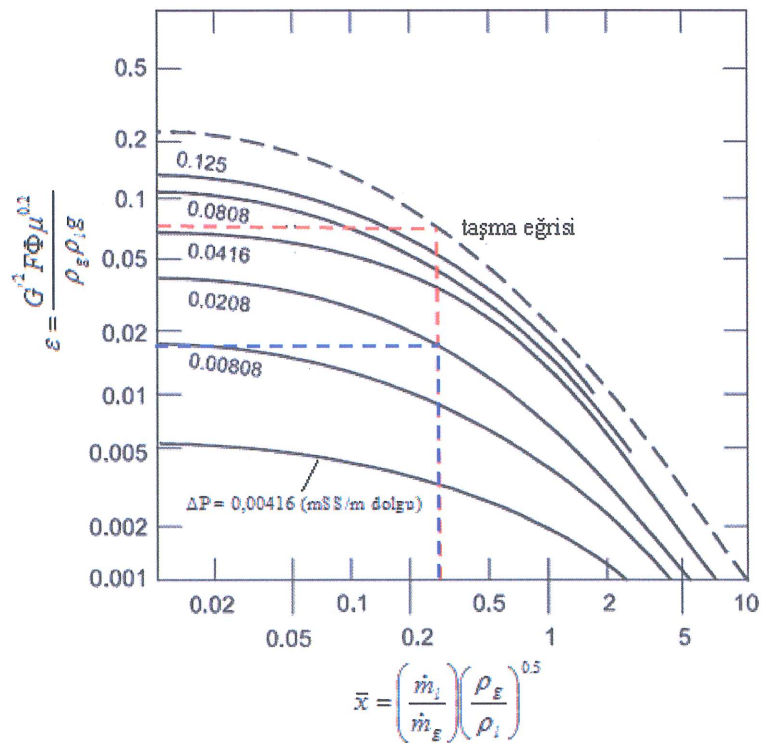
3.1. Gaz Yıkayıcı Kolon Tasarımı

Dolgulu gaz yıkayıcılarda kirli gaz ve sıvı debilerine bağlı olarak taşma sorununun yaşanmaması için uygun boyutlarda bir kolon tasarımı yapılması gerekmektedir. Genel olarak absorpsiyonun gerçekleşeceği kolonunun tasarımına etki eden faktörler; gaz hızı, kolon çapı, uygun yıkayıcı sıvı, kolon yüksekliğı, dolgu veya plaka türü ve sıvının hızı olarak sıralanabilir [7,76].

Dolgulu ve plakalı gaz yıkayıcılar literatürde de belirtildiğ üzere gazlı kirleticilerin uzaklaştırılmasında yüksek verime sahiptir. Çalışmalarımızda hidrojen sülfür (H₂S)

ve amonyak (NH₃) gideriminin ilk deneysel incelemeleri için kolon içerisinde yapısal dolgu malzemeleri kullanılmıştır.

Gaz yıkayıcılarda optimum gaz ve sıvı debisinin belirlenmesi kolonda meydana gelebilecek taşma olayı açısından önemlidir. Kolon çapının küçük olması durumunda gaz hızı artmaktadır. Gaz hızının kolon boyunca artması sonucu üst kısımdan püskürtülen yıkayıcı sıvı, yapısal dolgu malzemesine ulaştığı noktada dolgu malzemesinde bulunan boşluklar tarafından tutulmaktadır. Bununla birlikte kolondaki basınç düşümü artmaya başlamakta ve fazlar arasındaki karışım oranı azalmaktadır. Gaz hızının daha fazla artması, dolgu malzemesindeki boşlukların tamamen yıkayıcı sıvı ile kaplanmasına neden olmaktadır. Yıkayıcı sıvının dolgu malzemesi üzerinde bir tabaka meydana getirmesi sonucu kolonun alt bölgesine transferi gerçekleşemez. Böylece basınç düşümünde artma meydana gelir ve sıvı-gaz karışım oranı minimum değerini alır. Bu durum gaz yıkayıcılarda taşma, taşmanın meydana geldiği hız değeri ise taşma hızı olarak tanımlanmaktadır. Taşma problemi büyük çaplı kolon kullanarak giderilebilir ancak çapın artması yüksek maliyete yol açabilir.



Şekil 3.1. Dolgulu kolonlarda taşma ve basınç düşmesi için geliştirilmiş diyagram [7]

Dolgulu gaz yıkayıcılarda taşmanın meydana gelebileceği minimum kolon çapının tayin edilmesi için Sherwood ve arkadaşları Şekil 3.1’de gösterilen taşma-basınç korelasyonunu düzenlemiştir [7,86]. Şekilde x-eksenindeki değerler gaz ve sıvı akımlarının fiziksel özelliklerinin bir fonksiyonu olup; y-eksenindeki değerler “ε” ile belirtilerek yıkayıcı sistemde kullanılan dolgu malzemesi ile birlikte gaz ve sıvı özelliklerinin bir fonksiyonunu ifade etmektedir. Şekilde yer alan eğriler, fiziksel özellikleri bilinen gazın, yıkayıcı sıvının ve dolgu malzemelerinin kullanıldığı deneysel veriler yardımıyla oluşturulmuştur [7].

Şekil 3.1’de x-ekseninde yer alan değerler birimsiz olup; aşağıda belirtilen (3.1) nolu bağıntı ile bulunabilmektedir ve “ \bar{x} ” olarak tanımlanmıştır. Bu bağıntıda, \dot{m}_l sıvının kütleli debisini, \dot{m}_g gazın kütleli debisini, ρ_l sıvının yoğunluğunu, ρ_g gazın yoğunluğunu ifade etmektedir.

$$\bar{x} = \left(\frac{\dot{m}_l}{\dot{m}_g} \right) \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.5} \quad (3.1)$$

Şekil 3.1’de y-eksenindeki “ε” değeri, bulunan “ \bar{x} ” değeri ile taşma eğrisinin kesştirilmesiyle tayin edilmektedir. Aşağıda verilen (3.2) nolu bağıntı “ε” değerini belirtmektedir. Burada, G' kütle akısını, F dolgu faktörünü, Φ yıkayıcı sıvı çözeltisi yoğunluğunun suyun yoğunluğuna oranını, μ sıvının mutlak viskozitesini, ρ_g gazın yoğunluğunu, ρ_l sıvının yoğunluğunu ve g ise yerçekimi ivmesini ifade etmektedir.

$$\varepsilon = \frac{G'^2 F \Phi \mu^{0.2}}{\rho_g \rho_l g} \quad (3.2)$$

Deneysel çalışmalarımızda kullanacağımız gazın en yüksek debisi 5 (L/dk) olmasından dolayı (3.3) nolu bağıntıda gazın kütleli debisi bulunabilir. Bu bağıntıda, \dot{m}_g gazın kütleli debisini, ρ_g gazın yoğunluğunu, \dot{Q}_g ise gazın hacimsel debisini ifade etmektedir.

$$\dot{m}_g = \rho_g \dot{Q}_g \quad (3.3)$$

Literatürde dolgulu kolon ile olan çalışmalarda yıkayıcı sıvı ve kirli gaz için bir hacimsel debi oranı kullanılmaktadır. Bu oran, 1 m³ kirli gazın giderilmesi için litre cinsinden gerekli sıvı miktarı olarak değerlendirilmektedir ve hesaplamalardaki birimi L/m³'tür. Literatürdeki incelemelerde deneysel çalışmalarda yıkayıcı sıvının ve gazın hacimsel debilerinin oranı genellikle 5 ile 10 (L/m³) olduğu görüldüğünden, tasarım çalışmalarımızda sıvı ve gazın hacimsel debi oranı \dot{Q}_l / \dot{Q}_g ortalama 8 (L/m³) olarak hesaplamalara dahil edilmiştir. Buna göre sıvının kütleli debisi (3.4) nolu bağıntı ile elde edilebilir. Bu bağıntıda, \dot{m}_l sıvının kütleli debisini, ρ_l sıvının yoğunluğunu, \dot{Q}_l ise sıvının hacimsel debisini ifade etmektedir. (3.3) ve (3.4) nolu bağıntılarda elde edilen değerlere göre (3.1) nolu denklemde kütleli debi oranı dahil edilmektedir.

$$\dot{m}_l = \rho_l \dot{Q}_l \quad (3.4)$$

(3.1) nolu bağıntı ile 0,30 olarak elde edilen “ \bar{x} ” değeri Şekil 3.1’de kırmızı kesik çizgilerle gösterildiği gibi taşma eğrisi ile kesiştirildiğinde y-eksenindeki “ ϵ ” değeri yaklaşık 0,07’ye denk gelmektedir.

(3.1) nolu bağıntıya göre Sherwood diyagramından “ ϵ ” değeri elde edildikten sonra (3.2) nolu bağıntıdan kütle akısı G' bulunarak, (3.5) nolu bağıntıda kullanılmaktadır. Bu bağıntıda u_T kolonda taşmayı meydana getirebilecek hız değerini, G' kütle akısını, ρ_g gazın yoğunluğunu ifade etmektedir.

$$u_T = \frac{G'}{\rho_g} \quad (3.5)$$

Dolgulu kolon çapının belirlenmesinde gazın işletme şartlarındaki hızı, taşma hızının %50 ile %75’i arasında alınmaktadır [5]. Böylece (3.6) nolu bağıntıda gösterildiği üzere optimum bir işletme hızı tespit edilmektedir. (3.6) nolu bağıntıda u_l yıkayıcı sistemde uygun görülen işletme hızını, f taşma oranını, u_T ise kolonda taşmayı meydana getirebilecek hız değerini ifade etmektedir. Taşma oranı 0,50 ile 0,75 arasında alınabilmektedir.

$$u_l = fu_T \quad (3.6)$$

Yıkayıcı sistem için gazın hacimsel debisi ile (3.6) nolu denklemden elde edilen işletme hızı (3.7) nolu bağıntıda yerine yazıldığında kolonun kesit alanı elde edilmektedir. (3.7) nolu bağıntıda A_c yıkayıcı sistem kolonunun kesit alanını, \dot{Q}_g gazın hacimsel debisini, u_l ise kolon içerisindeki hızı ifade etmektedir.

$$A_c = \frac{\dot{Q}_g}{u_l} \quad (3.7)$$

Yıkayıcı sistemde kolon kesit alanı belirlendikten sonra (3.8) nolu bağıntı ile kolon çapı tayin edilebilir. (3.8) nolu bağıntıda d_c kolonun çapını, A_c yıkayıcı sistem kolonunun kesit alanını ifade etmektedir.

$$d_c = \left(\frac{4A_c}{\pi} \right)^{0.5} \quad (3.8)$$

Tablo 3.1’de tasarım için bağıntılarda kullanılan parametrelerin değerleri verilmektedir. Tablo 3.2 ise bu bağıntılar ve parametreler dahilinde hesaplanan değerleri göstermektedir.

Tablo 3.1. Tasarım parametreleri

Parametreler	Değerler
“ \dot{Q}_l / \dot{Q}_g ” sıvı ve gazın hacimsel debi oranı (L/m^3)	8
“ ρ_g ” gazın yoğunluğu (kg/m^3)	1,04
“ ρ_l ” akışkanın yoğunluğu (kg/m^3)	1150
“ F ” dolgu faktörü (m^2/m^3)	550
“ Φ ” yıkayıcı sıvı ve su yoğunlukları oranı	1,5
“ μ_l ” sıvının mutlak viskozitesi (Pa.s)	$1,6 \times 10^{-3}$
“ f ” taşma oranı	0,50
“ \dot{Q}_g ” gazın hacimsel debisi (L/dk)	5

Tablo 3.2. Tasarım parametreleri dahilinde hesaplanan değerler

Parametreler	Değerler
" \dot{m}_l / \dot{m}_g " kütleli debi oranı	11,5
" G' " kütle akısı (kg/m ² s)	1,90
" u_T " taşma hızı (m/s)	1,82
" u_i " işletme hızı (m/s)	0,91
" A_c " kolon kesit alanı (m ²)	9,1x10 ⁻⁵
" V_c " dolgulu kolon hacmi (m ³)	2x10 ⁻⁴

Deneysel incelemelerin farklı gaz debilerinde gerçekleştirilmesinden dolayı hesaplamalarda en yüksek debi değeri alınmaktadır. Buna göre emniyet değerleri de göz önünde bulundurulduğunda kolon çapının 20 mm olması uygun görülmüştür.

Kolon içerisinde dolgu yüksekliği kirletici giderim verimi açısından önemli bir faktördür. Öngörülen giderim verimi ele alındığında dolgu yüksekliği (3.9) nolu bağıntı ile bulunabilir.

$$h_d = N_i h_t \quad (3.9)$$

Yukarıda verilen bağıntıda, " h_d " dolgu yüksekliğini, " N_i " ve " h_t " sırasıyla transfer ünite sayısı ve transfer ünite yüksekliği olarak tanımlanmaktadır ve " N_i " kimyasal reaksiyonun gerçekleştiği kolonlar için (3.10) nolu bağıntıdan elde edilmektedir. Burada kolona giren kirli gazın içeriğini $C_{k,g}$, kolonda giderilemeyen yani çıkış gazının içeriğini ise $C_{k,\phi}$ tanımlamaktadır. Yapılan birçok uygulamada transfer ünite yüksekliği olarak ifade edilen " h_t " için 30 ile 120 cm arasında bir değer alınmaktadır [7,87-88].

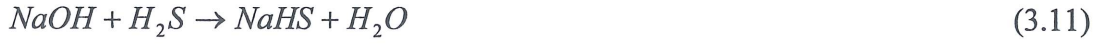
$$N_i = \ln \frac{C_{k,g}}{C_{k,\phi}} \quad (3.10)$$

Kurmuş olduğumuz gaz yıkayıcı deneysel sisteminde 1000 ppmv'lik kirletici gazın %90 verim ile giderilmesi öngörüldüğünden, transfer ünite yüksekliği $h_t=30$ cm alınarak kolon içerisinde dolgu yüksekliğinin 64 cm olması uygun görülmüştür.

Tasarlanan kolondaki basınç düşümünün belirlenmesi için (3.2) nolu bağıntıdan elde edilen kütle akısı ile (3.6) nolu bağıntıda belirlenen işletme hızı (3.2) nolu bağıntıda yerlerine konarak “ε” değeri tekrar hesaplanmaktadır. Buna göre tekrar hesaplanan “ε” değeri ile daha önce hesaplanmış olan “ \bar{x} ” değeri Şekil 3.1’de mavi kesik çizgilerle gösterildiği gibi kesiştirilir. İki değer kesiştiği noktada bulunan eğri basınç düşümü eğrisidir. Bu eğri, bir metrelik dolgu yüksekliğindeki basınç düşümünü metre su sütunu (mSS) cinsinden vermektedir. Buna göre 64 cm dolgu yüksekliği için basınç düşümünün yaklaşık 1,3 mbar olduğu tespit edilmiştir.

3.2. Yıkayıcı Sıvının Karakterizasyonu

Gaz yıkayıcılarda kirletici gideriminde yıkayıcı sıvının türü kadar sıvının içerisinde yer alan solüsyonun miktarı da önemli bir faktör teşkil etmektedir. Literatür araştırmasında görüldüğü üzere hidrojen sülfür (H_2S) gideriminde sodyum hidroksit ($NaOH$) kuvvetli bir bazik solüsyon olmakla beraber maliyet bakımından da ekonomik bir alternatiftir. Amonyak gideriminde ise su efektif bir rol oynamaktadır. Hidrojen sülfürün sodyum hidroksit ile temas etmesi sonucu aşağıda verilen reaksiyonlar oluşmaktadır [89].



Yukarıda gerçekleşen reaksiyonlardan (3.11) nolu reaksiyon daha baskın olarak gerçekleşmektedir. Gaz karışımında hidrojen sülfür (H_2S) ile birlikte karbondioksit (CO_2) de bulunması durumunda, sodyum hidroksit ($NaOH$) ile teması sonucunda (3.13) nolu reaksiyonun gerçekleşmesi sonucu karbondioksit tutulması da görülmektedir.

Reaksiyon (3.11)’den görüldüğü üzere 1 mol hidrojen sülfür (H_2S) giderimi için 1 mol sodyum hidroksit ($NaOH$) gerekmektedir. Dolayısıyla kirli gaz içerisindeki hidrojen sülfür içeriği bilindiğine göre gerekli görülen sodyum hidroksitin molar debisi bulunabilir.

Deney çalışmalarımızda kirli gaz içerisindeki hidrojen sülfür konsantrasyonu maksimum 1000 ppmv'dir. Buna göre, kirli gaz içerisindeki hidrojen sülfürün kütleli debisi (3.14) nolu bağıntı yardımıyla belirlenirken molar debisi ise (3.15) nolu bağıntıdan saptanmaktadır. (3.14) nolu bağıntıda \dot{m}_g gazın kütleli debisini, C_g mg/m³ cinsinden kirletici konsantrasyonunu, \dot{Q}_g ise gazın hacimsel debisini ifade etmektedir.

$$\dot{m}_g = C_g \dot{Q}_g \quad (3.14)$$

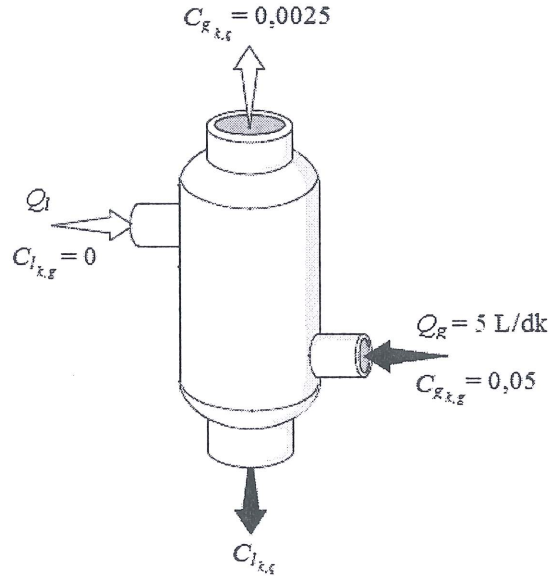
$$n_g = \frac{\dot{m}_g}{M} \quad (3.15)$$

(3.15) nolu bağıntıda n_g hidrojen sülfürün molar debisini, \dot{m}_g kütleli debisini, M ise moleküler ağırlığını ifade etmektedir. Buna göre, hidrojen sülfürün kütleli ve molar debisi sırasıyla 0,42 g/h ve 0,01 mol/h olarak bulunmuştur. Böylece 1 mol hidrojen sülfürün giderilmesi için 1 mol sodyum hidroksit kullanıldığından 0,01 mol hidrojen sülfür giderimi için 0,01 mol sodyum hidroksit gerekmektedir. Buna göre gerekli katı sodyum hidroksit miktarı 0,4 g/h olarak elde edilmektedir. Bu değer sadece (3.11) nolu reaksiyon için gerekli görülen sodyum hidroksit miktarını belirtmektedir. Reaksiyon (3.12) ve (3.13) için az da olsa sodyum hidroksit gereksinimi duyulacağından emniyet katsayısı da göz önünde bulundurulmaktadır. Buna göre deneysel çalışmalarımız için yıkayıcı sıvının debisi 2,5 (L/h) olduğundan 1 litre yıkayıcı sıvı içerisinde çözelti oluşturmak için ilave edilmesi gereken katı sodyum hidroksit (NaOH) miktarı 0,25 gram olarak belirlenmiştir.

Amonyak gibi gazların sıvı içerisinde çözünme durumu için Henry yasasından da faydalanılabilir. Henry yasasında bir çözeltide çözünen gazın konsantrasyonu çözelti üzerindeki gazın kısmi basıncı ile doğru orantılıdır. Henry yasası yüksek basınçlarda ve gazın sıvıda iyonlaşması ya da tepkimeye girmesi durumlarında geçerli değildir. Diğer bir ifadeyle Henry kanunu çözüneneye uygulanır [90]. Aşağıda verilen bağıntıda P çözeltinin kısmi basıncı, C çözünen gazın çözeltideki konsantrasyonu, H ise Henry sabiti olarak tanımlanmaktadır. Henry sabitinin sabit sıcaklıkta sabit olduğu söylenebilir [90].

$$P = H.C \quad (3.16)$$

Buna göre 1 bar basınçta 20 °C sıcaklıkta 1 L suda çözünen amonyak miktarını bulabilmek için (3.16) nolu bağıntı kullanılabilir. Bu koşullara göre elde edilen Henry sabiti, $H = 1,6 \times 10^{-5}$ (atm.m³/mol)'dur. (3.16) nolu bağıntıda değerler yerine yazıldığında 1 L suda 62,5 mol amonyağın çözünebildiği bulunmaktadır. Henry katsayısını yıkayıcı sistemde amonyağın giderilmesi amacıyla kullanılması gereken minimum sıvı miktarını belirlemek için kullanabiliriz.

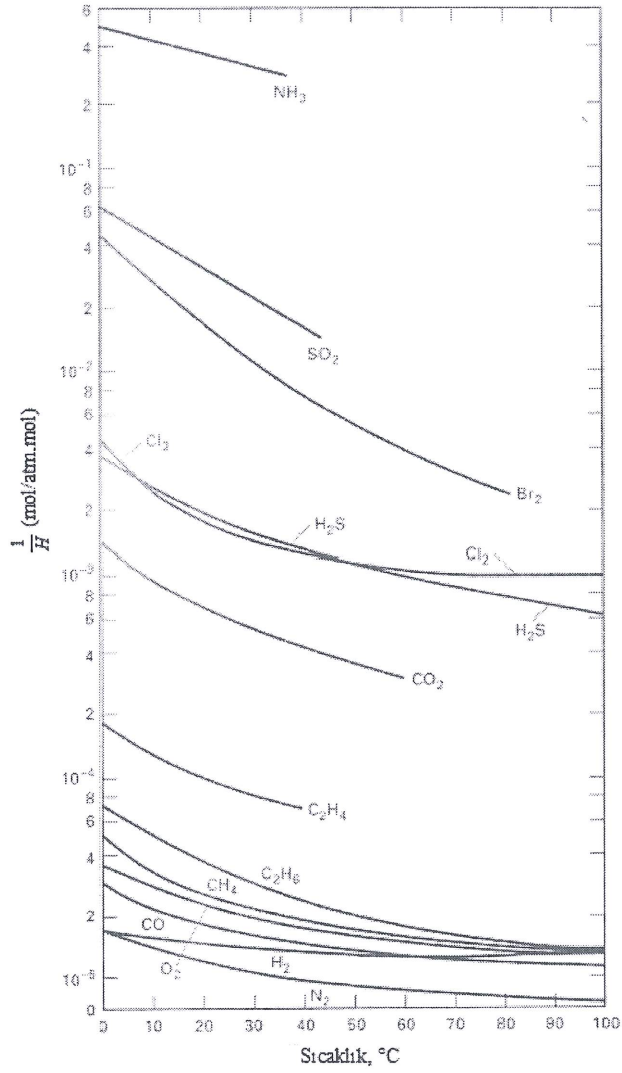


Şekil 3.2. Amonyak gideriminde kolondaki giriş ve çıkış değerleri

Şekil 3.2'de amonyak giderimi çalışmalarımızda kolona giren gaz ve sıvı değerleri gösterilmektedir. Burada minimum sıvı debisinde kolona giren akımdaki kirleticinin konsantrasyonu $C_{g,k,g}$ kolonu terkeden kirli sıvının kompozisyonu $C_{I,k,g}$ ile dengededir. Denge halinde Henry katsayısı da kullanılarak bu durum aşağıdaki bağıntı ile belirtilmektedir.

$$C_{g,k,g} = H.C_{I,k,g} \quad (3.17)$$

Burada, $C_{g,k,g}$ minimum sıvı debisinde kolona giren kirleticinin konsantrasyonu, $C_{I,k,g}$ kolonu terk eden kirli sıvının kompozisyonunu, H ise Henry katsayısını belirtmektedir.



Şekil 3.3. Suda çözünen gazlar için Henry katsayıları [91]

(3.17) nolu bağıntıda Henry sabiti, Şekil 3.3'deki diyagramdan 1 atm basınç ve 20 °C sıcaklık için 2,7 olarak bulunabilmektedir [91]. Buna göre, (3.17) nolu bağıntıda $C_{l,k,s}$ değeri tayin edilebilir ve (3.18) nolu denge denkleminde minimum gerekli sıvı debisi bulunabilir.

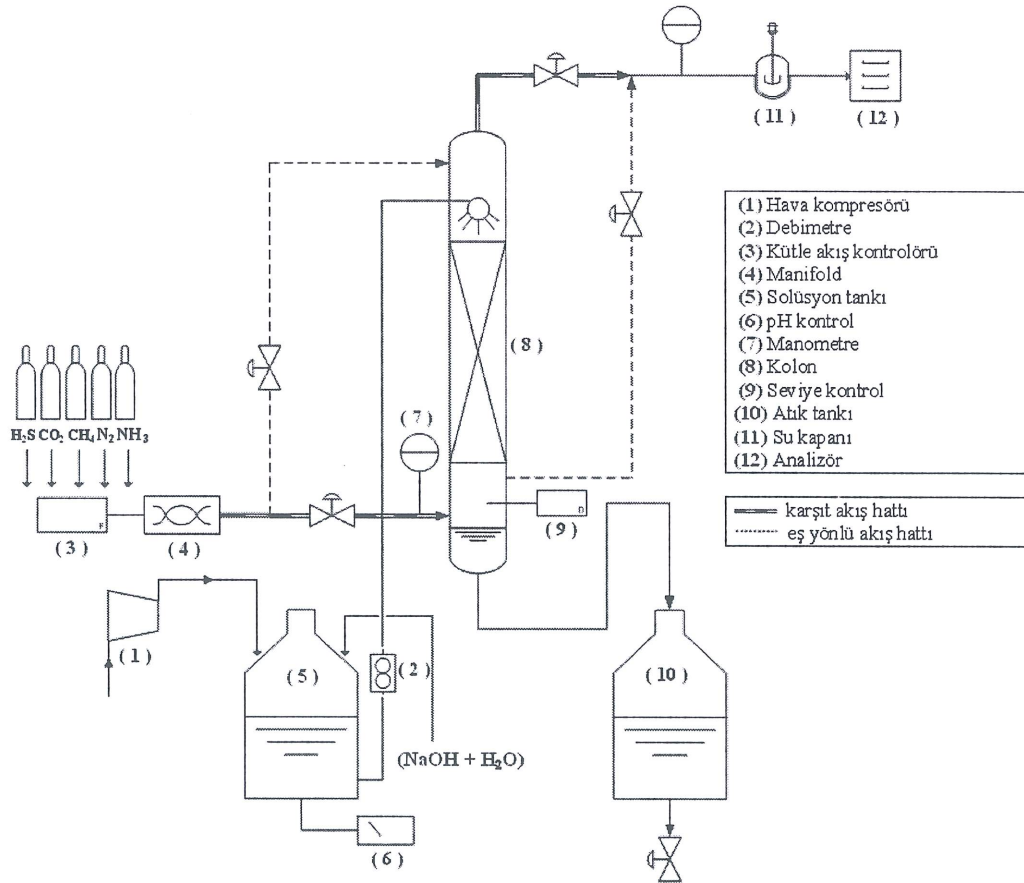
$$\frac{n_l}{n_g} = \frac{C_{gk,g} - C_{gk,s}}{C_{lk,s} - C_{lk,g}} \quad (3.18)$$

(3.18) nolu bağıntıda n_g amonyağın molar debisini, n_l ise amonyağın giderilmesi için kolona giriş yapan sıvının molar debisini belirtmektedir. Bağıntıda $C_{gk,s}$ değeri amonyak için %95 giderim verimi varsayım yapılarak $C_{gk,g}$ değerinin %5'i olarak

değerlendirilmektedir. Bağtıda verilen $C_{l,k,f}$ çıkış akımındaki kirli sıvının kompozisyonunu, $C_{l,k,g}$ ise kolona giriş yapan sıvının kompozisyonunu tanımlamaktadır. Sirkülasyon durumu olmadığı durumda sıvının kompozisyonu için $C_{l,k,g} = 0$ olarak alınmaktadır [7]. Deney çalışmalarımızda amonyağın maksimum hacimsel debisi 5 (L/dk) ve moleküler ağırlığı 17 g/mol olduğundan molar debisi 0,3 mol/dk olarak bulunabilir. (3.18) nolu bağtıda değerler yerine yazıldığında gerekli sıvı debisi emniyet katsayısı da göz önünde bulundurularak 2,5 (L/h) olarak alınmıştır.

3.3. Kirletici Gazın Arıtılması İçin Kullanılan Deneysel Yöntem

Kirletici gaz gideriminin deneysel incelemeleri için gerekli kolon tasarımı sonrası kurmuş olduğumuz deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 3.4'te verilmektedir. Gaz besleme ünitesi, gaz karışım manifoldu, absorpsiyon kolonu, solüsyon tankı, atık tankı ve gaz analiz sistemi düzeneği oluşturan başlıca ünitelerdir.



Şekil 3.4. Deney düzeneğinin şematik olarak gösterimi

Deney düzeneği literatürden elde edilen bilgiler yardımıyla kurulmuştur. Literatürde genel olarak tek akış modunun (karşı akışlı ya da eş yönlü) bulunduğu sistemler ile deneyler yapılmıştır. Tasarladığımız deney düzeneği, Şekil 3.4'te de görüldüğü üzere literatürden farklı olarak her iki akış modunun da kullanılabilceği hatlara sahiptir. Düzenekte bulunan aç-kapa vanalar ile gazın, kolonun üst kısmından ya da alt kısmından verilmesi sağlanabilmektedir.

Gaz besleme ünitesini deneylerde kullanılacak olan gazlar oluşturmaktadır. Bunlar; basınçlı tüpler içerisinde bulunan azot (N_2), metan (CH_4), hidrojen sülfür (H_2S), karbonmonoksit (CO_2) ve amonyak (NH_3) gazlarıdır. Tüpler üzerinde bulunan basınç regülatörleri yardımıyla gazlar deney düzeneğine gönderilmektedir.

Gazların deney düzeneğinde bulunan kolona gönderilmeden önce debileri, Şekil 3.4'te belirtilen kütle akış kontrolörleri (3) vasıtasıyla ayarlanmaktadır. Kütle akış kontrolörleri sisteme gönderilecek olan gazın akış oranını sabit tutarak ayarlamakta ve bağlı bulunduğu monitör hattı vasıtasıyla ayarlanan değeri görsel olarak sergilemektedir. Bu yüzden deneyde kullanılacak her bir gazın ayrı bir kütle akış kontrolörü bulunmaktadır. Farklı çalışma şartlarında gerçekleştirilen deneyler için gazın toplam hacimsel debisi kütle akış kontrolörleri yardımıyla 180 ile 300 L/h aralığında ayarlanmıştır.

Tablo 3.3'te deney düzeneğinde kullanılan kütle akış kontrolörlerine ait teknik bilgiler verilmektedir.

Tablo 3.3. Kütle akış kontrolörlerinin teknik özellikleri

Kontrol edilen gaz	Model	Ölçüm aralığı	Doğruluk	Çalışma sıcaklığı	Çıkış sinyali	Güç kaynağı
H_2S	Brooks SLA 5850	0-10 (L/dk)	$\pm \%1 - 1,5$	5 – 65 °C	4-20 mA	24 VDC
N_2	Brooks SLA 5850	0-80 (L/dk)	$\pm \%1 - 1,5$	5 – 65 °C	4-20 mA	24 VDC
NH_3	Brooks SLA 5850	0-10 (L/dk)	$\pm \%1 - 1,5$	5 – 65 °C	4-20 mA	24 VDC
CO_2	Brooks SLA 5850	0-10 (L/dk)	$\pm \%1 - 1,5$	5 – 65 °C	4-20 mA	24 VDC
CH_4	Brooks SLA 5850	0-2 (L/dk)	$\pm \%1 - 1,5$	5 – 65 °C	4-20 mA	24 VDC

Kütle akış kontrolörlerinin her biri ayarlanan değerleri monitöründen okumayı sağlayan çok kanallı kontrol ekipmanına bağlıdır. Sistemde her biri dört kanallı olan iki adet kontrol ekipmanı bulunmaktadır. Tablo 3.4'te kontrol ekipmanı ile ilgili teknik bilgiler verilmektedir.

Tablo 3.4. Kontrol ekipmanının teknik özellikleri

Cihaz	Brooks kontrol ekipmanı
Model	0154/C
Giriş kaynağı	90-260 V – 50/60 Hz
Çıkış kaynağı	+ 24 VDC, 60 W
Giriş/Çıkış sinyali	4-20 mA

Deneyde kullanılacak olan gazların birbirleriyle karışması için sistemde bir karışım manifoldu (4) konumlandırılmıştır. Her bir gazın debisi kütle akış kontrolörü tarafından ayarlandıktan sonra bu karışım manifolduna gelmekte ve buradan kolonun (8) alt kısmına veya üst kısmına aç-kapa vanaları yardımıyla yönlendirilmektedir.

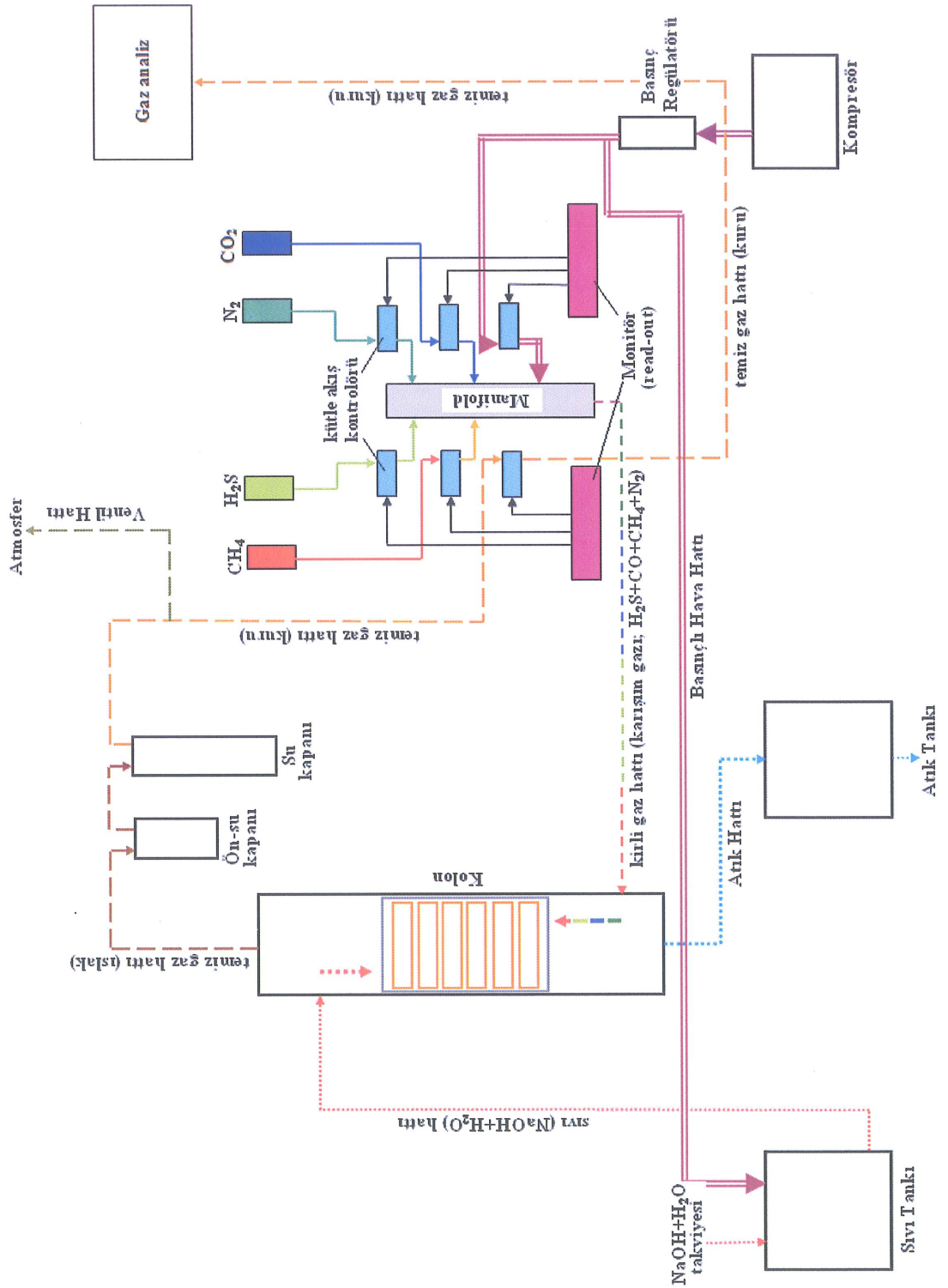
Şekil 3.2'de deney düzeneğinde kolonun alt bölümünde iki tank bulunmaktadır. Bunlar solüsyon ve atık tankıdır. Solüsyon tankı (5), yıkayıcı sistem kolonunun üst kısmından gönderilen çözelti ile dolu bulunmaktadır. Kirletici gazların kolon içerisinde absorblanması için gerekli sıvı bu tank içerisinde bulunmaktadır. Hidrojen sülfür (H_2S) giderim deneylerinde solüsyon tankında sodyum hidroksit ($NaOH$)-saf su karışımı bulunurken amonyak (NH_3) giderim deneylerinde tankta su bulunmaktadır. Deney çalışmaları esnasında sıvı tankı, hava kompresörü (1) tarafından basınçlandırılmakta ve bir nozul yardımıyla kolonun üst kısmından dolgu malzemesi üzerine saatte 2,5 litre sıvı püskürtülmektedir. Kolon içerisinde sıvı tarafından giderilen kirli gazlar, sıvı ile birlikte kolonun altında bulunan atık tankında (10) birikmektedir. Kirli gaz ve sıvı karışımı ile tank belli bir seviyede dolduktan sonra boşaltılmaktadır.

Deney süresince hidrojen sülfür gideriminin efektif olması açısından solüsyonun optimum pH değerinin 11 olduğu belirlenmiştir. Deney çalışmalarında pH değeri sürekli kontrol altında tutulmuş olup; gerekli görüldüğünde tank içerisine solüsyon takviyesi yapılmıştır.

Deney çalışmalarımızda, ticari dolgu malzemelerinin ve statik mikser modüllerinin içerisine yerleştirildiği gaz yıkayıcı kolonları 316 kalite paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Dolgu malzemesinin kullanıldığı kolon çapı 20 mm, statik mikserin kullanıldığı kolon çapı ise 30 mm'dir. Kirli gazlar ve sıvı bu kolon içerisine gönderilmektedir. Kolon içerisinde taşma sorunlarının yaşanmaması için kolonun alt kısmında sıvı seviyesi kontrol edilmektedir.

Deney düzeneğinde gerçekleştirilen karışım gazı ortamında ve karşıt akışlı yöntemle hidrojen sülfür giderim prosesinin akış şeması Şekil 3.5'te verilmektedir. Şekilde de görüldüğü üzere metan (CH_4), hidrojen sülfür (H_2S), azot (N_2) ve karbondioksit (CO_2) gazlarının akış miktarları kolona gönderilmeden önce kütle akış kontrolörlerinin bağlı bulunduğu çok kanallı monitörler üzerinden ayarlanmaktadır. Manifoldda karışan gazlar daha sonra kolona alt kısmından gönderilmektedir. Şekilde görülen sıvı tankında sodyum hidroksit ve saf su karışımı bulunmaktadır. Sıvı tankı kompresör tarafından basınçlandırılmakta ve içerisinde bulunan sodyum hidroksit-saf su karışımı akış şemasından da görüldüğü üzere kolona üst kısmından verilmektedir.

Proses esnasında kirli gazın sıvı ile temasından sonra tutunan gazlar kirli gaz-sıvı karışımı olarak kolonun altında bulunan atık tankına transfer edilmektedir. Sıvı ile temasından Kirleticilerden arındırılmış olan gaz kolonun üst kısmından temiz gaz olarak hareket etmekte ve su kapanında nemi alındıktan sonra gaz analiz cihazına yönlendirilmektedir. Akış şeması karışım ortamında eş yönlü akışlı ve azot ortamında prosesler için de aynı şekilde oluşturulabilir.



Şekil 3.5. Karışım gazı ortamında karşıt akışlı H₂S giderimi için akış diyagramı



Şekil 3.6. Kurulan gaz yıkayıcı sisteminin fotoğrafı

Şekil 3.6'da kurduğumuz gaz yıkayıcı deneysel düzeneğin fotoğrafı görülmektedir. Sistemde karşıt akışlı modda kirli gaz kolonun alt kısmından giriş yaparken üst kısmından sıvı püskürtülmektedir. Eş yönlü akış modunda ise kirli gaz ve sıvı kolonun üst kısmından aşağıya doğru hareket etmektedir.

Proses sonunda gazın nemini almak için kolonun çıkış hattına bir su kapağı (11) yerleştirilmiştir. Su kapağı, silindirik bir kaptan oluşmaktadır ve temiz gaz bu kabın içerisinden geçerken nemini bırakmaktadır.

Deneylerde hidrojen sülfür (H_2S) analizi için kullanılan cihazlar ile ilgili teknik bilgiler Tablo 3.5 ve Tablo 3.6'da verilmektedir.

Tablo 3.5. Gaz kromatografi-I teknik özellikleri

Cihaz	Agilent gaz kromatografi
Dedektör	Sinyal kontrollü alev fotometrik dedektör Alev fotometrik dedektör
Ölçüm aralığı	0,001 – 100 ppm H ₂ S
Doğruluk	±%3
Çalışma sıcaklığı	20 – 350 °C

Tablo 3.6. Gaz kromatografi-II teknik özellikleri

Cihaz	Agilent gaz kromatografi
Dedektör	Isıl iletkenlik dedektör
Ölçüm aralığı	100 – 2000 ppm H ₂ S, %0,5-100 CO ₂ , %0,5-100 CH ₄
Doğruluk	±%3
Çalışma sıcaklığı	20 – 350 °C

Amonyak (NH₃) analizinde ise Gasmeter FTIR gaz ölçüm cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz ile ilgili teknik bilgiler Tablo 3.7’de belirtilmektedir.

Tablo 3.7. Gaz ölçüm cihazı teknik özellikleri

Cihaz	Gasmeter FTIR gaz ölçüm cihazı
Ölçüm aralığı	0-100 ppm NH ₃
Doğruluk	±%2
Dedektör	Peltier MCT
Çalışma sıcaklığı	20 – 180 °C
Akış aralığı	2 – 10 (L/dk)
Güç kaynağı	230 V / 50-60 Hz

3.3.1. Dolgu malzemesi seçimi

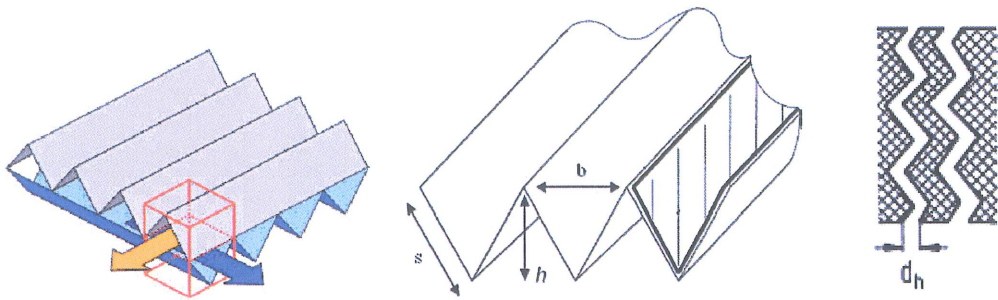
Kütle aktarımının sağlanabilmesi ve gaz-sıvı fazın birbiriyle dengeye gelmesi dolgu malzemeleri için önemli bir faktördür. Dolgu malzemeleri, korozyona karşı direnç, mekanik dayanım, gerekli akışı sağlama özelliği ve ekonomik bakımdan uygun olmalıdır [92].

Yapısal dolgu malzemeleri halen modern bir absorpsiyon kolon ekipmanı olarak kullanılmaktadır. Random dolgu malzemelerine göre daha pahalı olmalarına rağmen, bu tür dolgu malzemeleri uygun basınç kayıpları sunmalarının yanında yüksek verim ve kapasite sergilemektedir. Özellikle paslanmaz yapısal dolgu malzemeleri, dayanıklılık, iyi ıslanabilirlik ve korozyona karşı dirençli olmaları bakımından uygundur [92,93].



Şekil 3.7. Kolon içerisinde kullanılan ticari dolgu malzemesi

Deney çalışmalarımızın ilk bölümünde, kolon içerisinde Şekil 3.7’de görülen ticari yapısal dolgu malzemeleri kullanılmıştır. Dolgu malzemelerinin boyu 53 mm olup; her biri kolon içerisine üst üste konularak yeterli dolgu yüksekliği ayarlanmıştır. Ticari dolgu malzemesi, Şekil 3.8’de görüldüğü üzere birbirine paralel dikey olarak yerleştirilmiş oluklu ince paslanmaz plakaların meydana getirdiği çapraz akış sağlamaya yönelik seri kanallardan oluşmaktadır.



Şekil 3.8. Yapısal dolgu malzemesi formu [94,95]

Dolgu malzemesindeki hidrolik çap ve kanal çapı boşluk oranına bağlıdır ve sırasıyla (3.19) ve (3.20) nolu bağıntılar yardımıyla bulunmaktadır [86,94-96]. Bu bağıntılarda d_h , dolgu malzemesinin hidrolik çapını, d_k dolgu malzemesinin kanal çapını, β dolgu malzemesinin boşluk oranını, a özgül yüzey alanını, b dolgu malzemesi kanalının tabanını, h dolgu malzemesindeki kıvrım yüksekliğini, s dolgu malzemesi kanalının kenar uzunluğunu ifade etmektedir. Hidrolik çap, dairesel kesite sahip olmayan bir kesitin dairesel bir kesite göre eşdeğer çapıdır.

$$d_h = \frac{4\varepsilon}{a} = \frac{bh}{s} \quad (3.19)$$

$$d_k = \frac{6(1-\varepsilon)}{a} \quad (3.20)$$

Dolgu malzemelerinde sıvı damlacığının çapı hidrolik çapına eşit olması durumunda yıkayıcı sıvı damlalarının dolgu içerisinden aşağıya doğru hareket etmesi mümkün değildir çünkü bu durumda dolgu malzemesinin boşluk oranı oldukça azalmakta ve tıkanmalar meydana gelmektedir [97].

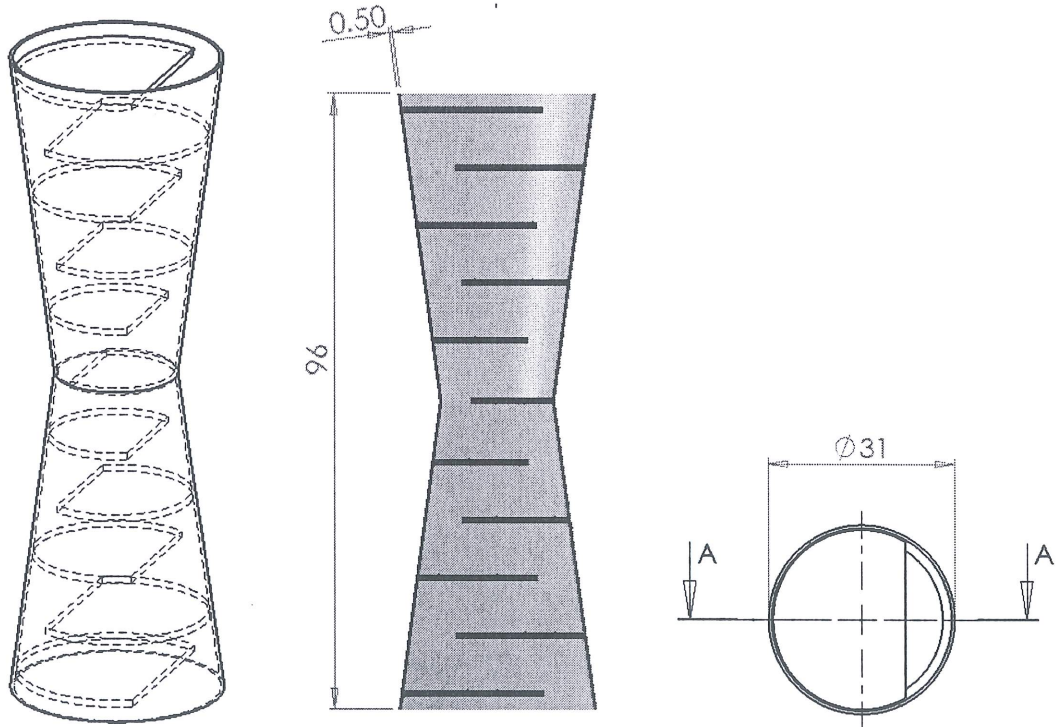
Gazlı kirleticilerin gideriminde dolgulu yıkayıcı sistemlerinde kolon içerisinde farklı türlerde dolgu malzemeleri kullanılabilir. Bu dolgu malzemelerin türleri dolgulu gaz yıkayıcılar bölümünde Şekil 2.25'te belirtilmiştir. Deney çalışmalarımızda, kolon içerisinde Şekil 3.8'de formu belirtilen ticari yapısal dolgu malzemesi kullanılmıştır. Tablo 3.8'de bu dolgu malzemesinin teknik özellikleri verilmektedir.

Tablo 3.8. Ticari dolgu malzemesinin teknik özellikleri

Özellikler	Değerler
" d_d " dolgu malzemesi çapı (mm)	20
" h_d " toplam dolgu yüksekliği (mm)	640
" β " boşluk oranı	0,87
" a " özgül yüzey alanı (m^2/m^3)	1785
" d_h " hidrolik çap (mm)	1,93
" θ " eğim açısı ($^\circ$)	45

3.3.2. Statik mikser tasarımı

Deneyisel çalışmalarımızda kolon içerisinde farklı tasarımlar kullanılmasının kirletici giderimindeki etkilerini görmek ve ticari dolgu malzemesi ile kıyaslamalarını yapabilmek amacıyla bir statik mikser tasarlanmış olup; hidrojen sülfür (H_2S) giderim verimleri incelenmiştir. Tasarladığımız statik mikser kabaca mikro-venturi şeklindedir ve her birinin iç çapı 30 mm, yüksekliği ise 96 mm'dir. Şekil 3.9'da tasarlanan statik mikserin teknik resmi verilmektedir. Düzgün bir sıvı-gaz karışımı sağlamak ve temas süresini artırmak için statik mikserin içerisine Şekil 3.7'de de görüldüğü üzere dikey yönde karşılıklı ve eşit aralıklarda 11 adet şaşırtma plakaları yerleştirilmiştir.



Şekil 3.9. Tasarlanan statik mikserin teknik resmi

Statik mikserin orta kısmında bir venturi boğazı oluşturulmuştur. Yıkayıcı sıvının bu boğaz kısmında pulverize olmasıyla meydana gelen küçük damlacıklar grubu içerisinde kirli gazın tutunması amaçlanmıştır. Bununla birlikte, tasarımdan dolayı temas yüzey alanı üst ve alt kısımlarda giderek artmaktadır. Gaz kabarcıklarının sıvı içerisinde dağılmasıyla birlikte yüksek kütle transfer yüzeyi ortaya çıkmaktadır. Tablo 3.9'da statik mikserin teknik özellikleri verilmektedir.

Tablo 3.9. Statik mikserin teknik özellikleri

Özellikler	Değerler
“ d_s ” statik mikser giriş çapı (mm)	30
“ h_s ” statik mikser yüksekliği (mm)	290
“ β ” boşluk oranı	0,90
“ N_p ” plaka sayısı	11
“ T ” plaka kalınlığı (mm)	1,50

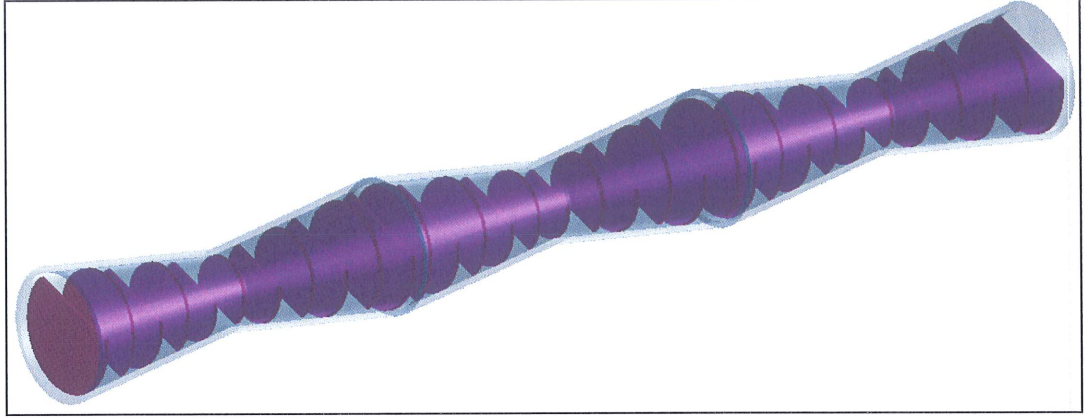
Statik mikserin içerisinde yer alan tabaka sayısı için plakalı gaz yıkayıcı kolonu tasarımından faydalanılmıştır. Buna göre giriş çapı (3.21) nolu bağıntı ile bulunabilmektedir. Bu bağıntıda, “ λ ” deneysel yöntemler ile bulunmuş bir katsayıyı ifade etmekte olup farklı plaka çeşitleri için farklı değerler almaktadır [7]. Bu tasarımda “ λ ” değeri $0,025 \text{ m}^{0,25} \text{ h}^{0,5} / \text{kg}^{0,25}$ olarak alınmıştır. Aynı bağıntıda d_s statik mikserin çapını, Q_g gaz debisini, ρ_g ise gazın yoğunluğunu ifade etmektedir. Kolon çapındaki değişikliğin kirletici giderimi üzerindeki etkisi de değerlendirilerek çap %50 oranında artırılmıştır. Buna göre, en yüksek gaz debisi göz önünde bulundurularak ve emniyet katsayısı da hesaplamalara dahil edilerek statik mikser iç çapının 30 mm olması uygun görülmüştür.

$$d_s = \lambda (Q_g \sqrt{\rho_g})^{0,5} \quad (3.21)$$

Statik mikser içerisindeki plaka sayısı, dolgu gaz yıkayıcı kolonlarındaki transfer ünite sayısının elde edilmesine benzer olarak aşağıda verilen (3.22) nolu bağıntıdan elde edilebilir. Bu bağıntıda, N_p plaka sayısını, $C_{k,g}$ giriş gazı konsantrasyonunu, $C_{k,\phi}$ ise çıkış gazı konsantrasyonunu belirtmektedir. (3.22) nolu bağıntıda emniyet katsayısı ve giderim verimi de ele alındığında bir statik mikser için toplam 11 adet plaka kullanılması uygun görülmüştür.

$$N_p = \ln \frac{C_{k,g}}{C_{k,\phi}} \quad (3.22)$$

Ticari dolgu malzemesi ile kirletici giderimi bakımından karşılaştırma yapabilmek için kolon içerisinde absorpsiyon hacmi sabit tutulacak şekilde statik mikserlerin sayısı ve yüksekliği ayarlanmıştır. Şekil 3.10’da üç adet statik mikser modülünün birleştirilmiş görüntüsü verilmektedir.



Şekil 3.10. Statik mikser modüllerinin birleştirilmiş görüntüsü

Dolgu malzemesinin kullanıldığı kolonda her bir dolgu malzemesinin boyu 53 mm'dir. Dolgulu kolon ile yapılan deney çalışmalarında 640 mm olarak hesaplanmış olan dolgu yüksekliği için kolon içerisinde oniki adet dolgu malzemesi konumlandırılmıştır. Aynı dolgu hacminde deneysel karşılaştırmalar yapabilmek amacıyla bir adeti 96 mm olan statik mikser modüllerinden üç tanesi birleştirilerek diğer kolon içerisine yerleştirilmiştir.



Şekil 3.11. Tasarlanan statik mikser ve içerisinde kullanıldığı kolon

Şekil 3.11’de tasarlanan statik mikserin fotoğrafı verilmektedir. Statik mikserin çapı, ticari dolgu malzemesinin çapından büyüktür ve iki kolonda aynı dolgu hacmini sağlamak üzere üç adet statik mikser modülü birleştirilmiştir. Buna göre, sabit dolgu hacmine sahip iki farklı kolonda deney çalışmaları yapılmıştır. Kolon içerisinde hacmin sabit tutulması, kirli gazın iki kolonda aynı süre içerisinde ne kadar giderildiğini karşılaştırmak amacıyla planlanmıştır.

Dolgu malzemesinin kullanıldığı kolonda çap daha küçük olduğundan gazın hızı statik mikserin kullanıldığı kolona göre daha yüksektir. Statik mikserli kolonda gazın hızı daha düşüktür ve dolgulu kolondaki aynı hacmin sağlanabilmesi için gerekli statik mikser yüksekliği ayarlanmıştır. Böylece gaz hızının farklı olduğu, kalma süresinin aynı olduğu iki farklı kolonda kirletici giderim deneyleri yapılmıştır.

Tasarlanan statik mikserin avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Şekil 2.13’te venturi yıkayıcılarda dar bölgede (boğaz bölümünde) daha fazla temasın olduğu, yıkamanın daha iyi olduğu tespit edilmiştir ve literatürde verilmiştir. Yapılan çalışmada statik mikser birden fazla dar boğaz operasyon noktasına sahip olduğu için verim artışı sağlanmıştır.
- Statik mikserde plakaların da ilave edilmesi akımı kırma ve yüzeyi artırma yönünden verime olumlu etki kazandırmıştır.
- Yukarıda (a) ve (b) maddelerinde belirtilen verim artışları statik mikserin toplam verimini oluşturmuştur. Statik mikserde birden fazla dar boğaz operasyon noktasının ve plakaların kullanılması ticari dolgu malzemesinin kullanılmasıyla elde edilen verimden daha yüksek verim elde edilmesini sağlamıştır.
- Statik mikserde giriş yapan akışkanlar, şaşırtma plakaları tarafından sürekli bölünmekte ve parçalanmaktadır. Bu durum akım kombinasyonlarının oluşmasına ve aynı özellikleri taşıyan bir karışımın gerçekleşmesini sağlamaktadır. Şaşırtma plakalarının mevcudiyeti akım yolunun uzamasını dolayısıyla karışımın iyi olmasına olanak vermektedir.
- Boşluk oranı ticari dolgu malzemesine göre fazladır. Bu durum, kısa sürede gaz-sıvı karışımının meydana gelmesini ve hidrojen sülfür (H_2S) ile sodyum hidroksit ($NaOH$) arasında kimyasal reaksiyonun hızlı bir şekilde gerçekleşmesine olanak sağlamaktadır.

- apı dolgu malzemesine göre büyüktür ve bundan dolayı gazın hızı yavaşlamaktadır. Ayrıca içerisinde bulunan Şaşırtma plakalarından dolayı gaz ve sıvının temas süresi artmaktadır.
- Tasarımın alt ve st yüzeylerinde geniş bir gaz-sıvı temas alanı mevcuttur. Böylece gaz ve sıvı için yüksek transfer yüzey alanı oluşur.
- Plakalar arası geçiŐlerde, küçük boŐluklarda turbulans meydana gelmekte ve kütle transferi artmaktadır. Gazın bu düzensiz geçiŐi sıvı tarafından tutulmasını kolaylaŐtırmaktadır.
- Bakımı kolaydır. Tıkanmalar olsa dahi ters akış ile temizlenmesi sağlanabilir.
- Uzun mrldr.
- İmalatı ve üretimi kolaydır.
- Dışa bağımlılığı yoktur.
- Korozyona karşı dirençli, mekanik dayanımlı, gerekli akışı sağlama özelliği vardır ve ekonomik bakımdan da uygundur.

Avantajların yanında dezavantajlar olarak Őunlar söylenebilir:

- İç kısımda bulunan plakalardan dolayı basınç düşümü meydana gelebilir.
- Ticari dolgu malzemesine göre ağırlılığı fazladır.

4. YAPILAN DENEYSSEL ÇALIŞMALAR VE ELDE EDİLEN BULGULAR

Absorbsiyon deneyleri iki farklı gaz kompozisyonunda gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada hidrojen sülfür (H₂S) içerikli simülasyon azot gazı kullanılmıştır. Hidrojen sülfür içeriği seyreltilci azot gazı yardımıyla ayarlanmıştır. Dolayısıyla azot içerisindeki hidrojen sülfür içeriği 250 ppmv, 500 ppmv, 750 ppmv ve 1000 ppmv değerlerinde ayarlanarak farklı gaz kompozisyonların giderim verimindeki etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. İkinci aşamada, hidrojen sülfür ile birlikte sodyum hidroksit (NaOH) ile reaksiyona giren karbondioksitin de giderim verimindeki etkileri incelenmiştir. Bu yüzden, %25 metan (CH₄), %25 karbondioksit (CO₂) ve balans azot gazından oluşan karışım gazı düzenlenerek gaz yıkayıcı sistemine transfer edilmiştir. Azot gazı içerisindeki hidrojen sülfür (H₂S) içeriği ilk aşamada olduğu gibi seyreltme işlemi ile 250 ppmv, 500 ppmv, 750 ppmv ve 1000 ppmv olacak şekilde ayarlanarak karışım gazı içeriğinde de farklı gaz kompozisyonlarının giderim verimi üzerindeki etkilerinin incelenmesi üzerine odaklanılmıştır. Aynı zamanda gaz giriş debilerindeki değişimin sonuçları da farklı gaz kompozisyonları dahilinde incelenmiştir.

Hidrojen sülfür giderim çalışmalarına benzer olarak amonyak giderimi incelemeleri için amonyak içerikli simülasyon azot gazı kullanılmıştır. Amonyak içeriği 125 ppmv, 250 ppmv, 375 ppmv ve 500 ppmv değerlerinde ayarlanarak azot içerikli olarak farklı gaz kompozisyonlarının farklı giriş debileri dahilinde kirletici giderim verimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Kirletici giderim verimi (4.1) nolu bağıntıda verildiği üzere giriş akımındaki kirli gaz konsantrasyonu ile çıkış akımındaki kirli gaz konsantrasyonu farkının, giriş akımındaki kirli gaz konsantrasyonuna oranı olarak tanımlanabilir. Bu bağıntıda, η_G giderim verimini, $C_{k,g}$ kolona giren kirli gazın içeriğini, $C_{k,g,ort}$ ise kolonda giderilemeyen yani çıkış gazları içeriğinin ortalamasını ifade etmektedir.

$$\eta_G = \frac{(C_{k,g} - C_{k,g,ort})}{C_{k,g}} \times 100 \quad (4.1)$$

Farklı akış yönlerinin giderim veriminde meydana getirdiği değişimlerin incelenmesi amacıyla dolgulu kolonda azot içerikli hidrojen sülfür (H₂S) ve amonyak (NH₃) giderimi deneysel çalışmaları karşıt ve eş yönlü akışlı olarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarının son aşamasında, kolon içerisinde tasarlanmış olan statik mikser kullanılarak hidrojen sülfür ve karbondioksit giderim verimleri de incelenmiştir. Sadece statik mikserli kolonda olmak üzere hidrojen sülfür ve karbondioksit gideriminin zamana göre göre değişimleri ve stabil hale gelme durumları da gözlenmiştir.

Dolgulu kolonda ve statik mikserli kolonda, azot içeriğinde ve karışım gazı içeriğinde hidrojen sülfür ve karbondioksit giderimi çalışmaları yapılırken sistemde yıkayıcı sıvı olarak pH değeri 11 olan sodyum hidroksit çözeltisi kullanılmıştır. Amonyakın suda çözünme özelliğinden dolayı, amonyak giderimi çalışmalarında ise sistemde yıkayıcı sıvı olarak su kullanılmıştır.

4.1. Dolgulu Kolonda Hidrojen Sülfür Giderim Çalışmaları

Hidrojen sülfür giderimi için yapılan deneysel çalışmaları ilk aşamada dolgulu kolonda azot içeriğinde gerçekleştirilmiştir. İşletme parametreleri ve deney çalışmaları sonunda elde edilen sonuçlar ekler bölümünde tablolar halinde verilmiştir.

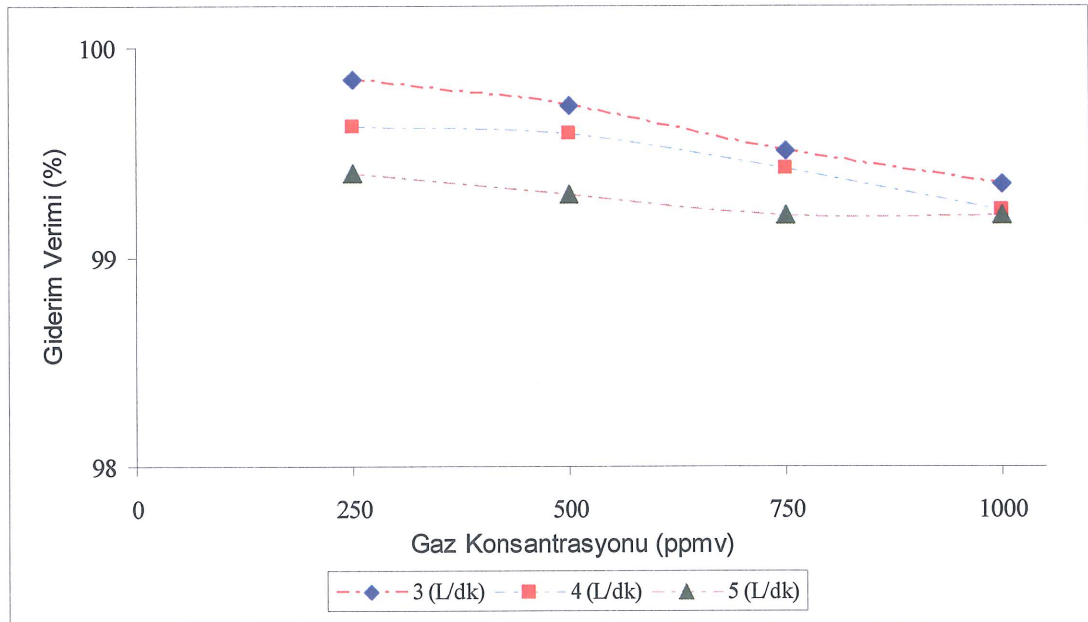
4.1.1. Azot içerikli hidrojen sülfür giderim çalışmaları

Azot içeriğinde yapılan hidrojen sülfür giderim incelemeleri farklı giriş debileri ve gaz kompozisyonları dahilinde karşıt ve eş yönlü akışlar doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Tablo 4.1’de azot içeriğinde karşıt ve eş yönlü akışta hidrojen sülfür giderimi incelemeleri için işletme parametreleri verilmektedir. Tabloda da görüldüğü üzere deney çalışmalarımız, gazın debisi 3 (L/dk), 4 (L/dk) ve 5 (L/dk) olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Yıkayıcı sıvının debisi sabit tutulup 2,5 (L/h)’dir. Buna göre sıvı-gaz oranı 8 (L/m³), 10 (L/m³) ve 13,5 (L/m³) arasında değişmektedir. Azot içerikli hidrojen sülfür giderim çalışmalarına ait deney sonuçları Tablo A.15- Tablo A.20 arasında verilmektedir.

Tablo 4.1. Dolgulu kolonda azot içerikli hidrojen sülfür giderimi için işletme parametreleri

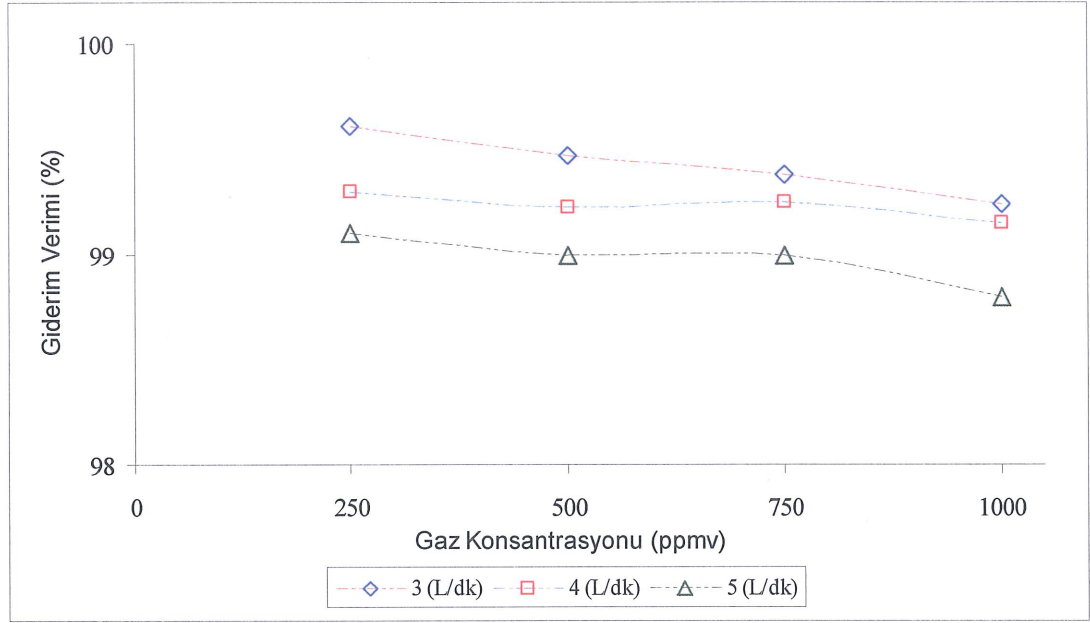
Parametreler	İşletim koşulları		
	3,0	4,0	5,0
Gaz giriş debisi (L/dk)	3,0	4,0	5,0
Sıvı debisi (L/h)	2,5	2,5	2,5
Sıvı/gaz oranı (L/m ³)	13,5	10	8
Gaz hızı (m/s)	0,15	0,20	0,25
Gaz kalış süresi (s)	4,0	3,0	2,4

Şekil 4.1’de azot içeriğinde karşıt akışlı modda gerçekleştirilen hidrojen sülfür (H₂S) giderimi çalışmalarında giriş gazı debisinin giderim verimi üzerindeki etkisi gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Dolgulu kolonda karşıt akışlı modda azot içerikli H₂S gideriminde gaz debisinin verim üzerine etkisi

Şekil 4.1’de görüldüğü üzere, gaz giriş debileri değiştirilerek farklı gaz kompozisyonlarında yapılan çalışmalar neticesinde gaz kompozisyonunun artmasıyla hidrojen sülfür giderim veriminde az da olsa bir düşüş (~%3) kaydedilmiştir. Kolona giriş yapan gazın debisi artırıldığında, kirli gaz daha hızlı bir akış sergilediğinden yıkayıcı akışkan ile temas süresi azalmıştır ve bunun sonucunda giderim veriminde bir miktar azalma görülmüştür. Hidrojen sülfür tutma performansında gerçekleşen bu olumsuz etki, kolon içerisinde yıkayıcı sıvı damlacıklarının gaz hızının artmasıyla meydana gelen sürüklenme olayından kaynaklanmaktadır [2,16,35,43].



Şekil 4.2. Dolgulu kolonda eş-yönlü akışlı modda azot içerikli H₂S gideriminde gaz debisinin verim üzerine etkisi

Karşıt akışlı çalışmalarla kıyaslama yapabilmek açısından aynı gaz giriş debilerinde ve gaz kompozisyonlarında eş yönlü akış modunda da deneysel çalışmalar yapılmıştır. Şekil 4.2’de dolgulu kolonda eş-yönlü akışlı modda gerçekleştirilen azot içerikli hidrojen sülfür (H₂S) giderimi çalışmalarında giriş gazı debisinin giderim verimi üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Şekilde de görüldüğü üzere azot içeriğinde yapılan eş yönlü akışlı çalışmalarda hidrojen sülfür giderim verimi karşıt akışlı deney sonuçlarına yakın olarak %99 civarındadır. Deney sonunda kaydedilen verimde azalma oranlarına bakıldığında sodyum hidroksit solüsyonunun yıkayıcı sıvı olarak kullanıldığı azot içerikli çalışmalarda, kirli gazın konsantrasyonundaki ve giriş debisindeki artış, tasarlanan sistemde giderim verimini etkilemediğini göstermektedir.

4.1.2. Karışım gazı içerikli hidrojen sülfür giderim çalışmaları

Azot içerikli çalışmalara ilave olarak, hidrojen sülfür (H₂S) gideriminin karbondioksit (CO₂), metan (CH₄) ve azot (N₂) gazlarından oluşan karışım gazı içeriğindeki davranışları da incelenmiştir. Karışım gazı içeriğinde yapılan kirletici giderimi deney çalışmaları da azot içeriğindeki işletme parametreleri dahilinde yapılmış olup; tek koşul için eş yönlü akış durumundaki etkiler de gözlenmiştir.

Tablo 4.2’de giriş gazı debisinin 3 (L/dk) olduğu deneysel çalışmada, farklı gaz kompozisyonlarındaki koşullar için karışım gazlarının oranları gösterilmektedir.

Tablo 4.2. Dolgulu kolonda 3 (L/dk) karışım gazı içeriğinde karşıt akışlı modda deney için gaz kompozisyonları

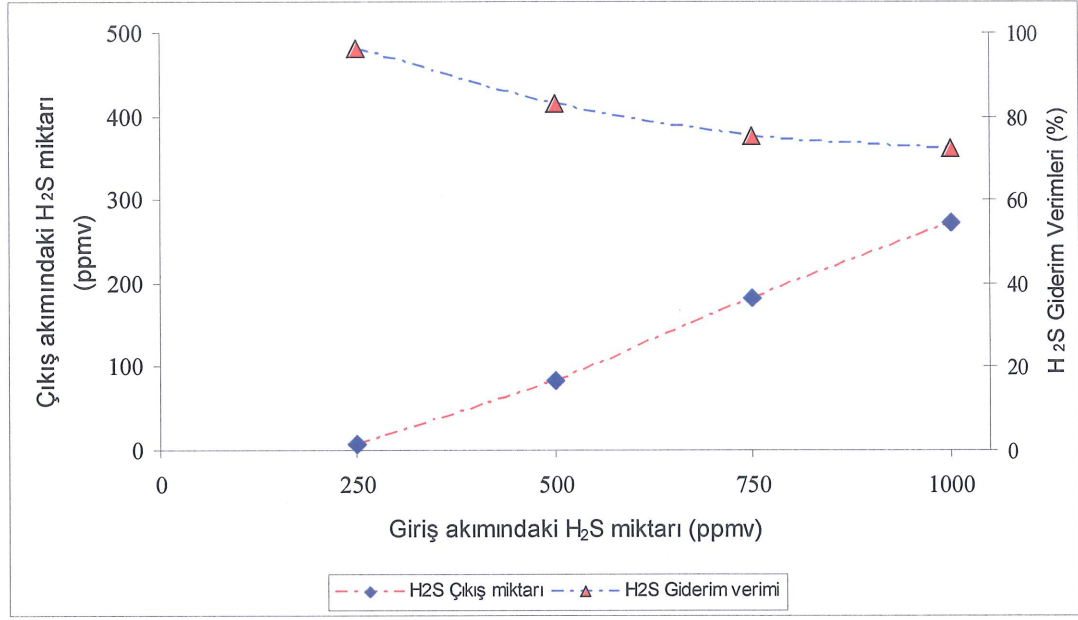
GAZLAR	1. Koşul	2. Koşul	3. Koşul	4. Koşul
H ₂ S + N ₂	250 ppm; 0,38(L/dk)	500 ppm; 0,75 (L/dk)	750 ppm; 1,15 (L/dk)	1000 ppm; 1,50 (L/dk)
N ₂	1,12 (L/dk)	0,75 (L/dk)	0,35 (L/dk)	-
CO ₂	0,75 (L/dk)	0,75 (L/dk)	0,75 (L/dk)	0,75 (L/dk)
CH ₄	0,75 (L/dk)	0,75 (L/dk)	0,75 (L/dk)	0,75 (L/dk)

Tasarlanan sistemin hesaplanan giderim verimi ile deneyler sonucu elde edilen veriler yaklaşık olarak karşılaştırılabilmesi açısından aşağıda gösterildiği gibi (3.10) ve (3.11) nolu bağıntılardan yararlanılarak (4.2) nolu bağıntı elde edilmiştir. (4.1) nolu bağıntıda belirtildiği üzere giderim verimi, giriş akımındaki kirli gaz konsantrasyonu ile çıkış akımındaki kirli gaz konsantrasyonu farkının, giriş akımındaki kirli gaz konsantrasyonuna oranı olarak tanımlanabilir. Bu durumda, (4.1) nolu bağıntıda belirtilen çıkış akımındaki kirli gaz konsantrasyonu yerine (4.2) nolu bağıntı yazılabilir ve giderim verimi (4.3) nolu bağıntıda verildiği gibi ifade edilebilir. Buna göre (4.2) ve (4.3) nolu bağıntılarda, η_G giderim verimini, $C_{k,g}$ kolona giren kirli gazın içeriğini, $C_{k,\phi}$ kolonda giderilemeyen yani çıkış gazının içeriğini, h_d ve h_t ise sırasıyla dolgu yüksekliğini ve transfer ünite yüksekliğini ifade etmektedir.

$$C_{k,\phi} = C_{k,g} \exp\left(-\frac{h_d}{h_t}\right) \quad (4.2)$$

$$\eta_G = \frac{C_{k,g} - C_{k,\phi} \exp\left(\frac{h_d}{h_t}\right)}{C_{k,g}} \times 100 \quad (4.3)$$

Yukarıda verilen (4.3) nolu bağıntıda girişteki ve çıkıştaki gaz kompozisyonları ile önceki bölümde elde edilmiş olan dolgu ve transfer ünite yüksekliklerinin değerleri yerine yazıldığında tasarlanan dolgulu kolondaki kirletici giderim verimi yaklaşık %87 olarak belirlenmektedir.



Şekil 4.3. Dolgulu kolonda, karşıt akışlı modda 3 (L/dk) karışım gazı içerikli çalışmada giriş akımındaki H₂S miktarlarına göre çıkış akımındaki H₂S miktarları ve H₂S giderim verimleri

Şekil 4.3'de ekler bölümünde Tablo A.1'de verilen sonuçlara göre dolgulu kolonda, karışım gazı içeriğinde, karşıt akışlı modda giriş gazı debisinin 3 (L/dk) olduğu deneysel çalışmada giriş akımındaki hidrojen sülfür miktarına karşılık çıkış akımındaki hidrojen sülfür miktarları ve hidrojen sülfür giderim verimleri belirtilmektedir. Şekilde de görüldüğü üzere kirletici gaz içeriği arttıkça çıkış akımındaki kirletici miktarı da artmaktadır. Giderim verimini çıkış akımındaki kirletici miktarı belirlemektedir. Buna göre çıkış akımındaki kirletici miktarı arttıkça giderim verimi azalmaktadır. Giriş akımındaki H₂S konsantrasyonu 250 ppmv olduğunda giderim verimi yaklaşık %96, 1000 ppmv olduğunda ise giderim verimi %72 civarındadır. Kirletici gaz içeriği, farklı gazlardan sağlanan karışım ortamında dört kat artırıldığında hidrojen sülfür giderim veriminde yaklaşık %24 azalma kaydedilmiştir.

Hidrojen sülfür (H₂S) gideriminde karbondioksitin (CO₂) olumsuz bir etkisi olduğu deney çalışmalarında görülmüştür. Yıkayıcı sıvının karakterizasyonunu belirleme bölümünde bahsedildiği üzere sodyum hidroksit (NaOH) karbondioksiti tutma özelliği de bulunmaktadır. (3.13) nolu bağıntıda tanımlanan reaksiyonda 2 mol sodyum hidroksit (NaOH), 1 mol karbondioksit (CO₂) ile tepkimeye girdiğinde 1 mol sodyum karbonat (Na₂CO₃) açığa çıkmaktadır. Böylece, kolon içerisinde

püskürtülen yıkayıcı sıvı ile hidrojen sülfür gideriminin yanında bir miktar karbondioksit absorblama işlemi de gerçekleşmiştir. Bu durum literatürdeki çalışmalar tarafından da doğrulanmaktadır [89,98,99].

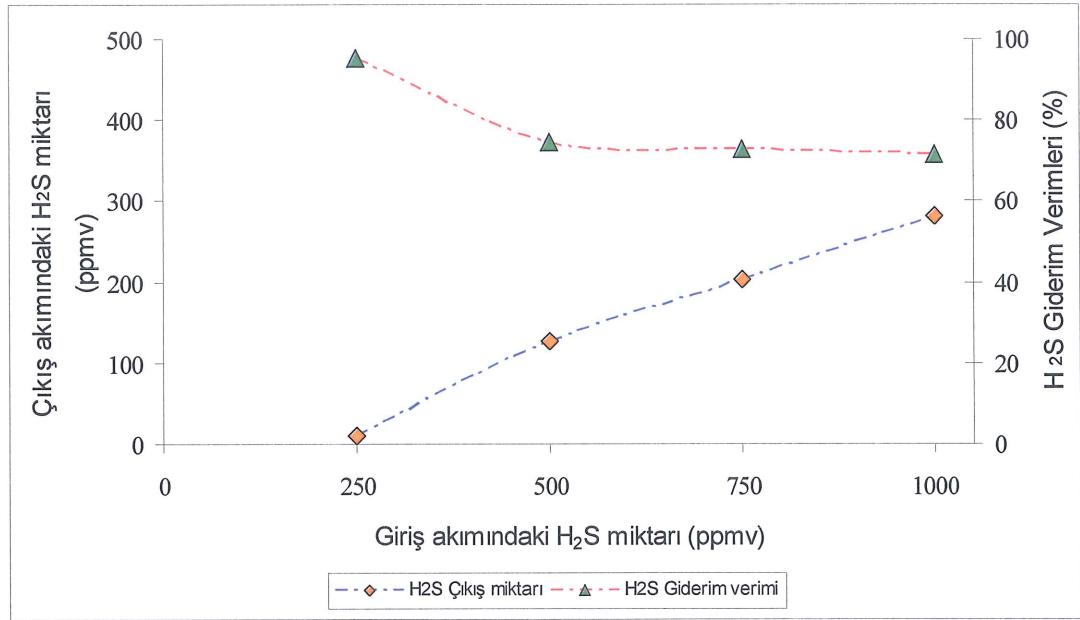
Kirletici konsantrasyonu artarken yıkayıcı sıvı miktarının sabit kalması, giderilen kirletici miktarını da sınırlamaktadır. Sodyum hidroksit konsantrasyonun artırılması ile yüksek içerikli hidrojen sülfür giderimi sağlanabilir ancak kirli gaz içerisinde karbondioksit içeriğinin artması sodyum hidroksit tüketimini arttırmakta olup; hidrojen sülfür giderimini azaltmaktadır [9,13,19]. Yıkayıcı sıvı debisinin ve konsantrasyonunun sabit kalmasıyla birlikte hidrojen sülfür içeriğinin artmasından dolayı sodyum hidroksit solüsyonu kirletici ile doyumluğa ulaşmakta ve daha az kirletici giderilmektedir.

Tablo 4.3'te giriş gazı debisinin 4 (L/dk) olduğu deneysel çalışmada, farklı gaz kompozisyonlarındaki koşullar için karışım gazlarının oranları gösterilmektedir

Tablo 4.3. Dolgulu kolonda 4 (L/dk) karışım gazı içeriğinde karşıt akışlı modda deney için gaz kompozisyonları

GAZLAR	1. Koşul	2. Koşul	3. Koşul	4. Koşul
H ₂ S + N ₂	250 ppm; 0,5 (L/dk)	500 ppm; 1,0 (L/dk)	750 ppm; 1,5 (L/dk)	1000 ppm; 2,0 (L/dk)
N ₂	1,5 (L/dk)	1,0 (L/dk)	0,5 (L/dk)	-
CO ₂	1,0 (L/dk)	1,0 (L/dk)	1,0 (L/dk)	1,0 (L/dk)
CH ₄	1,0 (L/dk)	1,0 (L/dk)	1,0 (L/dk)	1,0 (L/dk)

Şekil 4.4'te Tablo A.3'te verilen sonuçlara göre dolgulu kolonda, karşıt akışlı modda karışım gazı içeriğinde giriş gazı debisinin 4 (L/dk) olduğu deneysel çalışmada giriş akımındaki hidrojen sülfür miktarına karşılık çıkış akımındaki hidrojen sülfür miktarları ve hidrojen sülfür giderim verimleri belirtilmektedir. Şekilde de görüldüğü üzere giriş akımındaki kirletici konsantrasyonu arttıkça, çıkış akımındaki kirletici miktarı da artmaktadır. Giriş akımındaki H₂S konsantrasyonu 250 ppmv olduğunda giderim verimi yaklaşık %95, 1000 ppmv olduğunda ise giderim verimi %71,8 civarındadır.



Şekil 4.4. Dolgulu kolonda, karşıt akışlı modda 4 (L/dk) karışım gazı içerikli çalışmada giriş akımındaki H₂S miktarlarına göre çıkış akımındaki H₂S miktarları ve H₂S giderim verimleri

Sistemde gaz debisinin artması sıvı-gaz debileri oranını etkilemektedir. Yıkayıcı sıvı debisi sabit tutulmasından dolayı bir önceki çalışmaya nazaran sıvı tarafından absorblanması gereken kirli gaz miktarı artmış bulunmaktadır. Bunun sonucunda giderim veriminde azalma yaşanmaktadır. Gaz debisinin artmasıyla hız artacağından kirli gazın ıslak bölgedeki kalma zamanı azalmaktadır.

Yıkayıcı solüsyon debisinin artırılması gaz yıkayıcı performansını doğrudan etkilemektedir çünkü sıvı fazda kütle transfer dayanımı bu durumda oldukça büyüktür. Gaz yıkayıcıda optimum koşullar sağlamak için dolgu malzemesindeki ıslanmış yüzey ve sıvı tabakasının kalınlığı solüsyon debisinin ayarlanmasıyla sağlanabilir [1,37,41].

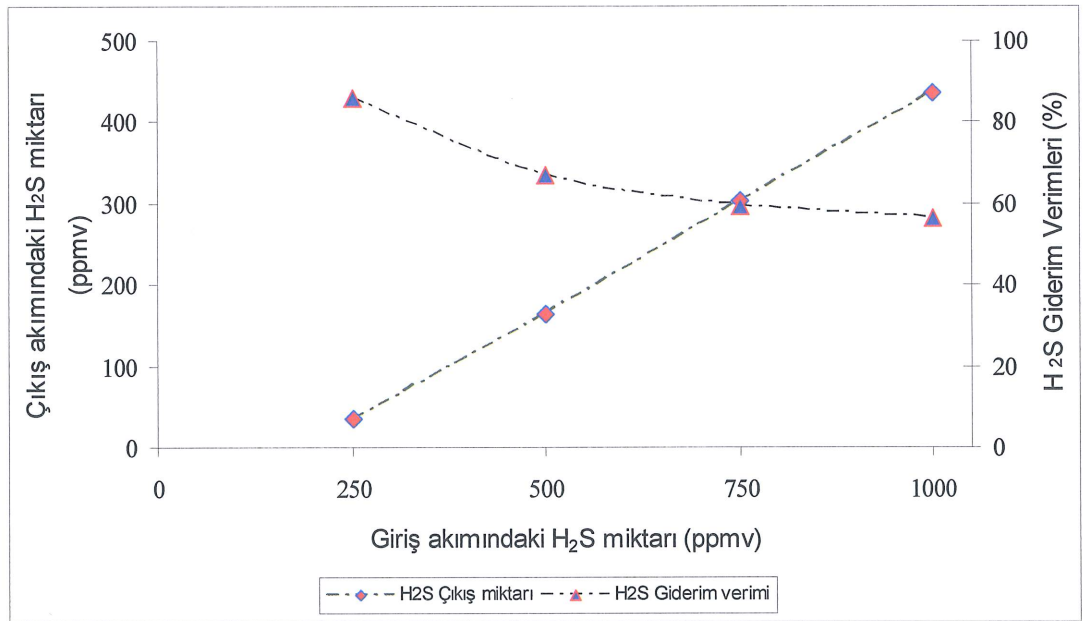
Yüksek sıvı debilerinde, damlacıklardaki direnç ve sıvı fazda kütle transferi artmaktadır ancak sıvı debisinin artırılmasıyla damlacıkların ortalama çapları küçülmektedir ve bu iki etki zıt yönde gelişmektedir. Damlacıkların küçülmesi kolon içerisindeki sirkülasyonla birlikte kütle transferini azaltmaktadır [2]. Bu yüzden sıvı debisinin optimum bir değerde ayarlanması giderim verimi açısından önemlidir.

Tablo 4.4'te giriş gazı debisinin 5 (L/dk) olduğu deneysel çalışmada, farklı gaz kompozisyonlarındaki koşullar için karışım gazlarının oranları gösterilmektedir.

Tablo 4.4. Dolgulu kolonda 5 (L/dk) karışım gazı içeriğinde karşıt akışlı modda deney için gaz kompozisyonları

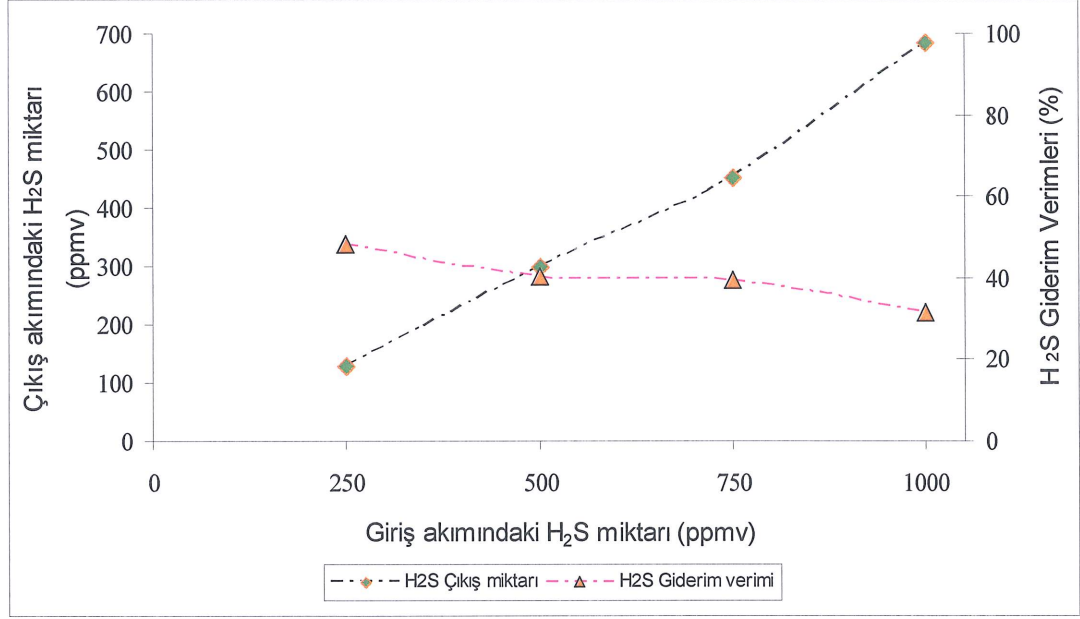
GAZLAR	1. Koşul	2. Koşul	3. Koşul	4. Koşul
H ₂ S + N ₂	250 ppm; 0,62 (L/dk)	500 ppm; 1,25 (L/dk)	750 ppm; 1,88 (L/dk)	1000 ppm; 2,5 (L/dk)
N ₂	1,88 (L/dk)	1,25 (L/dk)	0,62 (L/dk)	-
CO ₂	1,25 (L/dk)	1,25 (L/dk)	1,25 (L/dk)	1,25 (L/dk)
CH ₄	1,25 (L/dk)	1,25 (L/dk)	1,25 (L/dk)	1,25 (L/dk)

Şekil 4.5'te, Tablo A.5'teki sonuçlara göre dolgulu kolonda, karşıt akışlı modda karışım gazı içeriğinde giriş gazı debisinin 5 (L/dk) olduğu deneysel çalışmada giriş akımındaki hidrojen sülfür miktarına karşılık çıkış akımındaki hidrojen sülfür miktarları ve hidrojen sülfür giderim verimleri belirtilmektedir. Giriş akımındaki H₂S konsantrasyonu 250 ppmv olduğunda giderim verimi yaklaşık %85, 1000 ppmv olduğunda ise giderim verimi %56 civarındadır. Dolayısıyla iriş debisinin 3 (L/dk) olduğu çalışmaya nazaran sabit yıkayıcı sıvı debisi şartları altında, gaz debisinin yaklaşık %65 civarında artırılması kirletici giderim veriminin %11-16 arasında azalmasına neden olmuştur.



Şekil 4.5. Dolgulu kolonda, karşıt akışlı modda 5 (L/dk) karışım gazı içerikli çalışmada giriş akımındaki H₂S miktarlarına göre çıkış akımındaki H₂S miktarları ve H₂S giderim verimleri

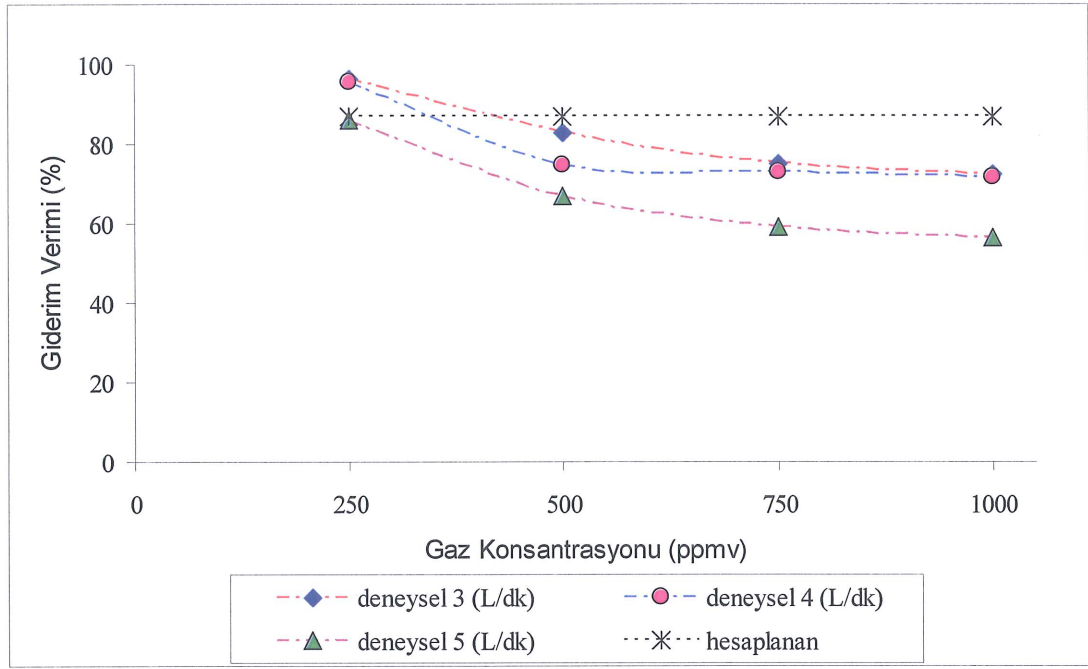
Önceki çalışmalara benzer olarak kirli gaz içeriğinde karbondioksit bulunması yıkayıcı solüsyonun etkinliğini sınırladığından hidrojen sülfür giderimini olumsuz etkilemiştir.



Şekil 4.6. Dolgulu kolonda, eş-yönlü akışlı modda 3 (L/dk) karışım gazı içerikli çalışmada giriş akımındaki H₂S miktarlarına göre çıkış akımındaki H₂S miktarları ve H₂S giderim verimleri

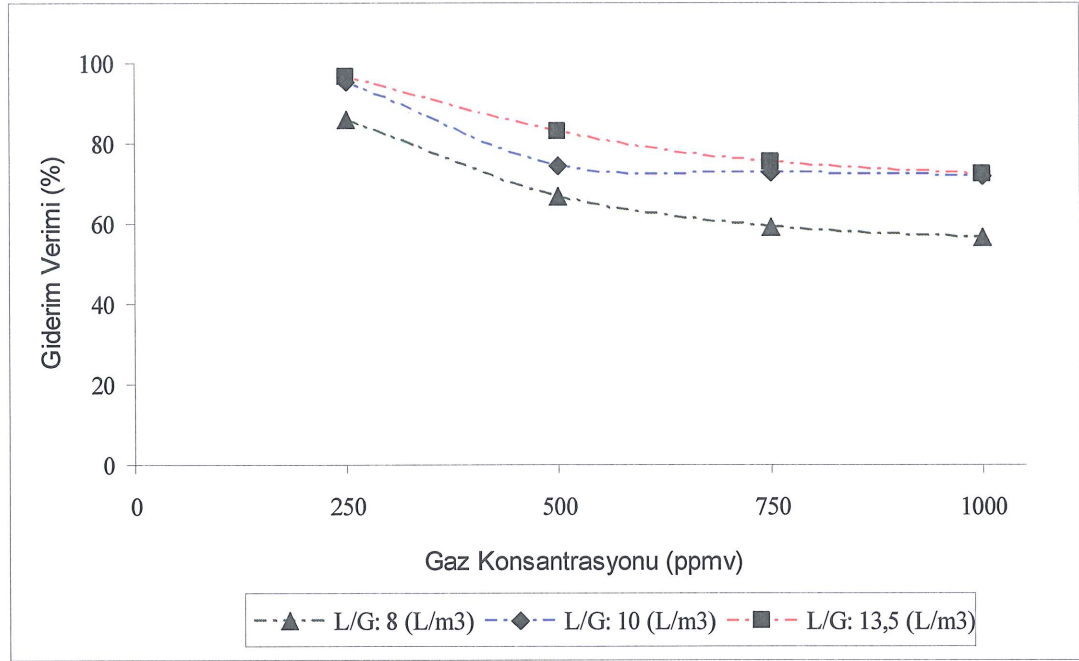
Şekil 4.6'da dolgulu kolonda karışım gazı içeriğinde eş-yönlü akış modunda giriş gazı debisinin 3 (L/dk) olduğu deneysel çalışmada giriş akımındaki hidrojen sülfür miktarına karşılık çıkış akımındaki hidrojen sülfür miktarları ve hidrojen sülfür giderim verimleri belirtilmektedir. Karşıt akışlı deneysel çalışmalara benzer bir şekilde eş-yönlü akışlı modda giriş akımındaki kirletici konsantrasyonu arttıkça çıkış akımındaki kirletici miktarı artmıştır.

Kolon içerisinde kirli gazın ve yıkayıcı solüsyonun aynı yönde transfer edilmesiyle karşıt akışlı çalışmalara oranla oldukça az giderim verimi sağlanmıştır. Karşıt akışlı sıvı-gaz hattı, eş yönlü akış hattına göre daha yüksek kütle transferine sahiptir çünkü gaz fazında sınır tabakası karşıt akışlı hatta daha zayıftır. Gaz film tabakasının ince olması kirleticinin kolay bir şekilde giderilmesini sağlamaktadır. Tasarlanan sistemde eş yönlü akışlı giderim verimi aynı çalışma koşullarındaki karşıt akışlı deneysel sonuçlarına göre %40-48 oranında azalma göstermiştir.



Şekil 4.7. Dolgulu kolonda öngörülen kirletici giderim verimi ile karışım gazı içeriğinde farklı koşullardaki deneysel çalışmaların karşılaştırılması

Şekil 4.7’de tasarlanan gaz yıkayıcı sisteminde dolgulu kolonda öngörülen kirletici giderim verimi ile farklı koşullardaki deneysel çalışmaları karşılaştırılmaktadır. Şekilde de görüldüğü üzere karışım gazları içeriğinde üç farklı koşul için 250 ppmv hidrojen sülfür giderimi öngörülen değerin üzerindedir. Hidrojen sülfür içeriğinin 500 ppmv, gaz giriş debisinin ise 3 L/dak olduğu deneysel çalışmalarda ise giderim verimi hesaplanan değere oldukça yakındır. Gaz konsantrasyonunun ve giriş debisinin artırılması sonucu giderim oranında azalma gerçekleşmiştir. Bu durum, sodyum hidroksit solüsyonunun bir kısmının karışım gazı içerisinde yer alan karbondioksit ile etkileşimde bulunarak absorblamaya harcanmasından kaynaklanmıştır. Kirletici gazın sadece karbondioksit olduğu çalışmalarda yıkayıcı sıvı olarak sodyum hidroksit çözeltisinin kullanılmasıyla olumlu sonuçlar elde edilmiştir [98,99].



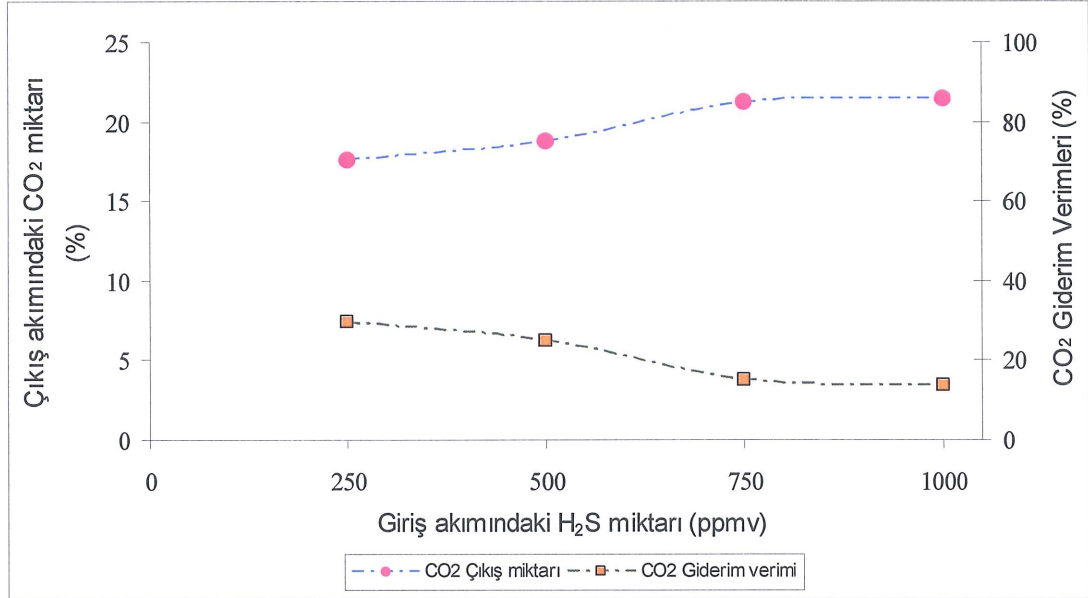
Şekil 4.8. Dolgulu kolonda karışım gazı içeriğinde karşıt akışlı deneylerde H₂S giriş akımına göre farklı L/G oranlarının verim üzerine etkisi

Dolgulu kolonda karışım gazı içeriğinde hidrojen sülfür giderimindeki sıvı-gaz oranının sistem verimine etkisi Şekil 4.8’de verilmektedir. Gaz yıkayıcı sisteminde sıvı debisi sabit olduğundan gaz debisi azaldığında sıvı-gaz oranı artmaktadır. Sistemde sıvı-gaz oranının %60 arttırılmasıyla hidrojen sülfür giderim veriminde %10-15 arasında iyileşme gözlenmiştir çünkü dolgu malzemesinden geçen sıvı miktarı ve solüsyon kalma süresi artmaktadır. Dolayısıyla fazla sıvı miktarı kolon içerisinde temas yüzey alanını genişleterek kirletici giderimini iyileştirmektedir [14,17,19,55].

4.2. Dolgulu Kolonda Karbondioksit Giderimi

Dolgulu kolonda karışım gazı içeriğinde hidrojen sülfür giderimi deneysel çalışmaları esnasında, karışım gazı içerisinde karbondioksit de bulunduğu için karbondioksit giderimi de incelenmiştir. Hidrojen sülfür giderimi esnasında yıkayıcı sıvı olarak sodyum hidroksit kullanıldığından, sodyum hidroksitin karbondioksit ile reaksiyona girmesinden dolayı hidrojen sülfür gideriminin yanında karbondioksitin de giderildiği görülmüştür. Şekil 4.9’da ekler bölümünde Tablo A.2’deki deney sonuçlarına göre dolgulu kolonda karşıt akışlı modda 3 (L/dk) karışım gazı içeriğinde hidrojen sülfür giriş konsantrasyonuna göre karbondioksitin çıkış akımındaki

miktarları ve karbondioksit giderim verimindeki değişiklikler verilmektedir. Deneysel çalışmalarımızda karbondioksitin oranı sabit olup %25'tir, bu yüzden H₂S giderim çalışmaları esnasında karbondioksit giderimi incelendiğinden çıkış akımındaki oranlar ve verim değerleri H₂S giriş değerlerine göre değerlendirilmiştir.

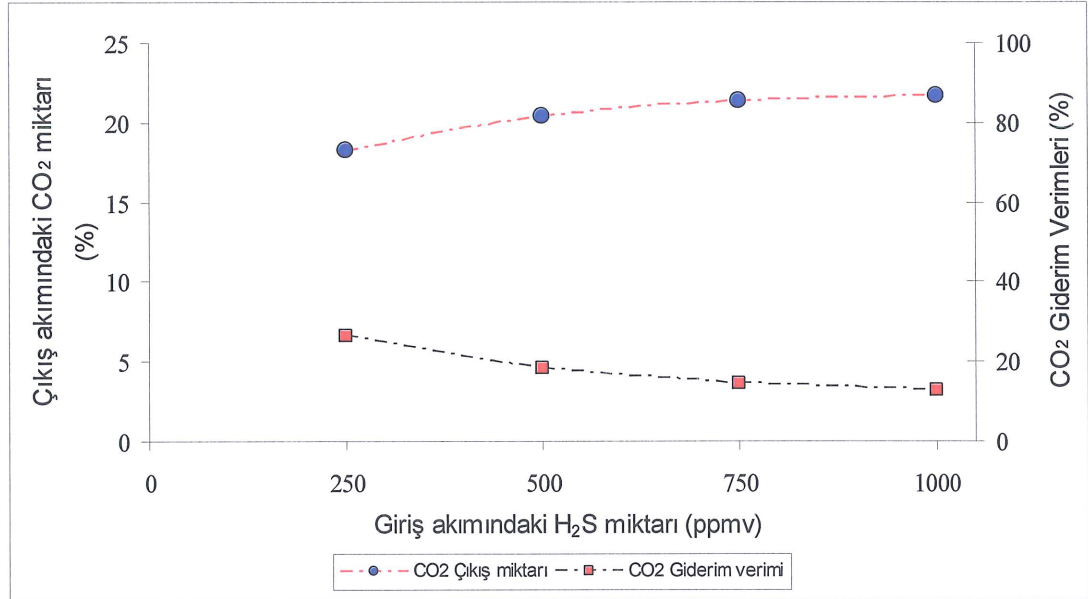


Şekil 4.9. Dolgulu kolonda, karşıt akışlı modda 3 (L/dk) karışım gazı içerikli çalışmada giriş akımındaki H₂S miktarlarına göre çıkış akımındaki CO₂ miktarları ve CO₂ giderim verimleri

Şekil 4.9'da da verildiği gibi karbondioksitin çıkış akımındaki oranı %17 ile %21,5 arasındadır. Buna göre, giriş akımında hidrojen sülfür içeriği 250 ppmv olduğu durumda karbondioksitin tutunma oranı %29, 1000 ppmv olduğu durumda ise %13 civarındadır. Hidrojen sülfür konsantrasyonu arttıkça karbondioksit gideriminin de azaldığı görülmektedir. Aynı proses esnasında, Şekil 4.3'te görüldüğü gibi hidrojen sülfür veriminde de azalma görülmüştür. Yani hidrojen sülfür giriş konsantrasyonunun artması hem hidrojen sülfür giderim veriminde hem de karbondioksit giderim veriminde azalmaya neden olmuştur.

Aynı deneysel çalışma içerisinde hidrojen sülfür ile birlikte karbondioksit giderimi incelemesi yapıldığından, hidrojen sülfür giderim çalışmalarında olduğu gibi karbondioksit gideriminde de farklı giriş debilerinin karbondioksit giderim verimine etkisi de gözlenmiştir. Şekil 4.10'da ekler bölümünde Tablo A.4'te verilen deney sonuçlarına göre dolgulu kolonda karşıt akışlı modda 4 (L/dk) karışım gazı içeriğinde

hidrojen sülfür giriş konsantrasyonuna göre karbondioksitin çıkış akımındaki miktarları ve karbondioksit giderim verimindeki değişiklikler verilmektedir.

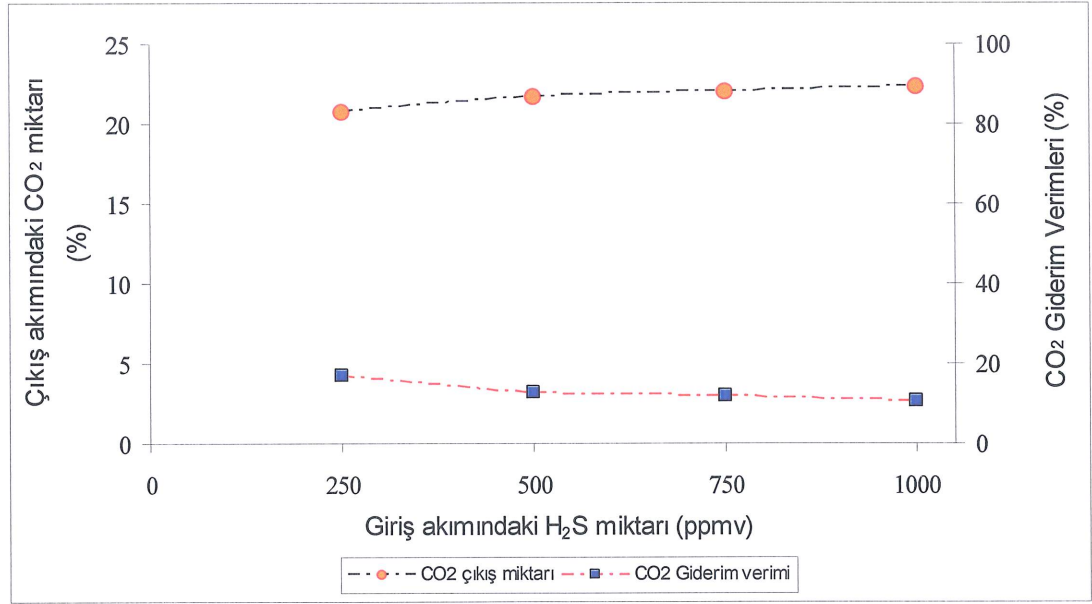


Şekil 4.10. Dolgulu kolonda, karşıt akışlı modda 4 (L/dk) karışım gazı içerikli çalışmada giriş akımındaki H₂S miktarlarına göre çıkış akımındaki CO₂ miktarları ve CO₂ giderim verimleri

Şekil 4.10'da da verildiği gibi 250 ppmv ve 1000 ppmv konsantrasyonları arasında giriş akımındaki hidrojen sülfür miktarlarına göre karbondioksitin çıkış akımındaki oranı %18 ile %21,7 arasındadır. Giriş akımında hidrojen sülfür içeriği 250 ppmv olduğu durumda karbondioksitin tutunma oranı %26,5; 1000 ppmv olduğu durumda ise %12,8 civarındadır. Buna göre 3 (L/dk) karışım gazı içerikli çalışmaya oranla giriş debisi 4 (L/dk)'ya artırıldığında karbondioksit giderim veriminde yaklaşık %2,5 oranında azalma meydana gelmiştir.

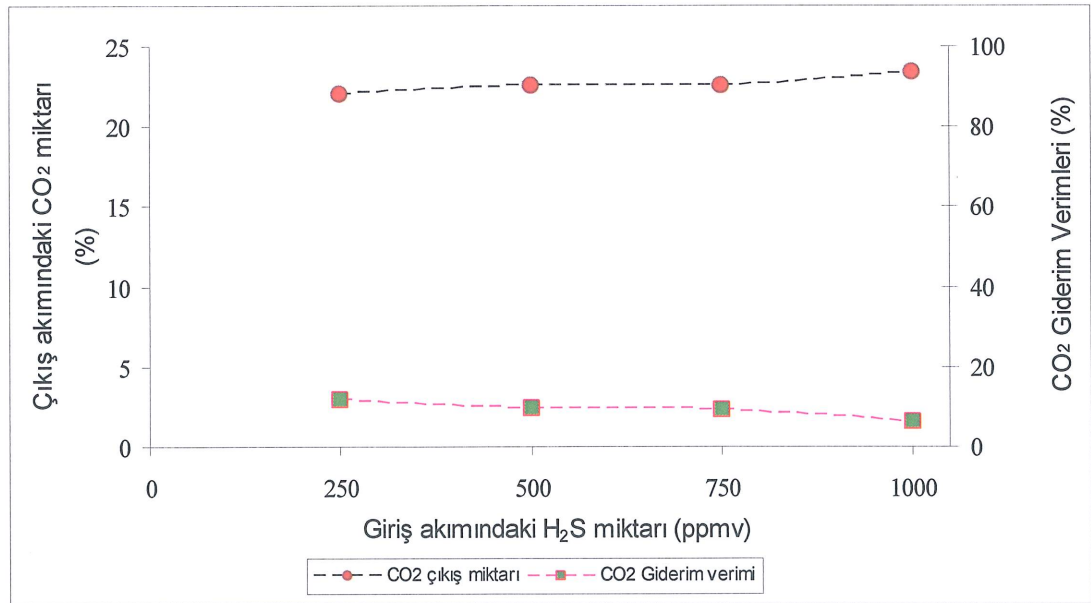
Şekil 4.11'de ekler bölümünde Tablo A.6'daki deney sonuçlarına göre dolgulu kolonda karşıt akışlı modda 5 (L/dk) karışım gazı içeriğinde hidrojen sülfür giriş konsantrasyonuna göre karbondioksitin çıkış akımındaki miktarları ve karbondioksit giderim verimindeki değişiklikler verilmektedir.

Toplam gaz debisinin artmasıyla hidrojen sülfürde olduğu gibi karbondioksit absorblama veriminde de azalma saptanmıştır. Şekil 4.11'de karbondioksit giderim veriminde 3 (L/dk)'lık çalışmaya göre %3-10 arasında azalma olduğu görülmektedir.



Şekil 4.11. Dolgulu kolonda, karşıt akışlı modda 5 (L/dk) karışım gazı içerikli çalışmada giriş akımındaki H₂S miktarlarına göre çıkış akımındaki CO₂ miktarları ve CO₂ giderim verimleri

Şekil 4.12’de dolgulu kolonda eş-yönlü akışlı modda 3 (L/dk) karışım gazı içeriğinde giriş akımındaki H₂S miktarlarına göre çıkış akımındaki CO₂ miktarlarını ve CO₂ giderim verimlerini verilmektedir. Şekil 4.9’da hidrojen sülfür gideriminde olduğu gibi eş-yönlü akışlı modda da karbondioksit giderim verimi oldukça düşüktür.



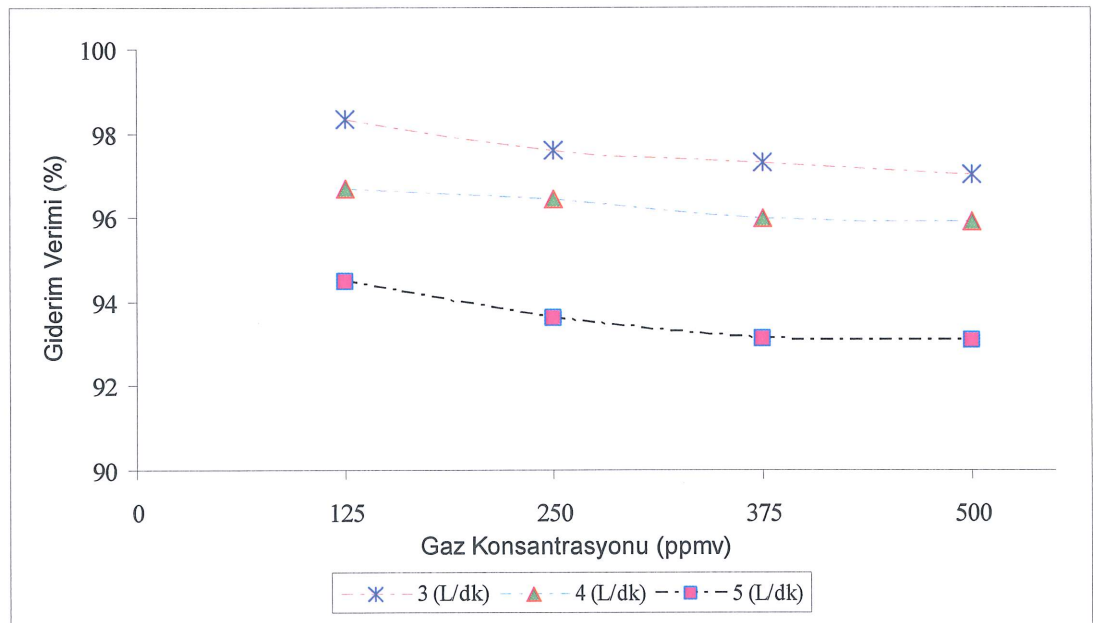
Şekil 4.12. Dolgulu kolonda, eş-yönlü akışlı modda 3 (L/dk) karışım gazı içerikli çalışmada giriş akımındaki H₂S miktarlarına göre çıkış akımındaki CO₂ miktarları ve CO₂ giderim verimleri

4.3. Dolgulu Kolonda Amonyak Giderim Çalışmaları

Kolon içerisinde amonyak giderimi çalışmaları hidrojen sülfür giderimi deneysel incelemelerinde olduğu gibi farklı giriş debileri ve gaz kompozisyonları dahilinde karşıt ve eş yönlü akışlar doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Amonyak giderimi için yapılan incelemeler azot içerikli olarak yapılmış olup; gaz yıkayıcı sisteminde aynı dolgulu kolon kullanılmıştır. Hidrojen sülfür giderimi çalışmalarında yıkayıcı sıvı olarak kullanılan sodyum hidroksit çözeltisinden farklı olarak amonyak giderimi çalışmalarında yıkayıcı sıvı olarak su kullanılmıştır. Tablo 4.5'te azot içerikli olarak karşıt ve eş yönlü akış modunda amonyak giderimi incelemeleri için işletme parametreleri verilmektedir. İşletme parametreleri ve deney çalışmaları sonunda elde edilen sonuçlar ekler bölümünde tablolar halinde verilmiştir.

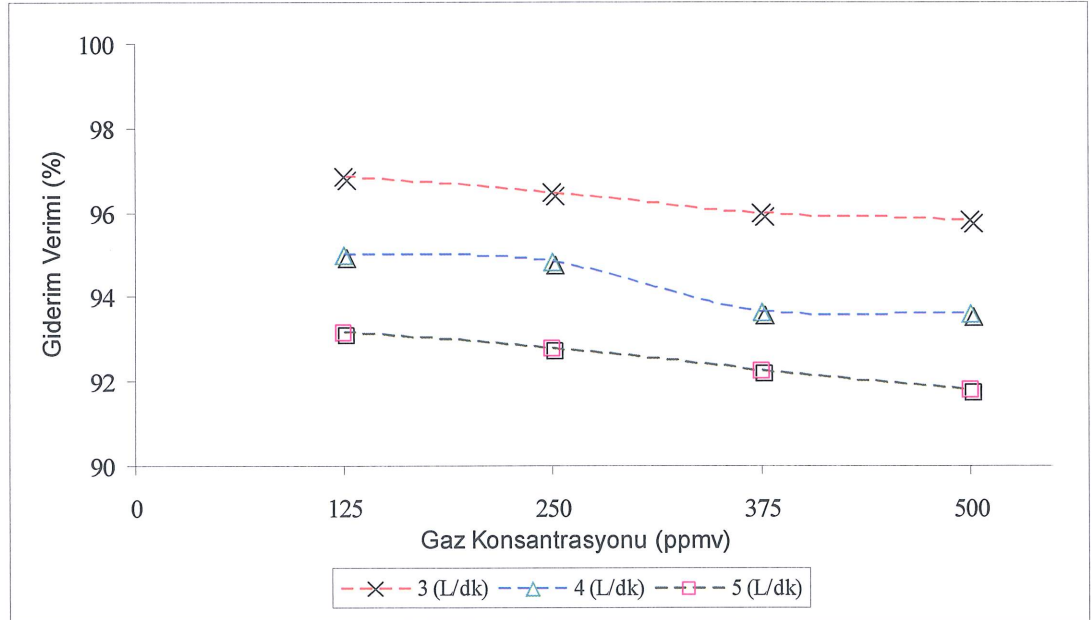
Tablo 4.5. Dolgulu kolonda azot içerikli amonyak giderimi için işletme parametreleri

Parametreler	İşletim koşulları		
Gaz giriş debisi (L/dk)	3,0	4,0	5,0
Sıvı debisi (L/h)	2,5	2,5	2,5
Sıvı/gaz oranı (L/m ³)	13,5	10	8
Gaz hızı (m/s)	0,15	0,20	0,25
Gaz kalış süresi (s)	4,0	3,0	2,4



Şekil 4.13. Dolgulu kolonda karşıt akışlı modda azot içerikli NH₃ gideriminde gaz debisinin verim üzerine etkisi

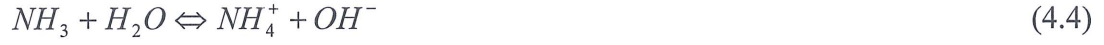
Şekil 4.13’de ekler bölümünde Tablo A.21, Tablo A.22 ve Tablo A.23’teki deney sonuçlarına göre azot içerikli olarak karşıt akışlı modda gerçekleştirilen amonyak (NH_3) giderimi çalışmalarında giriş gazı debisinin giderim verimi üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Karşıt akışlı ve eş yönlü akışlı deneysel çalışmalarda amonyak konsantrasyonu azot içeriğinde dört kat artırıldığında giderim verimindeki azalma yaklaşık % 0,7-1,4 arasında değişiklik göstermektedir. Kirli gazın giriş debisi 3 (L/dk)’dan 5 (L/dk)’a yükseltilerek yaklaşık %65 artırıldığında ise giderim veriminde yaklaşık %4 oranında bir azalma olduğu kaydedilmiştir. Şekil 4.14’de ekler bölümünde Tablo A.24, Tablo A.25 ve Tablo A.26’daki deney sonuçlarının özetlendiği, azot içerikli olarak eş-yönlü akışlı modda gerçekleştirilen amonyak (NH_3) giderimi çalışmalarında giriş gazı debisinin giderim verimi üzerindeki etkisi gösterilmektedir.



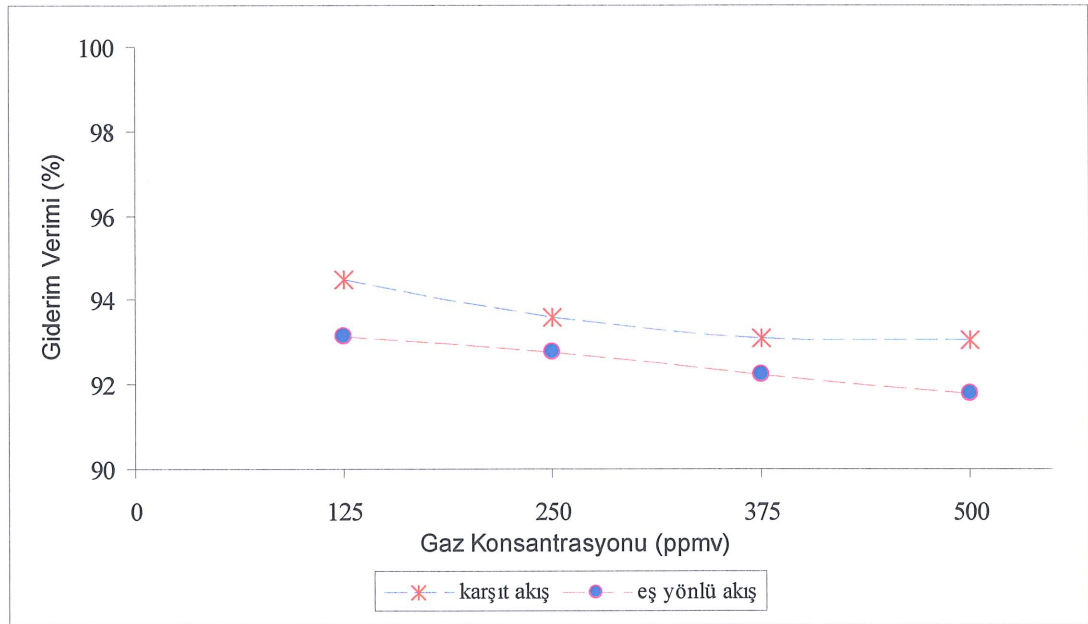
Şekil 4.14. Dolgulu kolonda eş-yönlü akışlı modda azot içerikli NH_3 gideriminde gaz debisinin verim üzerine etkisi

Azot içerikli hidrojen sülfür giderimine benzer olarak, azot içerikli amonyak gideriminde de gaz konsantrasyonunun ve kirli gaz giriş debisinin artması tasarlanan sistemde giderim verimini çok fazla etkilememiştir. Bu durum suyun amonyak giderimindeki kabiliyetinin sodyum hidroksit solüsyonunun hidrojen sülfür giderimindeki kabiliyeti kadar yüksek olduğunu göstermektedir çünkü amonyak gazının suda çözünme özelliği olup; hidrojen bağları oluşturma yeteneği yüksektir.

Su ile temasa geçtiğinde amonyak moleküllerinin bir kısmı tepkimeye girerek (4.4) nolu reaksiyonda olduğu gibi amonyum iyonları ve hidroksit iyonları oluşturmaktadır.



Reaksiyonun çift yönde oluşması tepkimenin %100 gerçekleşmediğini göstermektedir. Denge halindeyken amonyağın sadece %1'i amonyum iyonu oluşturmaktadır, bu nedenle amonyağın suda çözünürlüğünün ana nedeni bu reaksiyon olmayıp hidrojen bağlarıdır.



Şekil 4.15: Azot içerikli NH_3 giderim verimlerinin karşıt ve eş yönlü akışlı deneyler için karşılaştırılması

Şekil 4.15'te azot içerikli amonyak gideriminde karşıt ve eş yönlü akışın giderim verimindeki etkisi verilmektedir. Şekilde de görüldüğü üzere eş yönlü akışlı amonyak giderim çalışmalarında verimdeki azalma çok fazla değişkenlik sergilemeyerek karşıt akışlı çalışmalara göre yaklaşık %1,25 düşüş göstermektedir.

4.4. Statik Mikser İle Hidrojen Sülfür Giderim Çalışmaları

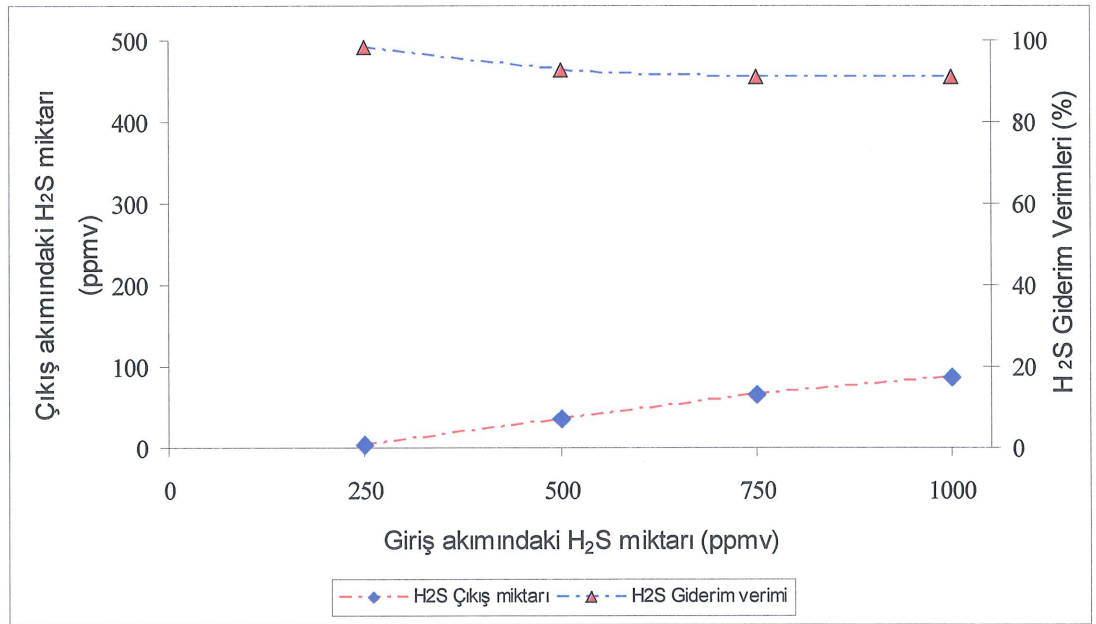
Deney çalışmalarının son aşamasında, tasarlanan statik mikser kolon içerisine yerleştirilerek hidrojen sülfür giderimindeki değişiklikler gözlenmiştir. Statik mikser ile hidrojen sülfür giderimi çalışmaları dolgu kolon çalışmalarında olduğu gibi

farklı debilere ve konsantrasyonlara sahip karışım gazı içeriğinde ve karşıt akışlı olarak gerçekleştirilmiştir. Tablo 4.6'da kolon içerisinde statik mikserli deney çalışmalarında 3 (L/dk)'lık giriş debisi için gaz konsantrasyonları verilmektedir.

Tablo 4.6. Statik mikserli kolonda 3 (L/dk) karışım gazı içeriğinde karşıt akışlı modda deney için gaz kompozisyonları

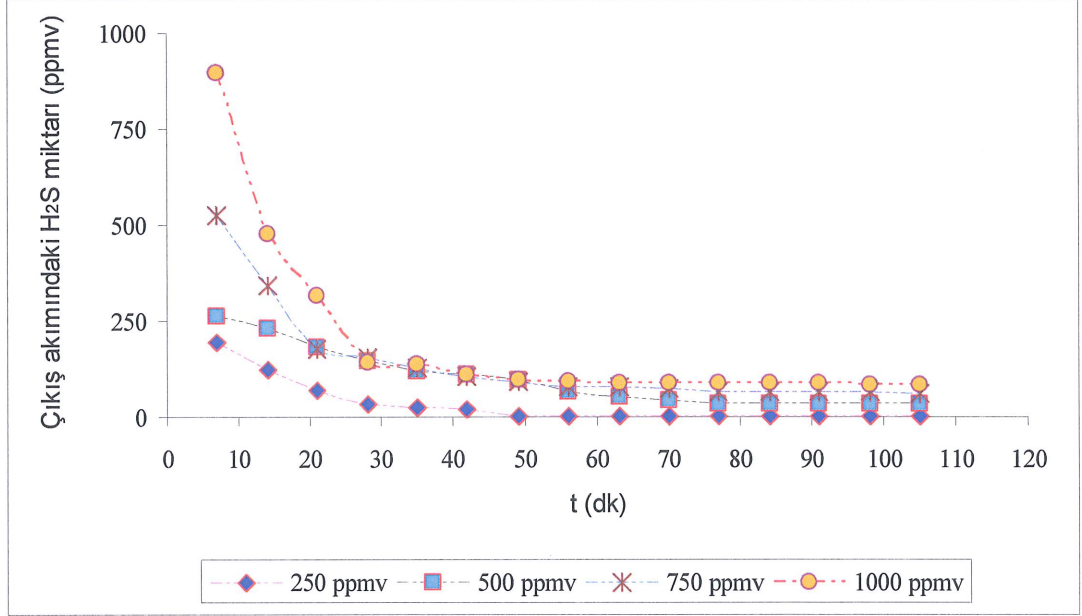
GAZLAR	1. Koşul	2. Koşul	3. Koşul	4. Koşul
H ₂ S + N ₂	250 ppm; 0,38 (L/dk)	500 ppm; 0,75 (L/dk)	750 ppm; 1,15 (L/dk)	1000 ppm; 1,50 (L/dk)
N ₂	1,12 (L/dk)	0,75 (L/dk)	0,35 (L/dk)	-
CO ₂	0,75 (L/dk)	0,75 (L/dk)	0,75 (L/dk)	0,75 (L/dk)
CH ₄	0,75 (L/dk)	0,75 (L/dk)	0,75 (L/dk)	0,75 (L/dk)

Statik mikserli kolonda giriş akımındaki hidrojen sülfür miktarına göre çıkış akımındaki hidrojen sülfür miktarlarının ve hidrojen sülfür giderim verimlerinin değişimi Tablo A.9'da verilen sonuçlara göre Şekil 4.16'da gösterilmektedir. Giriş akımının maksimum değeri olan 1000 ppmv hidrojen sülfür içeriği için çıkış değeri 90 ppmv civarındadır. Kirli gaz giriş debisinin 3 (L/dk) olduğu ve kolon içerisinde statik mikserin kullanıldığı deney çalışmalarında hidrojen sülfür giderimi %91-98 arasında değişkenlik göstermektedir.

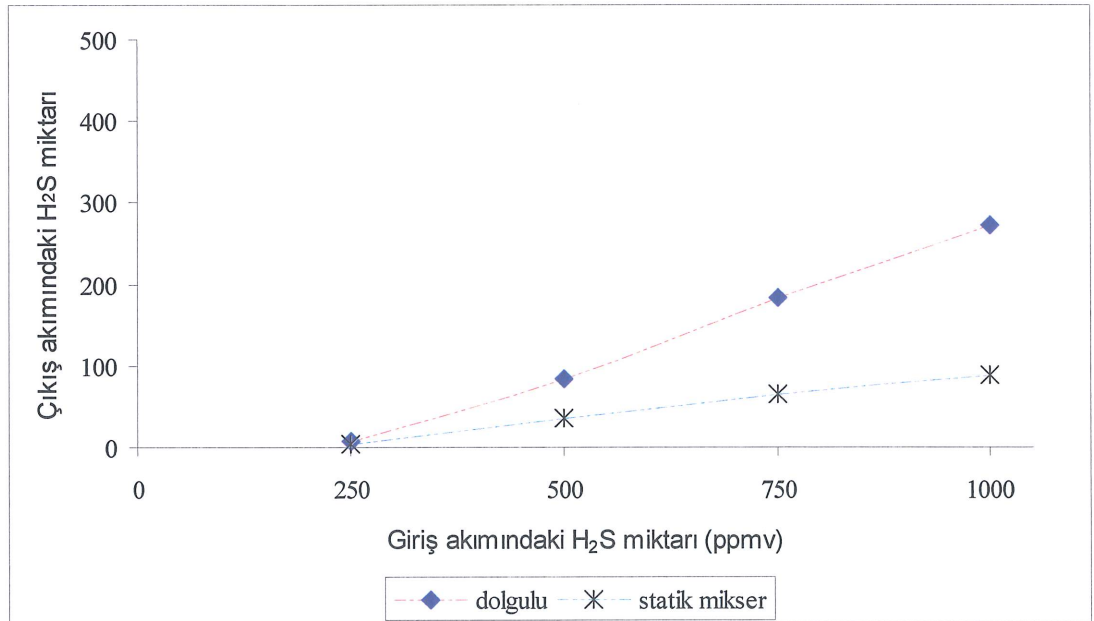


Şekil 4.16. Statik mikserli kolonda, karşıt akışlı modda 3 (L/dk) karışım gazı içerikli çalışmada giriş akımındaki H₂S miktarlarına göre çıkış akımındaki H₂S miktarları ve H₂S giderim verimleri

Şekil 4.17’de statik mikserli kolonda 3 (L/dk) karışım gazı içeriğinde karşıt akışlı deney çalışmasında çıkış akımındaki H₂S miktarlarının zamana göre değişimleri verilmektedir. Kolon içerisinde hidrojen sülfür (H₂S) giderimi işlemi yaklaşık 35–45 dakika sonra stabil hale gelmiştir.



Şekil 4.17. Statik mikserli kolonda 3 (L/dk) karışım gazı içeriğinde karşıt akışlı deney çalışmasında çıkış akımındaki H₂S miktarlarının zamana göre değişimleri



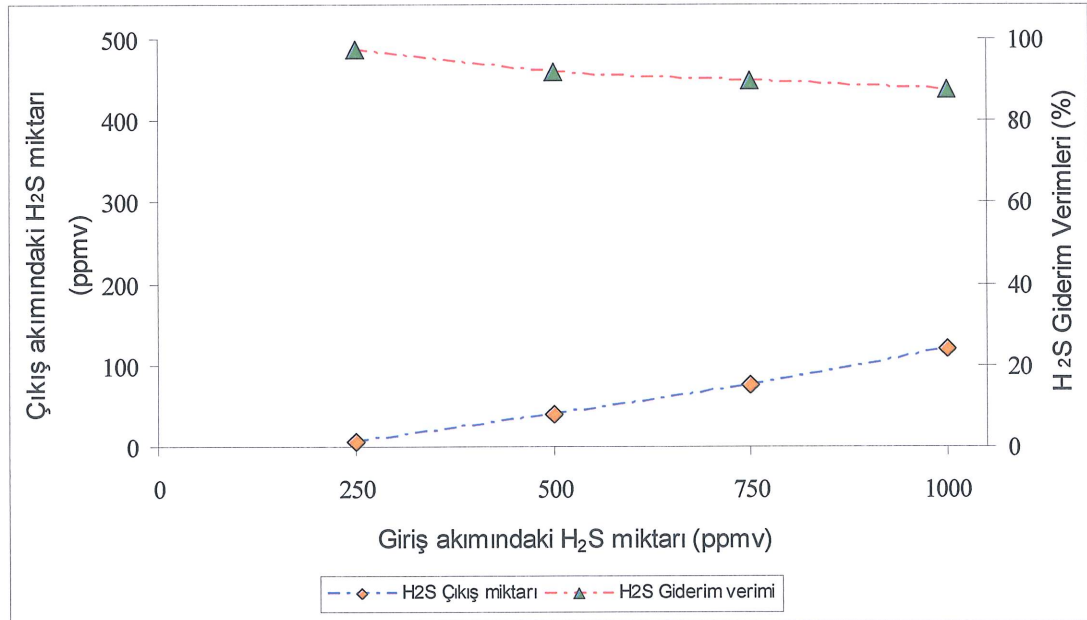
Şekil 4.18. Dolgulu ve statik mikserli kolonlarda, karşıt akışlı modda (3 L/dk) karışım gazı içerikli çalışmada giriş akımındaki H₂S miktarına göre çıkış akımındaki H₂S miktarlarının karşılaştırılması

Şekil 4.18’de dolgulu ve statik mikserli kolonda çıkış akımındaki hidrojen sülfür miktarı verilmektedir. Şekilde de görüldüğü üzere giriş kısmında 250 ppmv içeriğe sahip gazın çıkış akımındaki değeri dolgulu ve statik mikserli kolonda birbirine yakın olup, kirletici içeriği arttıkça çıkış akımındaki değerler kolonlar arasında farklılıklar göstererek eğriler arasındaki mesafe artmaktadır.

Statik mikserli kolonun kullanıldığı kirletici gaz giriş debisinin 4 L/dk olduğu deneysel çalışmalarda gaz konsantrasyonları Tablo 4.7’de verilmektedir.

Tablo 4.7. Statik mikserli kolonda 4 (L/dk) karışım gazı içeriğinde karşıt akışlı modda deney için gaz kompozisyonları

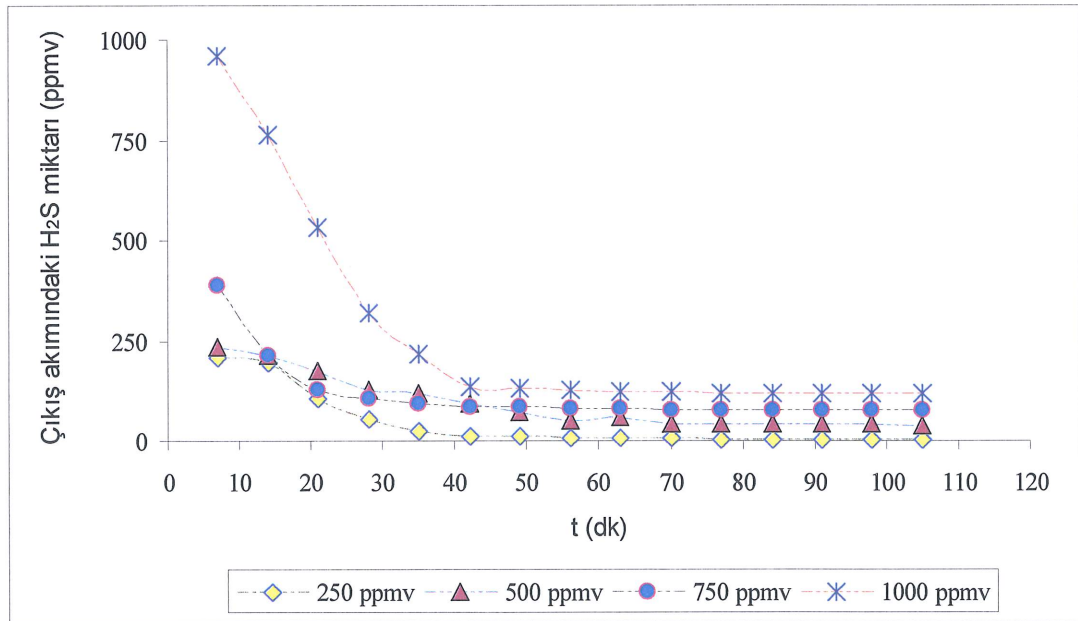
GAZLAR	1. Koşul	2. Koşul	3. Koşul	4. Koşul
H ₂ S + N ₂	250 ppm; 0,5 (L/dk)	500 ppm; 1,0 (L/dk)	750 ppm; 1,5 (L/dk)	1000 ppm; 2,0 (L/dk)
N ₂	1,5 (L/dk)	1,0 (L/dk)	0,5 (L/dk)	-
CO ₂	1,0 (L/dk)	1,0 (L/dk)	1,0 (L/dk)	1,0 (L/dk)
CH ₄	1,0 (L/dk)	1,0 (L/dk)	1,0 (L/dk)	1,0 (L/dk)



Şekil 4.19. Statik mikserli kolonda, karşıt akışlı modda 4 (L/dk) karışım gazı içerikli çalışmada giriş akımındaki H₂S miktarlarına göre çıkış akımındaki H₂S miktarları ve H₂S giderim verimleri

Şekil 4.19’da, Tablo A.11’de verilen sonuçlara göre statik mikserli kolonda, karışım gazı içeriğinde ve karşıt akışlı modda giriş gazı debisinin 4 (L/dk) olduğu deneysel çalışmada giriş akımındaki hidrojen sülfür miktarına karşılık çıkış akımındaki hidrojen sülfür miktarları ve hidrojen sülfür giderim verimleri belirtilmektedir. Şekilde de görüldüğü üzere, dolgulu kolon ile yapılan deneysel çalışmalardaki sonuca benzer olarak kirletici konsantrasyonu arttıkça çıkış akımındaki hidrojen sülfür miktarı artmıştır. Buna bağlı olarak giriş akımındaki H₂S konsantrasyonu 250 ppmv olduğunda giderim verimi yaklaşık %97, 1000 ppmv olduğunda ise giderim verimi yaklaşık %87 olarak gözlenmiştir.

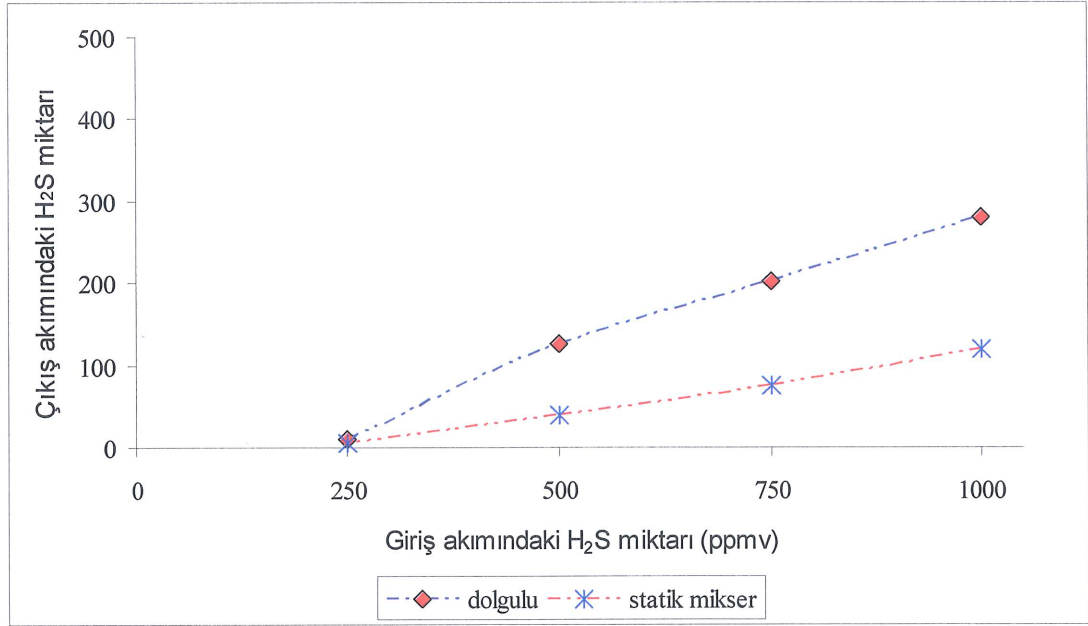
Dolgulu kolonla yapılan çalışmalara benzer olarak statik mikserin kullanıldığı deneylerde kirletici konsantrasyonu artarken yıkayıcı sıvı miktarının sabit kalması, giderilen kirletici miktarını da sınırlamaktadır. Kolon çapının %50 artırılmasıyla gaz hızı azalarak giderim veriminde olumlu etki sağlanmıştır.



Şekil 4.20. Statik mikserli kolonda 4 (L/dk) karışım gazı içeriğinde karşıt akışlı deney çalışmasında çıkış akımındaki H₂S miktarlarının zamana göre değişimleri

Şekil 4.20’de statik mikserli kolonda 4 (L/dk) karışım gazı içeriğinde karşıt akışlı deney çalışmasında çıkış akımındaki H₂S miktarlarının zamana göre değişimleri verilmektedir. Şekil 4.21’de ise dolgulu ve statik mikserli kolonlarda 4 (L/dk) gaz debisi için giriş akımındaki hidrojen sülfür miktarına karşı çıkış akımındaki hidrojen sülfür miktarları gösterilmektedir. Bir önceki deney koşulunda olduğu gibi 250 ppmv

hidrojen sülfür giriş akımına karşı çıkış akımındaki miktar her iki kolonda da birbirine yakın olarak seyretmektedir.



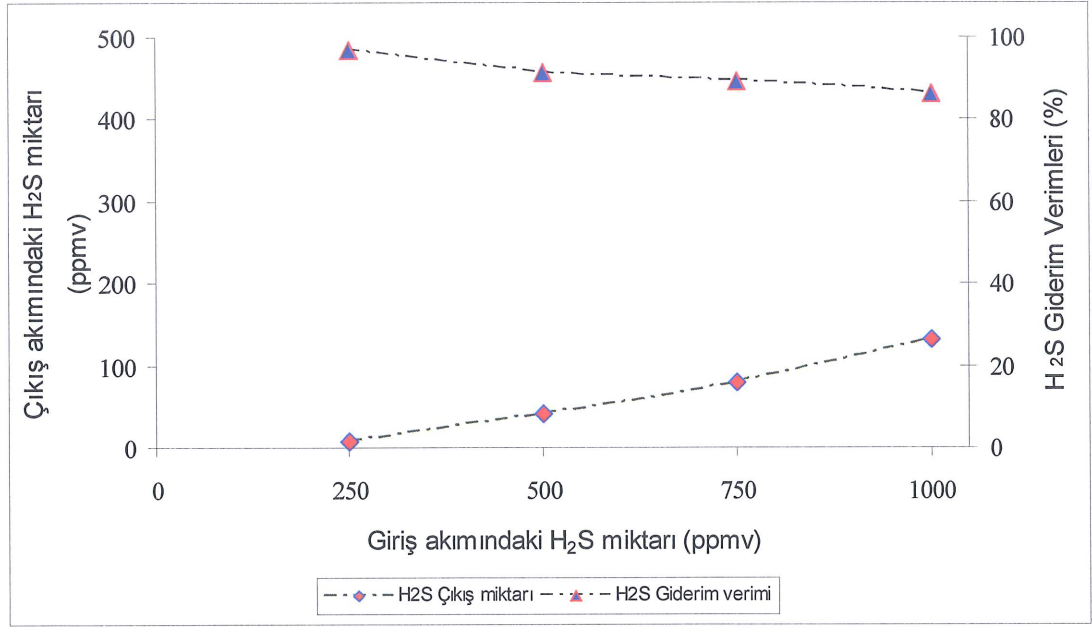
Şekil 4.21. Dolgulu ve statik mikserli kolonlarda, karşıt akışlı modda 4 (L/dk) karışım gazı içerikli çalışmada giriş akımındaki H₂S miktarına göre çıkış akımındaki H₂S miktarlarının karşılaştırılması

Statik mikserli kolonun kullanıldığı kirletici gaz debisinin 5 (L/dk) olduğu deneysel çalışmalarda gaz konsantrasyonları Tablo 4.8’de verilmektedir.

Tablo 4.8. Statik mikserli kolonda 5 (L/dk) karışım gazı içeriğinde karşıt akışlı modda deney için gaz kompozisyonları

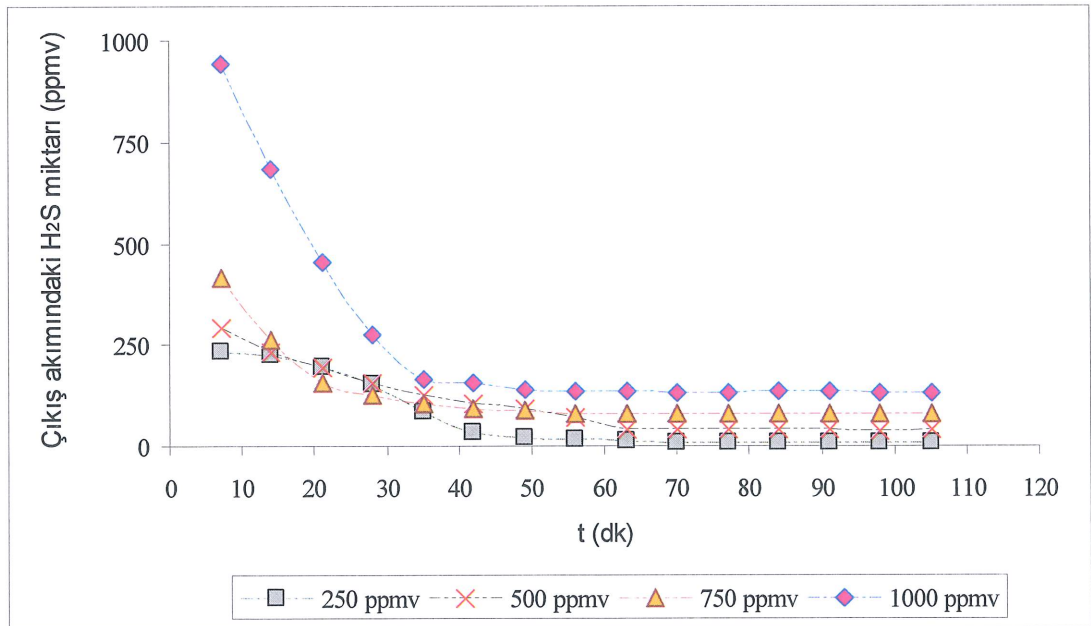
GAZLAR	1. Koşul	2. Koşul	3. Koşul	4. Koşul
H ₂ S + N ₂	250 ppm; 0,62 (L/dk)	500 ppm; 1,25 (L/dk)	750 ppm; 1,88 (L/dk)	1000 ppm; 2,50 (L/dk)
N ₂	1,88 (L/dk)	1,25 (L/dk)	0,62 (L/dk)	-
CO ₂	1,25 (L/dk)	1,25 (L/dk)	1,25 (L/dk)	1,25 (L/dk)
CH ₄	1,25 (L/dk)	1,25 (L/dk)	1,25 (L/dk)	1,25 (L/dk)

Kolon içerisinde statik mikserin kullanıldığı 5 L/dk karışım gazı içeriğinde giriş ve çıkış akımındaki H₂S miktarları ve hidrojen sülfür giderim verimleri Tablo A.13’te verilen sonuçlara göre Şekil 4.22’de verilmektedir. Şekilde görüldüğü üzere maksimum H₂S çıkış miktarı 130 ppmv civarındadır. Buna göre 250 ppmv’lik H₂S giriş konsantrasyonunda giderim verimi yaklaşık %96, 1000 ppmv’lik H₂S giriş konsantrasyonunda ise giderim verimi yaklaşık %81 olarak gözlenmiştir.

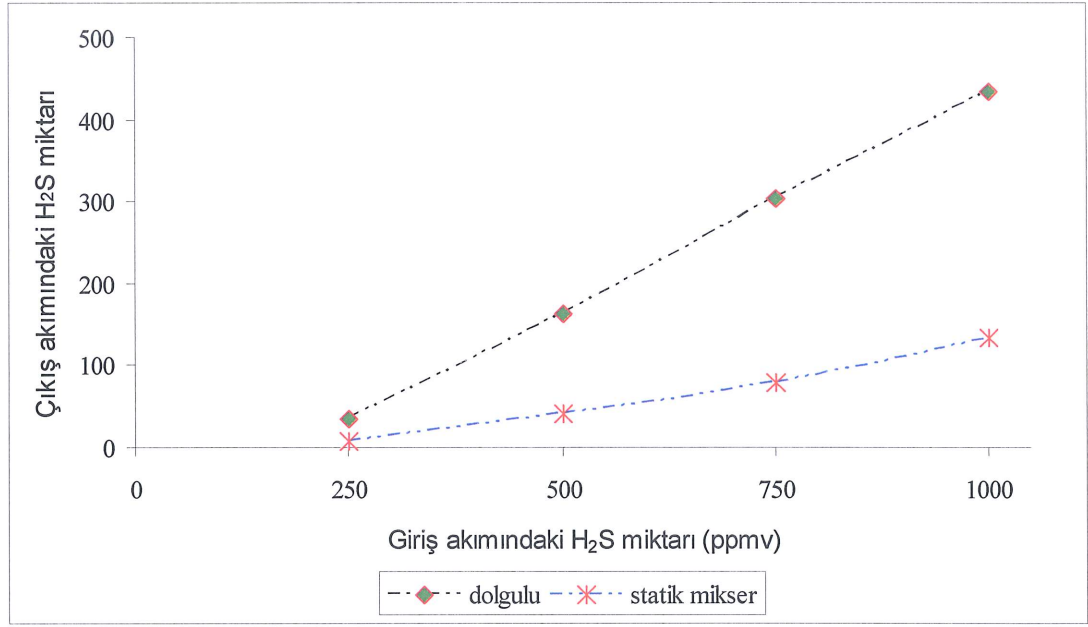


Şekil 4.22. Statik mikserli kolonda, karşıt akışlı modda 5 (L/dk) karışım gazı içerikli çalışmada giriş akımındaki H₂S miktarlarına göre çıkış akımındaki H₂S miktarları ve H₂S giderim verimleri

Şekil 4.23'de statik mikserli kolonda 5 (L/dk) karışım gazı içerikli karşıt akışlı deney çalışmasında çıkış akımındaki H₂S miktarlarının zamana göre değişimleri verilmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi kolon içerisinde H₂S giderimi işlemi yaklaşık 45–55 dakika sonra stabil hale gelmektedir.



Şekil 4.23. Statik mikserli kolonda 5 (L/dk) karışım gazı içeriğinde karşıt akışlı deney çalışmasında çıkış akımındaki H₂S miktarlarının zamana göre değişimleri



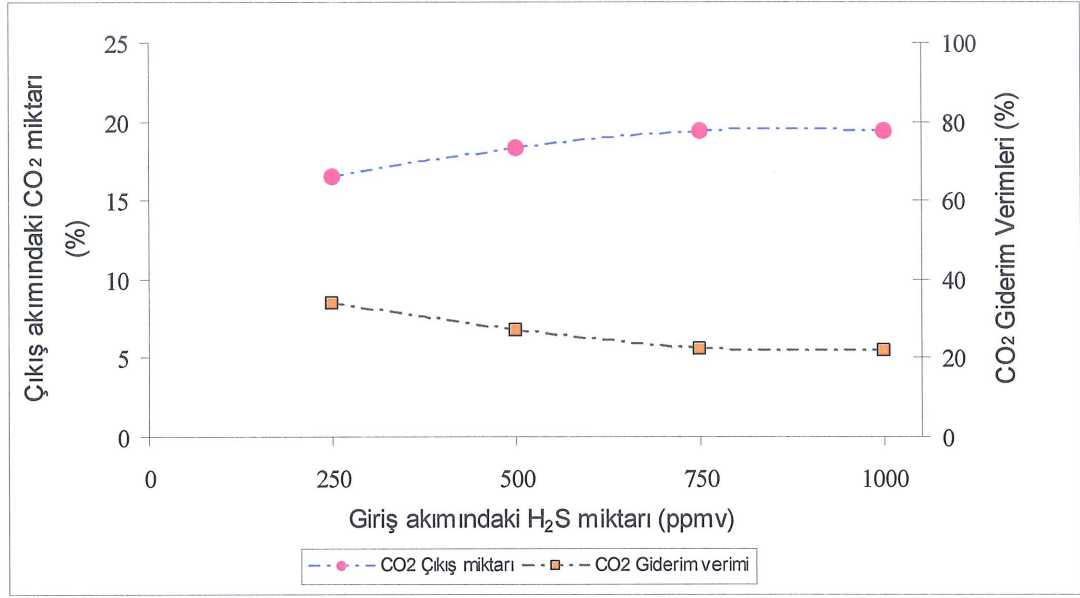
Şekil 4.24. Dolgulu ve statik mikserli kolonlarda, karşıt akışlı modda 5 (L/dk) karışım gazı içerikli çalışmada giriş akımındaki H₂S miktarına göre çıkış akımındaki H₂S miktarlarının karşılaştırılması

Şekil 4.24'te görüldüğü üzere dolgulu ve statik mikserli kolonlarda giriş ve çıkış akımındaki hidrojen sülfür miktarlarının karşılaştırılması verilmektedir. Şekilde görüldüğü üzere 1000 ppmv hidrojen sülfür giriş akımı için kolonlardaki çıkış akımı eğrileri arasındaki mesafeler diğer deneysel koşullara göre daha fazladır.

4.5. Statik Mikser İle Karbondioksit Giderimi

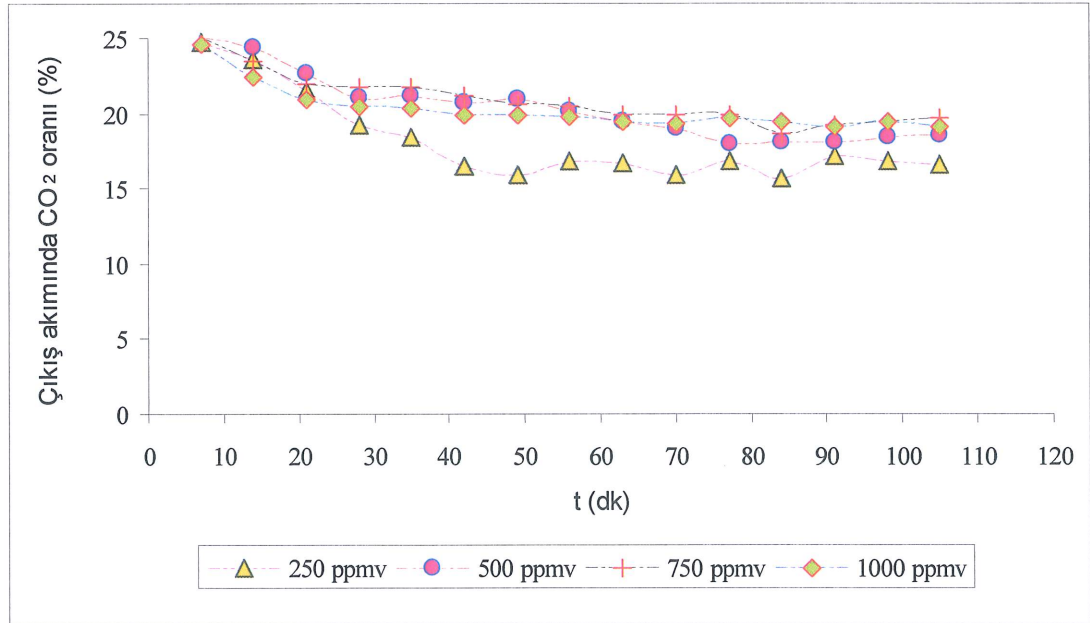
Dolgulu kolon ile olan çalışmalarda olduğu gibi, statik mikserli kolon ile de karışım gazı içeriğinde hidrojen sülfür giderimi deneysel çalışmaları esnasında, karışım gazı içerisinde karbondioksit de bulunduğu için karbondioksit giderimi de incelenmiştir. Şekil 4.25'de, ekler bölümünde Tablo A.10'daki deney sonuçlarına bağlı olarak statik mikserli kolonda karşıt akışlı modda 3 (L/dk) karışım gazı içeriğinde hidrojen sülfür giriş konsantrasyonuna göre karbondioksitin çıkış akımındaki miktarları ve karbondioksit giderimi verimindeki değişiklikler verilmektedir.

Şekil 4.25'de verildiği gibi giriş akımında hidrojen sülfür içeriği 250 ppmv olduğu durumda karbondioksitin tutunma oranı yaklaşık %33, 1000 ppmv olduğu durumda ise %22 civarındadır. Dolgulu kolonda olduğu gibi hidrojen sülfür konsantrasyonu arttıkça karbondioksit gideriminin de azaldığı görülmektedir.



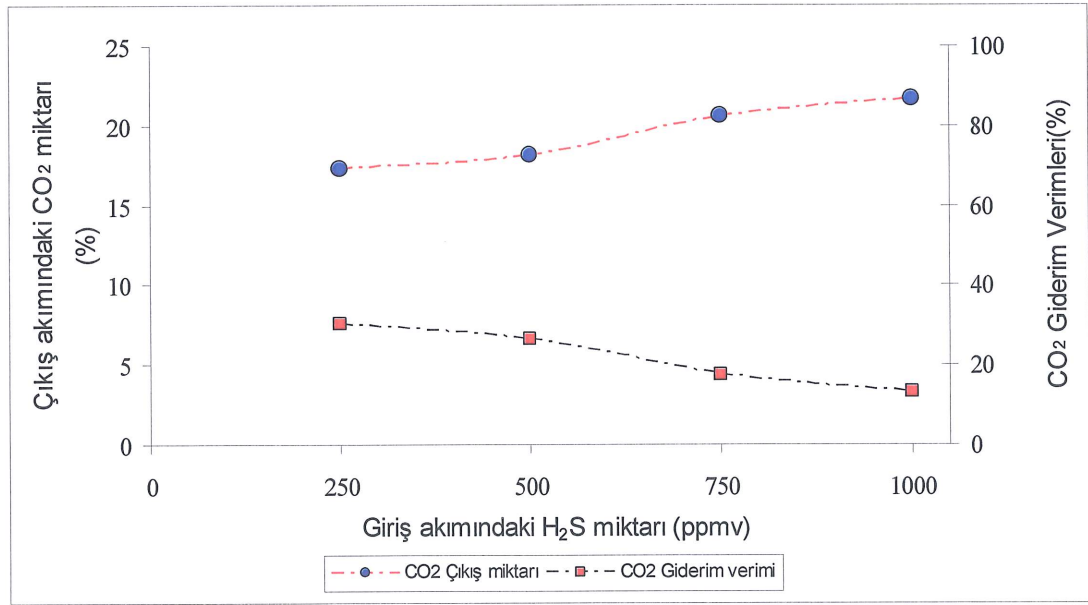
Şekil 4.25. Statik mikserli kolonda, karışıt akışlı modda 3 (L/dk) karışım gazı içerikli çalışmada, giriş akımındaki H₂S miktarlarına göre çıkış akımındaki CO₂ miktarları ve CO₂ giderim verimleri

Şekil 4.26'da statik mikserli kolonda 3 (L/dk) karışım gazı içeriğinde karışıt akışlı deney çalışmasında çıkış akımındaki CO₂ miktarlarının zamana göre değişimleri ve çıkış değerlerinin stabil duruma gelme zamanını belirtilmektedir. Kolon içerisinde karbondioksit (CO₂) tutunma operasyonu yaklaşık 60–70 dakika sonra stabil olarak seyretmiştir.



Şekil 4.26. Statik mikserli kolonda 3 (L/dk) karışım gazı içeriğinde karışıt akışlı deney çalışmasında çıkış akımındaki CO₂ oranlarının zamana göre değişimleri

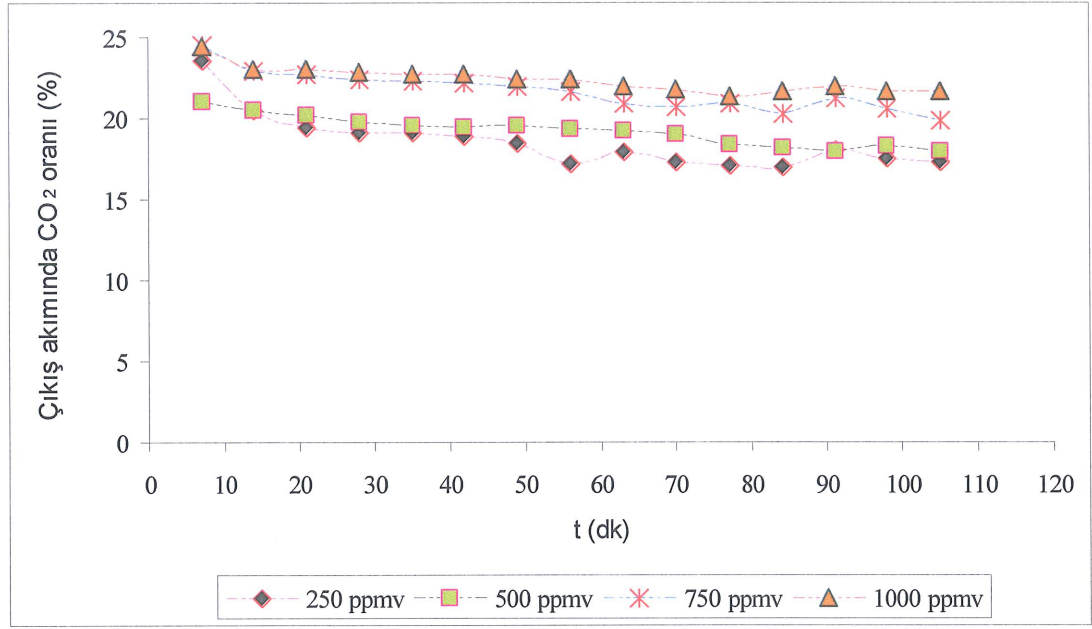
Şekil 4.27’de ekler bölümünde Tablo A.12’deki deney sonuçlarına bağlı olarak statik mikserli kolonda karşıt akışlı modda 4 (L/dk) karışım gazı içeriğinde hidrojen sülfür giriş konsantrasyonuna göre karbondioksitin çıkış akımındaki miktarları ve karbondioksit giderimi verimindeki değişiklikler verilmektedir. Böylece, dolgulu kolon ile olan çalışmada olduğu gibi statik mikser ile olan çalışmada farklı giriş debilerine göre karbondioksit giderim verimi değişiklikleri de incelenmiştir.



Şekil 4.27. Statik mikserli kolonda, karşıt akışlı modda 4 (L/dk) karışım gazı içerikli çalışmada giriş akımındaki H₂S miktarlarına göre çıkış akımındaki CO₂ miktarları ve CO₂ giderim verimleri

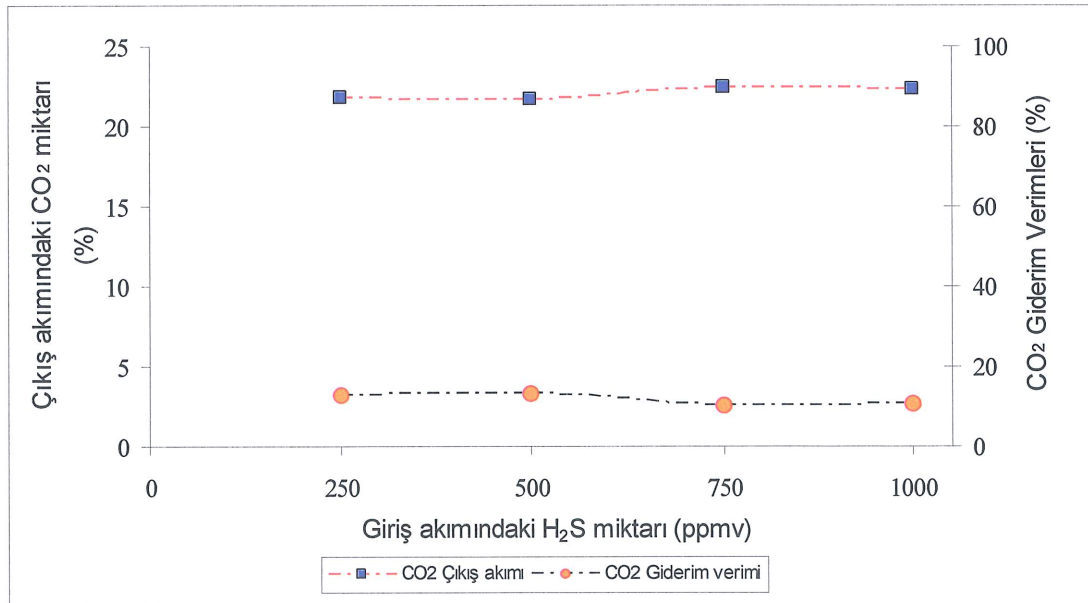
Şekil 4.27’de de verildiği gibi 250 ppmv ve 1000 ppmv konsantrasyonları arasında giriş akımındaki hidrojen sülfür miktarlarına göre karbondioksitin çıkış akımındaki oranı %17,3 ile %21,7 arasındadır. Giriş akımında hidrojen sülfür içeriği 250 ppmv olduğu durumda karbondioksitin tutunma oranı yaklaşık %30, 1000 ppmv olduğu durumda ise %13 civarındadır.

Şekil 4.28’de karbondioksit gideriminin zamana göre stabil durumunu belirtmektedir. Şekil 4.26’daki 3 (L/dk)’lık çalışmaya benzer olarak 4 (L/dk)’lık çalışmada kolon içerisinde karbondioksit (CO₂) tutunma operasyonu yaklaşık 60–70 dakika sonra stabil olarak seyretmiştir.



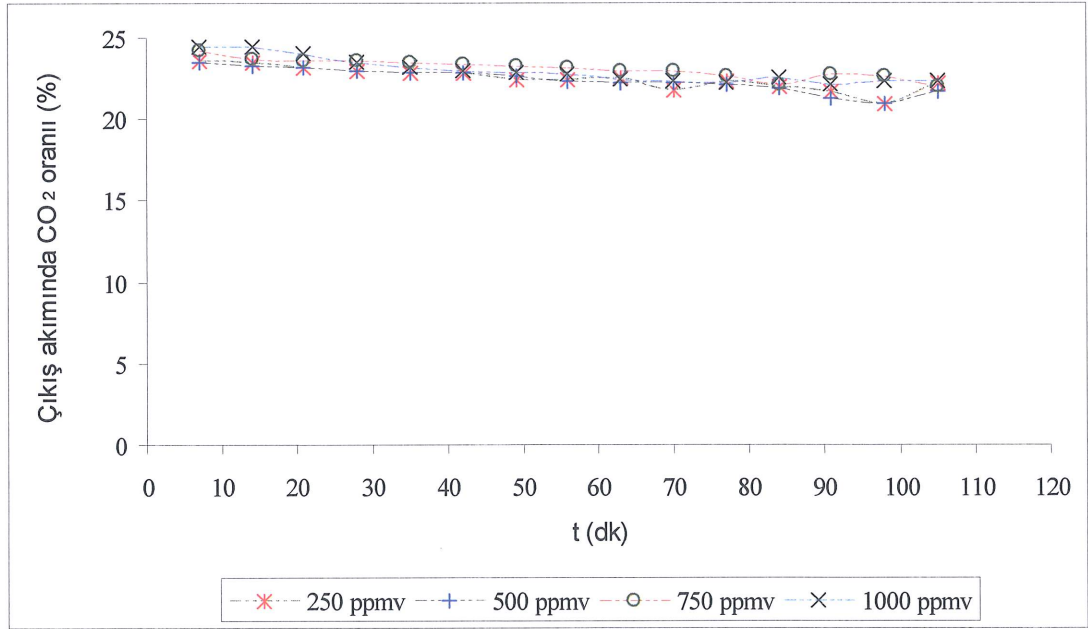
Şekil 4.28. Statik mikserli kolonda 4 (L/dk) karışım gazı içeriğinde karşıt akışlı deney çalışmasında çıkış akımındaki CO₂ oranlarının zamana göre değişimleri

Şekil 4.29'da, ekler bölümünde Tablo A.14'deki deney sonuçlarına bağlı olarak dolgulu kolonda karşıt akışlı modda 5 (L/dk) karışım gazı içeriğinde hidrojen sülfür giriş konsantrasyonuna göre karbondioksitin çıkış akımındaki miktarları ve karbondioksit giderimi verimindeki değişiklikler verilmektedir.



Şekil 4.29. Statik mikserli kolonda, karşıt akışlı modda 5 (L/dk) karışım gazı içerikli çalışmada giriş akımındaki H₂S miktarlarına göre çıkış akımındaki CO₂ miktarları ve CO₂ giderim verimleri

Şekil 4.29’da görüldüğü gibi giriş akımında hidrojen sülfür içeriği 250 ppmv olduğu durumda karbondioksitin tutunma oranı yaklaşık 12,5; 1000 ppmv olduğu durumda ise %10,8 civarındadır. Dolayısıyla karbondioksit gideriminde 3 (L/dk)’lık çalışmaya göre statik mikserli kolonda 5 (L/dk)’lık çalışmada karbondioksit giderim veriminde yaklaşık %11-21 arasında azalma olduğu görülmektedir. Bu durum giriş debisinin artırıldığında karbondioksit giderim veriminde de olumsuz etki meydana getirdiğini göstermektedir.



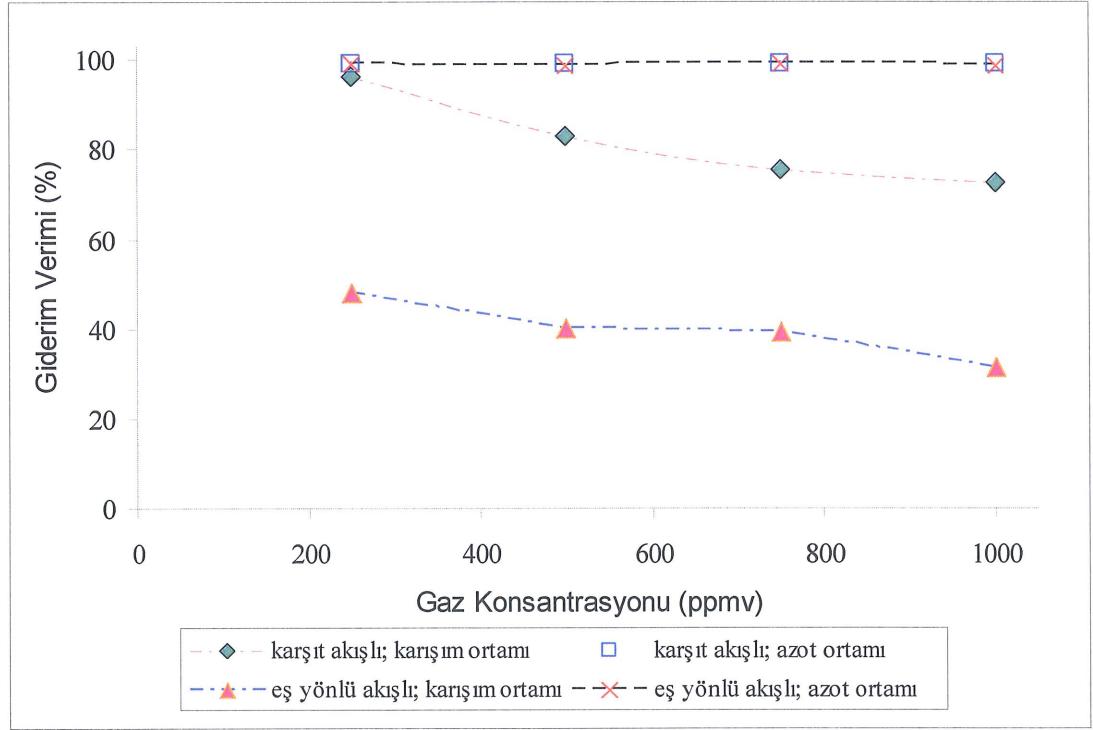
Şekil 4.30. Statik mikserli kolonda 5 (L/dk) karışım gazı içeriğinde karşıt akışlı deney çalışmasında çıkış akımındaki CO₂ oranlarının zamana göre değişimleri

Şekil 4.30’da statik mikserli kolonda 5 (L/dk) karışım gazı içeriğinde karbondioksit gideriminin zamana göre stabil durumunu belirtmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere karbondioksit tutunma operasyonu yaklaşık 70–80 dakika sonra stabil olarak seyretmiştir.

4.6. Statik Ve Dolgulu Kolona Ait Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Kolon içerisinde ticari dolgu malzemesi ve statik mikserin kullanılmasıyla yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekil 4.31’de farklı akış modlarında azot ve karışım gazı ortamında ticari dolgu malzemesinin kullanıldığı deneysel sonuçlar irdelenmiştir. Azot ortamında hidrojen sülfürün hemen hemen tamamının giriş akımındaki hidrojen sülfür içeriğinden ve farklı akış modlarından

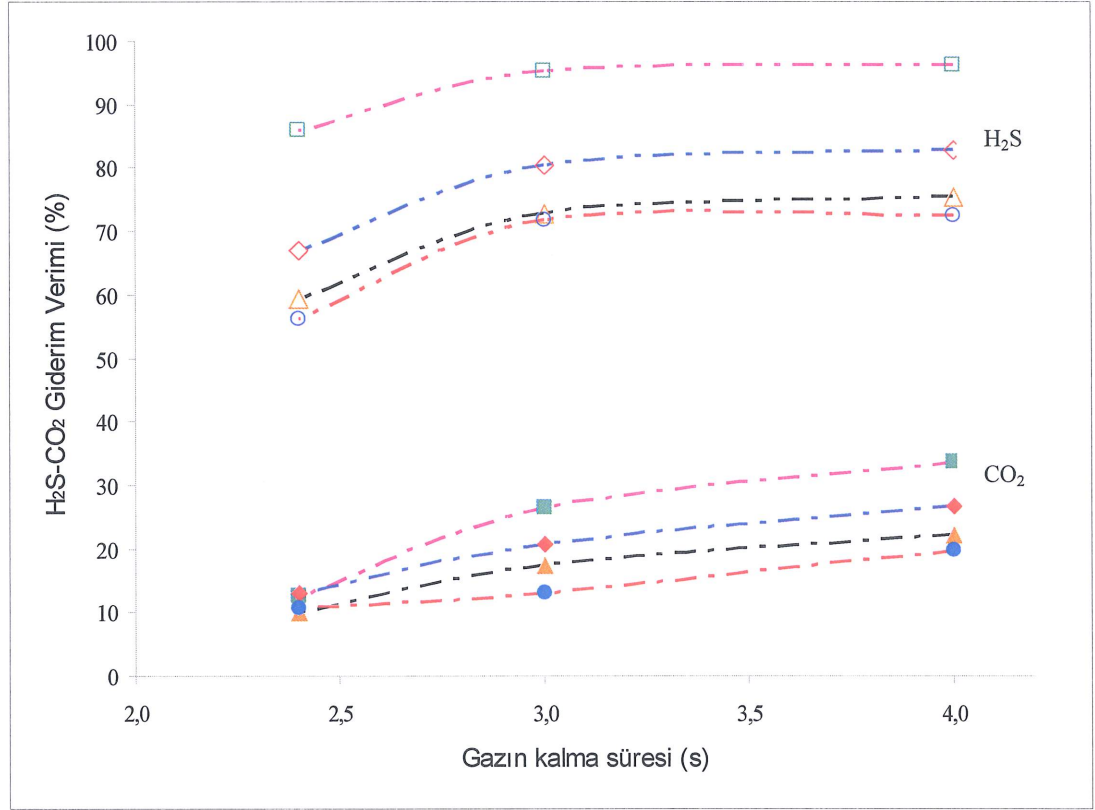
bağımsız olarak giderildiği gözlenmiştir. Diğer taraftan karışım gazı içerikli deneylerde her iki akış modunda da hidrojen sülfür giderimi negatif yönde etkilenmiştir. Bu durumda karşıt akışlı modda hidrojen sülfür giderim veriminin daha yüksek olmasına rağmen giriş akımındaki hidrojen sülfür miktarı arttıkça verimin azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.31. Dolgulu kolonda karşıt ve eş yönlü akışlı deney çalışmalarında azot ve karışım gazı içerikli H₂S giderim verimlerinin karşılaştırılması

Hidrojen sülfür giderimi üzerinde gazın kolonda kalma süresinin etkisi de araştırılmıştır. Şekil 4.32’de dolgulu kolonda karışım gazı içeriğinde karşıt akışlı deney çalışmasında H₂S ve CO₂ giderim verimleri gösterilmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi kalma süresi azaldıkça hidrojen sülfür giderim veriminde düşüş gözlenmiştir. Özellikle yüksek konsantrasyonlarda giderim verimi daha fazla düşüş sergilemektedir. Temas süresinin azaldığı düşünülünce bu sonuç normal olarak yorumlanabilir. Kolon girişindeki gaz hızının artması, gazın yıkayıcı sıvı ile olan temas etme süresini azaltmakta ve bundan dolayı kirletici giderimini negatif yönde etkilemektedir. Bununla birlikte gaz hızının çok fazla artması, akışkan damlacıklarının kolon içerisinde sürüklenerek taşmanın meydana gelmesine de yol açmaktadır. Bu yüzden taşma sorunlarının yaşanmaması ve giderim veriminde

olumlu etkiler sağlamak açısından gaz giriş debisinin her prostedeki çalışma koşullarına göre uygun olarak belirlenmesi gerekmektedir.



Şekil 4.32: Dolgulu kolonda karışım gazı içerikli karşıt akışlı deney çalışmasında H₂S ve CO₂ giderim verimleri (□ 250 ppmv H₂S giderimi; ◇ 500 ppmv H₂S giderimi; △ 750 ppmv H₂S giderimi; ○ 1000 ppmv H₂S giderimi; ■ 250 ppmv H₂S akımında CO₂ giderimi; ◆ 500 ppmv H₂S akımında CO₂ giderimi; ▲ 750 ppmv H₂S akımında CO₂ giderimi; ● 1000 ppmv H₂S akımında CO₂ giderimi)

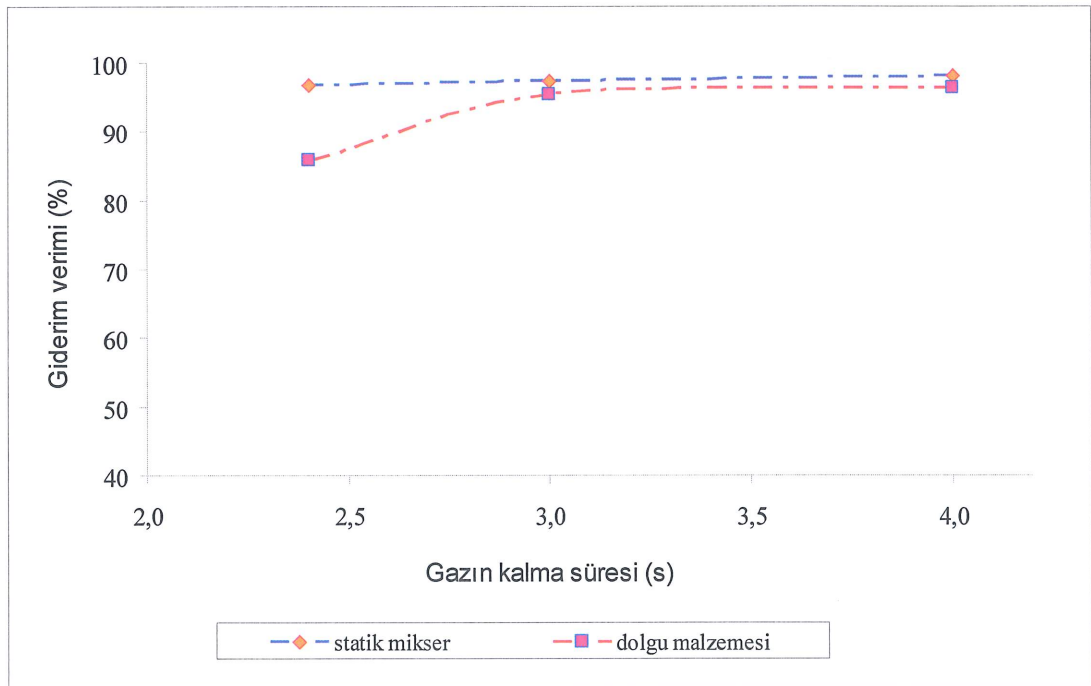
Kolon içerisinde sıvı-gaz temasını sağlayan geometrinin etkisini araştırmak için bir statik mikser tasarlanmıştır. Ticari dolgu malzemesinin ve statik mikserin karşılaştırmaya yönelik teknik özellikleri Tablo 4.9'da verilmiştir. Statik mikserin ve ticari dolgu malzemesinin çapları sırasıyla 30 mm ve 20 mm'dir. Kolon hacminin yaklaşık sabit olması bakımından statik mikser ve ticari dolgu malzemesi için yükseklik ayarı yapılmıştır. Bundan dolayı, gaz hızları iki farklı kolonda değişken olmasına rağmen aynı deney şartlarındaki gazın kalma süreleri sabit kalmıştır.

Tablo 4.9. Deney çalışmalarında kullanılan dolgu malzemesi ve statik mikserin geometrik özellikleri

Kolon özelliği	Dolgu malzemesi	Statik mikser
Kolon çapı (mm)	20	30
Dolgu yüksekliği (mm)	640	290
Boşluk oranı, β	0,87	0,90

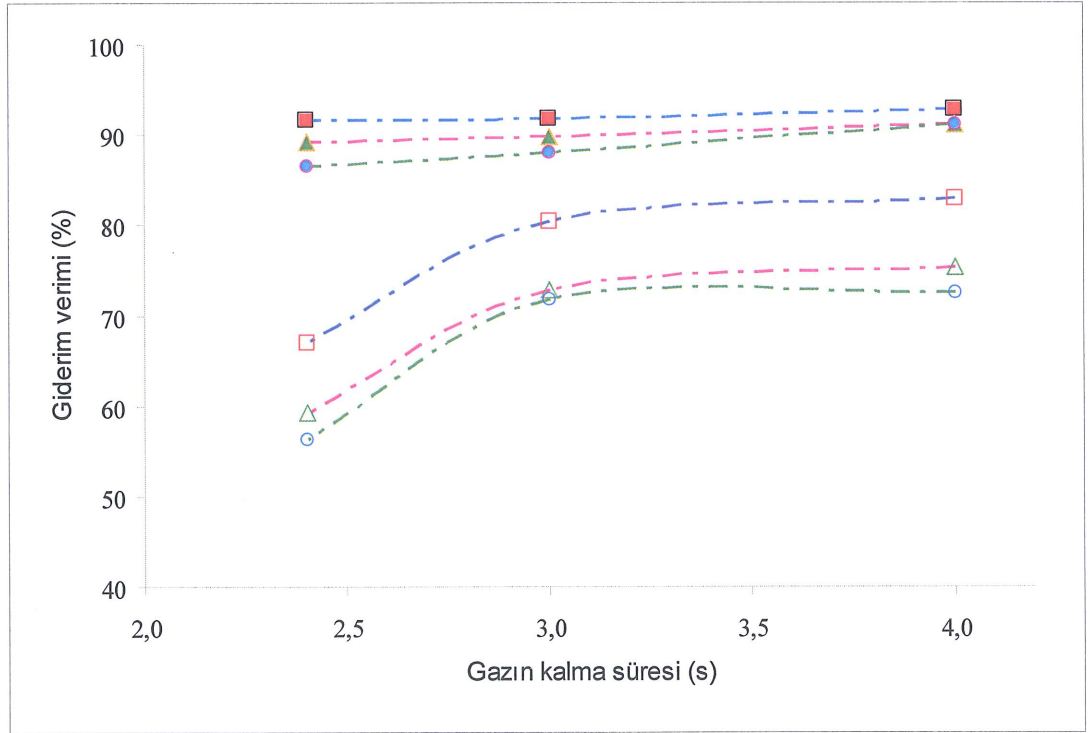
Böylece her iki kolona yaklaşık aynı debide ve konsantrasyonda temizlenecek kirli gaz ve onu arıtmak için de yine aynı debide temizleyici sıvı beslenerek kolonların aynı şartlar altında beslenmesi sağlanmıştır.

Şekil 4.33'te dolgulu ve statik mikserli kolon içerisinde karışım gazı ortamında ve karşıt akışlı deneyde 250 ppmv H₂S giderim verimleri karşılaştırılmaktadır. Şekilde de görüldüğü üzere kolon içerisinde statik mikserin kullanılmasıyla yapılan deneylerde hidrojen sülfür giderim verimi ticari dolgu malzemesinin kullanılmasıyla elde edilen verimden daha yüksektir. Gazın kalma süresinin 2 saniyeye yakın olduğu deney koşullarında giderim verimi ticari dolgu malzemesi için fark edilir bir şekilde değiştiği gözlenirken, statik mikser için verimde çok fazla bir farklılık meydana gelmemiştir.



Şekil 4.33. Dolgulu ve statik mikserli kolon içerisinde karışım gazı içerikli karşıt akışlı deneyde 250 ppmv H₂S giderim verimleri

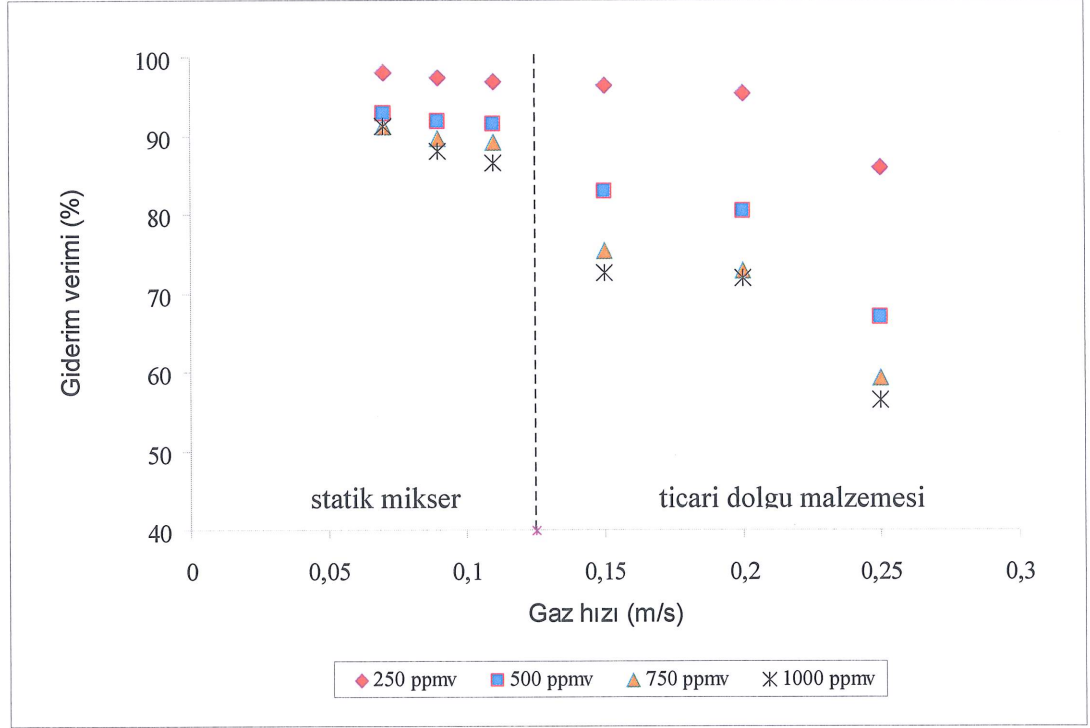
Statik mikser ile yapılan deney çalışmalarındaki tüm gaz kalma sürelerinde sabit sonuçlara ulaşılmıştır. Hidrojen sülfür içeriğinin en düşük olduğu 250 ppmv'lik giriş akımında 3 ve 4 saniyelik kalma süreleri için her iki kolon türünde giderim verimi değerleri birbirine yakındır (Şekil 4.33). Şekil 4.34'te 500, 750 ve 1000 ppmv hidrojen sülfür konsantrasyonların kullanıldığı deneylerin sonuçları verilmektedir. Yüksek hidrojen sülfür konsantrasyonlarında ticari dolgu malzemesi ve statik mikser ile elde edilen verim eğrileri arasındaki mesafeler artmaktadır.



Şekil 4.34. Karışım gazı içerikli karşıt akışlı deney çalışmasında H₂S giderim verimleri (■ 500 ppmv, statik mikser; □ 500 ppmv, dolgu malzemesi; ▲ 750 ppmv, statik mikser; △ 750 ppmv, dolgu malzemesi; ● 1000 ppmv, statik mikser; ○ 1000 ppmv, dolgu malzemesi)

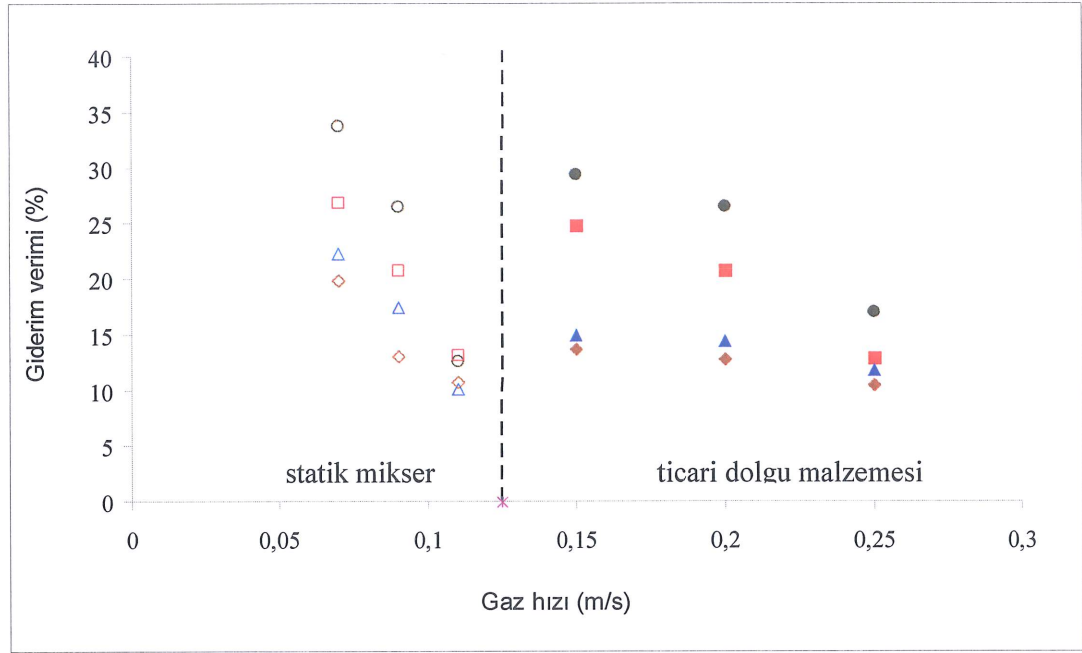
Kolon içerisinde statik mikserin kullanılmasıyla yapılan deney çalışmalarında hidrojen sülfür giderim performansının temelini araştırmak için sonuçlar gaz hızlarındaki değişiklikler göz önünde bulundurularak da değerlendirilmiştir (Şekil 4.35). Yüksek yüzey kesit alanına sahip statik mikserli gaz yıkayıcı kolonuna beslenen gaz debisi ve kolon hacmi sabit tutulduğunda dolgulu kolona göre daha düşük gaz hızı elde edilmiştir. Kolonlarda gaz hızları değiştiğinde gazın kalma süreleri de değişmektedir. Şekil 4.35'ten de görüldüğü üzere hidrojen sülfür giderim verimi kolon içindeki gaz hızının değişimi ile farklılık göstermektedir. Kolon içi gaz hızının

azalmasıyla hidrojen sülfür giderim performansının artış göstermesi gaz hızının yıkama performansının belirlenmesinde çok önemli bir parametre olduğu sonuçlardan açıkça görülmektedir.

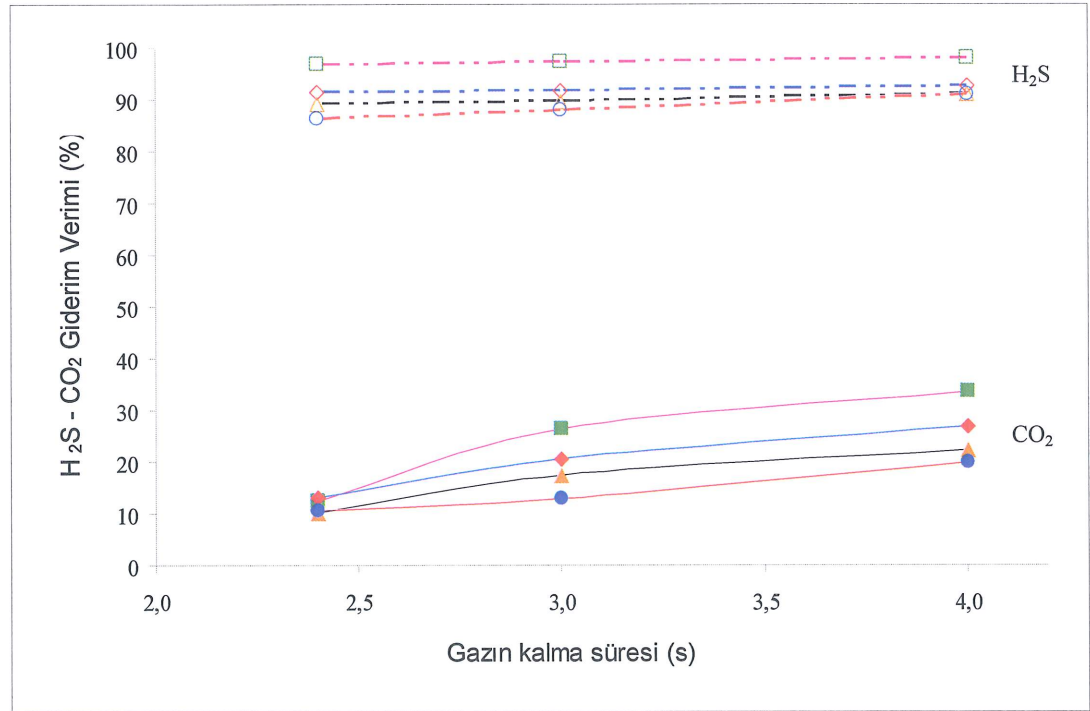


Şekil 4.35. Karışım gazı içerikli karşıt akışlı deneyde dolgulu ve statik mikserli kolonda gaz hızlarına göre H₂S giderim verimleri

Hidrojen sülfür giderimindeki aynı etkiler karbondioksit gideriminde de gözlenmiştir. Şekil 4.36, gaz hızı ile karbondioksit giderim veriminin değişimini özetlemektedir. Karbondioksit giderim veriminin gaz hızı ile değişimi iki farklı kolon tipi için araştırılmıştır. Kolonların her birinde gaz hızı arttıkça karbondioksit giderim verimi azalmaktadır. Bu sonuç, karbondioksit giderim veriminin gaz hızının yanı sıra kolon tipine de bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Şekil 4.37, statik mikserli kolonda hidrojen sülfür ve karbondioksit giderim veriminin gazın kalma süresine göre değişimini göstermektedir. Şekilde de belirtildiği üzere kalma süresinin artması verimde olumlu etki göstermektedir. Statik mikserli kolonda düşük kalma süresinde ise verimde çok fazla değişiklik oluşturmadığı görülmüştür.



Şekil 4.36. Karışım gazı içerikli karşıt akışlı deney çalışmasında CO₂ giderim verimleri (○250 ppmv H₂S, statik mikser; ● 250 ppmv H₂S, dolgu malzemesi; □ 500 ppmv H₂S, statik mikser; ■ 500 ppmv H₂S, dolgu malzemesi; △ 750 ppmv H₂S, statik mikser; ▲ 750 ppmv H₂S, dolgu malzemesi; ◇1000 ppmv H₂S, statik mikser; ◆1000 ppmv H₂S, dolgu malzemesi)



Şekil 4.37. Statik mikserli kolonda karışım gazı içerikli karşıt akışlı deney çalışmasında H₂S ve CO₂ giderim verimleri (□250 ppmv H₂S giderimi; ◇500 ppmv H₂S giderimi; △750 ppmv H₂S giderimi; ○1000 ppmv H₂S giderimi; ■ 250 ppmv H₂S akımında CO₂ giderimi; ◆ 500 ppmv H₂S akımında CO₂ giderimi; ▲ 750 ppmv H₂S akımında CO₂ giderimi; ● 1000 ppmv H₂S akımında CO₂ giderimi)

Şekil 4.32’de verilen dolgulu kolonda karışım gazı içerikli karşıt akışlı deney çalışmasındaki hidrojen sülfür (H₂S) ve karbondioksit (CO₂) giderim verimleri, Şekil 4.37’de verilen statik mikserli kolondaki hidrojen sülfür (H₂S) ve karbondioksit (CO₂) giderim verimleriyle karşılaştırıldığında, karbondioksit giderim verimlerinin her iki kolonda da birbirine yakın olduğu görülmektedir. Her iki kolonda da hidrojen sülfür giderim verimlerine bakıldığında dolgulu kolonda kalma süresinin 2 saniyeye yakın olduğu durumda giderim veriminde azalma daha fazla olmuştur. Düşük konsantrasyon değerinde (250 ppmv), 3 ve 4 saniyelik kalma süresinde her iki kolonda giderim verimi birbirine yakındır (~%97). Kalma süresinin 2 saniyeye yakın olduğu durumda dolgulu kolonda giderim verimi 250 ppmv’lik hidrojen sülfür konsantrasyonu için %81, 1000 ppmv’lik konsantrasyon için %56, statik mikserli kolonda ise 250 ppmv’lik hidrojen sülfür konsantrasyonu için %96, 1000 ppmv’lik konsantrasyon için %81’dir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında gazlı kirleticilerin giderimi üzerine yapılan incelemeler iki ana aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada gaz yıkayıcı sistemi kolonu içerisinde ticari dolgu malzemesi kullanılarak azot içeriğinde hidrojen sülfür, karışım gazı içeriğinde ise hidrojen sülfür ve karbondioksit giderim performansları analiz edilmiştir. Aynı dolgu malzemesi vasıtasıyla azot içeriğinde amonyak giderimi de incelenmiştir. İkinci aşamada ise bir statik mikser tasarlanmış olup; aynı yıkayıcı sisteminde başka bir kolon içerisine yerleştirilerek karışım gazı içeriğinde hidrojen sülfür ve karbondioksit giderim verimleri gözlenmiştir. Özellikle gazların karışımında kullanılan statik mikserlerin uygun pozisyonda gaz yıkayıcı kolonları içerisine konumlandırıldığında kirletici gazların tutulmasını ve uzaklaştırılmasını başarıyla gerçekleştirdiği görülmüştür. İki aşamada da elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmektedir.

Gaz yıkayıcı sisteminde kolon içerisinde gaz ve sıvının birbirlerine göre akım durumunun farklı olmasının verim üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla azot ve karışım gazı içerikli karşıt ve eş yönlü akışlı modlarda deneyler yapılmıştır. Ticari dolgu malzemesinin kullanıldığı kolon içerisinde azot içerikli hidrojen sülfür ve amonyak giderimi giriş akımındaki kirletici içeriğinden ve akış modlarından etkilenmeden yüksek verimle sağlandığı görülmüştür. Azot ortamında kirletici gaza ek olarak başka gazlar karışmadığı için yıkayıcı sıvı ile başka reaksiyonlar gerçekleşmeden her iki akış modunda da yüksek oranda giderim sağlanmıştır. Buna karşılık kolon içerisinde ticari dolgu malzemesinin ve statik mikserin kullanıldığı, karbondioksitin de yer aldığı karışım gazı içerikli yapılan çalışmalarda karşıt akışlı modda hidrojen sülfür giderimi yüksek verimde gerçekleştirilmiştir. Dolgulu kolonda 3 (L/dk) karışım gazı içeriğinde karşıt akışlı modda gerçekleştirilen deneyde 250 ppmv hidrojen sülfür konsantrasyonunda giderim verimi yaklaşık %96 olarak gözlenirken, eş-yönlü akışlı modda aynı konsantrasyon değeri için giderim verimi yaklaşık %48,5 olarak gözlenmiştir. Yüksek kirletici konsantrasyonunda (1000 ppmv) ise dolgulu kolonda giderim verimi karşıt akışlı modda %72, eş-yönlü modda ise %31 olarak gözlenmiştir.

Karşıt akışlı modda kirletici giderimi yüksek olmasına rağmen yüksek konsantrasyon ve debide verim azalmaktadır. Yapılan karşıt akışlı çalışmada dolgulu kolonda 5 (L/dk) debi ve 250 ppmv'lik konsantrasyonda %86 civarında giderim verimi gözlenirken, konsantrasyon 1000 ppmv'e artırıldığında aynı debi şartlarında %56 giderim verimi gözlenmiştir. Aynı akış modu ve debi şartlarında statik mikserli çalışmada 250 ppmv'lik konsantrasyon için giderim verimi %96, 1000 ppmv'lik konsantrasyon için ise yaklaşık %81'dir. Gaz giriş debisinin 3 (L/dk) olması durumunda ise dolgulu kolonda 250 ppmv'lik konsantrasyonda %96 civarında giderim verimi gözlenirken, konsantrasyon 1000 ppmv'e artırıldığında aynı debi şartlarında %72,5 giderim verimi gözlenmiştir. Statik mikserli kolonda aynı gaz giriş debisi şartlarında, 250 ppmv'lik konsantrasyonda giderim verimi yaklaşık %98, 1000 ppmv'lik konsantrasyonda ise giderim verimi yaklaşık %91 olarak gözlenmiştir.

Giriş akımındaki hidrojen sülfür miktarı arttıkça genel olarak giderim veriminin azalmasında karbondioksitin negatif yönde etkisi olduğu literatürdeki bilgiler ile doğrulanmıştır. Kirletici gaz içerisinde hidrojen sülfür ile birlikte karbondioksitin de bulunması yıkayıcı sıvı olarak sodyum hidroksit kullanıldığında, karbondioksitin sodyum hidroksit ile zayıf da olsa reaksiyon oluşturması yıkayıcı sıvının tutma performansını paylaşarak her iki kolonda da hidrojen sülfür giderim veriminde azalma meydana getirmiştir. Bu yüzden yıkayıcı sıvı olarak sodyum hidroksitin kullanıldığı proseslerde karbondioksit ile olabildiğince daha az etkileşim göstermesine dikkat edilmelidir.

Gaz yıkayıcı sistemlerinde kirletici gideriminde en önemli etkenlerden biri de gaz hızıdır. Gaz hızı kolon içerisinde kalış süresini etkilemektedir. Dolayısıyla gaz ve sıvı arasındaki temas ölçütünü belirlemektedir. Her iki kolonda da kalma süresi azaldıkça hidrojen sülfür giderim veriminde azalma meydana gelmiştir. Gaz hızının çok fazla artması, sıvı damlacıklarının yukarıya doğru sürüklenerek ve taşmanın meydana geldiği görülmüştür. Gaz hızı, geniş bir temas yüzey alanının oluşturulmasını da etkilemektedir çünkü gaz hızının yüksek olması durumunda kalma süresi azalacağından yüzeyde temas eden sıvı-gaz miktarı da azalmaktadır.

Kolon içerisinde yıkayıcı sıvı debisinin sabit tutulmasından dolayı kirli gaz içeriğinin artmasıyla verimde azalma meydana gelmesi her iki kolonda da gözlenmiştir.

Hidrojen sülfür konsantrasyonunun en düşük olduğu 250 ppmv'lik giriş akımında 3 ve 4 saniyelik kalma süreleri için her iki kolon türünde giderim verimi değerleri birbirine yakındır (~%97). Kalma süresinin 2 saniyeye yakın olduğu durumda dolgulu kolonda giderim verimi 250 ppmv'lik hidrojen sülfür konsantrasyonu için %81, 1000 ppmv'lik konsantrasyon için %56, statik mikserli kolonda ise 250 ppmv'lik hidrojen sülfür konsantrasyonu için %96, 1000 ppmv'lik konsantrasyon için %81'dir. Düşük konsantrasyon değerinde (250 ppmv), 3 ve 4 saniyelik kalma süresinde dolgulu kolon ve statik mikserli kolonda giderim verimi birbirine yakın seyretmektedir. Aynı kalma sürelerinde yüksek hidrojen sülfür konsantrasyonlarında (500-750-1000 ppmv) ise ticari dolgu malzemesi ve statik mikser ile elde edilen verim eğrileri arasındaki mesafeler artmaktadır. Yüksek konsantrasyonlarda (500-750-1000 ppmv) 3 ve 4 saniyelik kalma sürelerinde, dolgulu kolonda giderim verimi %72-87 arasında değişirken, statik mikserli kolonda bu değer %88-93 arasındadır. Statik mikserin kullanıldığı kolon çapının daha büyük olmasından dolayı gaz hızının azalarak temas süresinin artması verim bakımından oldukça faydalı olmuştur.

Her iki kolon tipi için gaz debisinin artmasıyla kirletici giderim veriminde azalmanın meydana gelmesi sıvı-gaz oranının azalmasının etkisi olarak yorumlanabilir. Kirletici içeriğine ve debisine bağlı olarak yıkayıcı sıvı debisinin de artırılarak optimum bir sıvı-gaz oranının gerekliliği yapılan hidrojen sülfür ve amonyak giderim deneyleri sonucunda elde edilmiştir.

Sonuç olarak bu çalışmada dolgu malzemesinin ve statik mikserin gaz temizlemede kullanılması deneysel olarak incelenmiş ve statik mikserin gaz temizlemede daha etkin olduğu elde edilmiştir. Düşük gaz giriş debisinde (3 L/dk) dolgulu kolonda hidrojen sülfür giderim verimi %72-96 arasındayken, statik mikserli kolonda %91-98 arasındadır. Yüksek gaz giriş debisinde (5 L/dk) ise dolgulu kolonda hidrojen sülfür giderim verimi %56-85 arasında değişim gösterirken, statik mikserli kolonda %81-96 arasında değişmektedir.

Dolgu malzemesi ve statik mikserin kirletici gideriminin yanında ekonomik ve uygulanabilirlik açısından da karşılaştırmalar yapılabilir. Statik mikserin imalatı ve üretimi daha kolay olması bakımından, dolgu malzemesine karşı daha ekonomik sayılabilir. Bununla birlikte, malzeme tedariki bakımından ekonomik bir faktör olan

dışa bağımlılığı azaltmaktadır. Statik mikserde proses esnasında meydana gelen tıkanmalara karşı daha kolay temizlenme avantajı bulunmaktadır. Bundan dolayı bakımı kolay ve uzun ömürlüdür.

Gazlı kirleticilerin, katran ve partiküllerin giderilme çalışmaları termik santrallerde ve gazlaştırma tesislerinde halen güncel bir konudur. Gaz temizleme sistemlerinin büyük bir payını oluşturan gaz yıkayıcılar üzerine araştırma geliştirme çalışmaları devam etmektedir. Her ne kadar geniş bir yelpazeye sahip olsalar da bu sistemlerin büyük prosesler için uygulamasına geçilmeden önce laboratuvar çalışmalarının yapılması kanımca daha uygun olacaktır. Farklı yıkayıcı sıvılar, farklı geometriye sahip kolonlar, farklı dolgu malzemeleri ve farklı nozulların kirletici giderim verimine olan etkilerinin araştırılmasına devam edilmesi konu ile ilgili tecrübelerin artmasına olanak sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Moussavi G., Naddafi K., Mesdaghinia A., Mohseni M., Effectiveness of hydrogen peroxide in H₂S removal by a packed high specific surface area bed scrubber, *Chem. Biochem. Eng. Q.*, 2008, **22**(1), 9-14.
- [2] Turpin A., Couvert A., Laplanche A., Paillier A., Experimental study of mass transfer and H₂S removal efficiency in a spray tower, *Chem. Eng. Process.*, 2008, **47**, 886-892.
- [3] Chang T. L., Cleaning technologies of synthesis gas, Master Degree Thesis, University of Queensland, Queensland, 2004.
- [4] Lim K. S., Lee S. H., Park H. S., Prediction for particle removal efficiency of a reverse jet scrubber, *Aerosol Sci. Tech.*, 2006, **37**, 1826-1839.
- [5] Liang C., Chen Y. J., Chang K. J., Evaluation of persulfate oxidative wet scrubber for removing BTEX gases, *J. Hazard. Mater.*, 2009, **164**, 571-579.
- [6] Jung S. H., Jeong G. T., Lee G. Y., Cha J. M., Park D. H., Simultaneous removal of SO₂, NO and particulate by pilot-scale scrubber system, *Korean J. Chem. Eng.*, 2007, **24**(6), 1064-106.
- [7] Joseph G. T., Beachler D. S., Scrubber Systems Operation Review, *North Carolina State University*, SI-412C, 25-62, 1998.
- [8] Keshavarz P., Bozorgi Y., Fathikalajahi J., Taheri M., Prediction of the spray scrubbers' performance in the gaseous and particulate scrubbing processes, *Chem. Eng. J.*, 2008, **140**, 22-31.
- [9] Zhang Z., Scrubbing Reduced Sulphur Compounds In Noncondensable Gases Using White Liquor, Master Degree Thesis, University of Toronto, Chemical Engineering and Applied Chemistry, Canada, 2004.
- [10] Mohan B. J., Jain R. K., Meikap B. C., Comprehensive analysis for prediction of dust removal efficiency using twin-fluid atomization in a spray scrubber, *Sep. Purif. Technol.*, 2008, **63**, 269-277.
- [11] Brigadeau A. H. M., Modeling and numerical investigation of high pressure gas-liquid separation, Doctor of Philosophy Thesis, Norwegian University, Science and Technology Energy and Process Engineering, Norway, 2007.
- [12] Mohan B. J., Meikap B. C., Performance characteristics of the particulate removal in a novel spray-cum-bubble column scrubber, *Chem. Eng. Res. Des.*, 2009, **87**, 109-118.

- [13] Couvert A., Sanchez C., Laplanche A., Renner C., Scrubbing intensification for sulphur and ammonia compounds removal, *Chemosphere*, 2008, **70**, 1510-1517.
- [14] Chen L., Huang J., Yang C. L., Absorption of H₂S in NaOCl caustic aqueous solution, *Environ. Prog.*, 2001, **20**(3), 175-181.
- [15] Panza D., Belgiorno V., Hydrogen sulphide removal from landfill gas, *Process Saf. Environ.*, 2010, **88**, 420-424.
- [16] Godini H. R., Mowla D., Selectivity study of H₂S and CO₂ absorption from gaseous mixtures by MEA in packed beds, *Chem. Eng. Res. Des.*, 2008, **86**, 401-409.
- [17] Biard P. F., Couvert A., Renner C., Wet scrubbing intensification applied to hydrogen sulphide removal in waste water treatment plant, *The Can. J. Chem. Eng.*, 2010, **88**, 682-687.
- [18] Ohtsuka Y., Tsubouchi N., Kikuchi T., Hashimoto H., Recent progress in Japan on hot gas cleanup of hydrogen chloride, hydrogen sulfide and ammonia in coal-derived fuel gas, *Powder Technol.*, 2009, **90**(3), 340-347.
- [19] Wang D., Teo W. K., Li K., Selective removal of trace H₂S from gas streams containing CO₂ using hollow fibre membrane modules/contractors, *Sep. Purif. Technol.*, 2004, **35**, 125-131.
- [20] Wallin M., Olausson S., Simultaneous absorption of H₂S and CO₂ into a solution of sodium carbonate, *Chem. Eng. Comm.*, 1993, **123**, 43-59.
- [21] Bontozoglou V., and Karabelas A. J., Numerical calculation of simultaneous absorption of H₂S and CO₂ in aqueous hydroxide solutions, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1991, **30**(12), 2598-2603.
- [22] Shao N., Gas-liquid two-phase flow and reaction in microstructured reactors, Doctor of Philosophy Thesis, University College London, Chemical Engineering Department, London, 2010.
- [23] Thomas D., Colle S., and Vanderschuren J., Designing wet scrubbers for SO₂ absorption into fairly concentrated sulfuric acid solutions containing hydrogen peroxide, *Chem. Eng. Technol.*, 2003, **26**, 497-502.
- [24] Colle S., Thomas D., and Vanderschuren J., Process simulation of sulphur dioxide abatement with hydrogen peroxide solutions in a packed column, *Chem. Eng. Res. Des.*, 2005, **83**, 81-87.
- [25] Couvert A., Charron I., Laplanche A., Renner C., Patria L., Requieme B., Treatment of odorous sulphur compounds by chemical scrubbing with hydrogen peroxide-Application to a laboratory plant, *Chem. Eng. Sci.*, 2006, **61**, 7240-7248.

- [26] Brettschneider O., Thiele R., Faber R., Thielert H., Experimental investigation and simulation of the chemical absorption in a packed column for the system $\text{NH}_3\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{S-NaOH-H}_2\text{O}$, *Sep. Purif. Technol.*, 2004, **39**, 139-159.
- [27] Mahmoudkhani M., Heidel K. R., Ferreira J. C., Keith D. W., Cherry R. S., Low energy packed tower and caustic recovery for direct capture of CO_2 from air, *Energy Procedia*, 2009, **1**, 1535-1542.
- [28] Mamrosh D., Beitler C., Fisher K., Stem S., Consider improved scrubbing designs for acid gases, *Hydrocarb. Process.*, 2008, **14**, 69-74.
- [29] Lei W., and Dasgupta P. K., Determination of sulfide and mercaptans in caustic scrubbing liquor, *Analytica Chemica. Acta.*, 1989, **226**, 165-170.
- [30] Pröll T., Siefert I. G., Friedl A., Hofbauer H., Removal of NH_3 from biomass gasification producer gas by water condensing in an organic solvent scrubber, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2005, **44**, 1576-1584.
- [31] Sieres J., Seara J., F., Mass transfer characteristics of a structured packing for ammonia rectification in ammonia-water absorption refrigeration systems, *Int. J. Refrig.*, 2007, **30**, 58-67.
- [32] Spedding P. L., Munro P. A., Jones M. T., Ammonia absorption into water in a packed tower 1: Characterization of packing and liquid distribution, *The Chem. Eng. J.*, 1986, **32**, 65-76.
- [33] Spedding P. L., Jones M. T., Lightsey G. R., Ammonia absorption into water in a packed tower 2: Measurement of mass transfer coefficients, *The Chem. Eng. J.*, 1986, **32**, 151-163.
- [34] Lee B., Lee C. K., and Lee D. S., Development of an automated diffusion scrubber-conductometry system for measuring atmospheric ammonia, *Bull. Korean Chem. Soc.*, 2011, **32(6)**, 2039-2044.
- [35] Jia Y., Zhong Q., Fan X., Chen Q., Sun H., Modeling of ammonia-based wet flue gas desulfurization in the spray scrubber, *Korean J. Chem. Eng.*, 2011, **28(4)**, 1058-1064.
- [36] Chungsiriporn J., Bunyakan C., and Thepchai R., Ammonia removal from emission air in packed column, *The Fourth PSU Engineering Conference*, Songkla, Thailand, 8-9 December 2005.
- [37] Ruivo R., Paiva A., Simoes P. C., Hydrodynamics and mass transfer of a static mixer at high pressure conditions, *Chem. Eng. Process.*, 2006, **45**, 224-231.
- [38] Couvert A., Sanchez C., Charron I., Laplanche A., Renner C., Static mixers with a gas continuous phase, *Chem. Eng. Sci.*, 2006, **61**, 3429-3434.
- [39] Couvert A., Sanchez C., Laplanche A., Renner C., Levasseur J. P., Design of a new compact scrubber for deodorisation, *Chem. Eng. Process.*, 2008, **47**, 1793-1798.

- [40] Cavatorta O. N., Böhm U., Giorgio A. M. C., Fluid-dynamic and mass-transfer behavior of static mixers and regular packings, *AIChE J.*, 1999, **45**(5), 938-948.
- [41] Sanchez C., Couvert A., Laplanche A., and Renner C., New compact scrubber for odour removal in wastewater treatment plants, *Water Sci. Technol.*, 2006, **54**(9), 45-52.
- [42] Theron F., Sauze N., L., Comparison between three static mixers for emulsification in turbulent flow, *Int. J. Multiphas. Flow*, 2011, **37**, 488-500.
- [43] Couvert A., Peculier M. F., and Laplanche A., Pressure drop and mass transfer study in static mixers with gas continuous phase, *The Can. J. Chem. Eng.*, 2002, **80**, 727-733.
- [44] Birrer F. R., Böhm U., Gas-liquid dispersions in structured packing with high-viscosity liquids, *Chem. Eng. Sci.*, 2004, **59**, 4385-4392.
- [45] Monnier H., Falk L., Lapique F., Hadjoudj R., Roizard C., Intensification of G/L absorption in microstructured falling film. Application to the treatment of chlorinated VOC's- part I: Comparison between structured and microstructured packings in absorption devices, *Chem. Eng. Sci.*, 2010, **65**, 6425-6434.
- [46] Bhave A. G., Vyas D. K., Patel J. B., A wet packet bed scrubber-based producer gas cooling-cleaning system, *Renew. Energ.*, 2008, **33**, 1716-1720.
- [47] Madhuranthakam C. M. R., Pan Q., and Rempel G. L., Hydrodynamics in Sulzer SMX static mixer with air/water system, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2009, **48**, 719-726.
- [48] Stockfleth R., Brunner G., Hydrodynamics of a packed countercurrent column for the gas extraction, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1999, **38**, 4000-4006.
- [49] Lehner M., Hoffmann K., Geipel W., Hydrodynamic and mass transfer characteristic of a novel grid-structured plastic packing, *Heat Mass Transfer*, 2011, **47**, 1035-1041.
- [50] Dang V. J., Manero M. H., Roustan M., Absorption of volatile organic compounds in a tower packed with a structured packing I: Hydrodynamic study, *Entropie*, 1998, **34**, 3-10.
- [51] Fair J. R., Seibert A. F., Behrens M., Saraber P. P., Olujic Z., Structured packing performance-experimental evaluation of two predictive models, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2000, **39**, 1788-1796.
- [52] Ballaguet J. P., Barrere-Tricca C., Streicher C., Improvements to tail gas treatment process, *Petrol. Technol. Quarterly*, 2003, **5**, 109-115.
- [53] Hirech K., Arhaliass A., and Legrand J., Experimental investigation of flow regimes in an SMX Sulzer static mixer, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2003, **42**, 1478-1484.

- [54] Ellenberg J., Krishna R., Counter-current operation of structured catalytically packed distillation columns: pressure drop, holdup and mixing, *Chem. Eng. Sci.*, 1999, **54**, 1339-1345.
- [55] Bandyopadhyay A., Biswas M. N., SO₂ scrubbing in a tapered bubble column scrubber, *Chem. Eng. Comm.*, 2006, **193**, 1562-1580.
- [56] Sarkar S., Meikap B. C., Chatterjee S. G., Modeling of removal of sulfur dioxide from flue gases in a horizontal cocurrent gas-liquid scrubber, *Chem. Eng. J.*, 2007, **131**, 263-271.
- [57] Park S. H., Lee B. K., Development and application of a novel swirl cyclone scrubber (2): Theoretical, *J. Hazard. Mater.*, 2009, **164**, 315-321.
- [58] Ananthanarayanan N. V., and Viwanathan S., Effect of nozzle arrangement on venturi scrubber performance, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1999, **38**, 4889-4900.
- [59] Aliabad Z., and Mirzaei S., Removal of CO₂ and H₂S using aqueous alkanolamine solutions, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2009, **49**, 194-203.
- [60] Li S., Li C., Zeng G., Wang F., Wang D., Lu P., Simulation and experimental validation studies on a new type umbrella plate scrubber, *Sep. Purif. Technol.*, 2008, **62**, 323-329.
- [61] Li S., Li C., Zeng G., Wang F., Wang D., CFD simulation on performance of new type umbrella plate scrubber, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2008, **18**, 488-492.
- [62] Dubois L., Thomas D., Comparison of various alkaline solutions for H₂S/CO₂-selective absorption applied to biogas purification, *Chem. Eng. Technol.*, 2010, **33**(10), 1601-1609.
- [63] Mandal B. P., Biswas A. K., Bandyopadhyay S. S., Selective absorption of H₂S from gas streams containing H₂S and CO₂ into aqueous solutions of N-methyldiethanolamine and 2-amino-2-methyl-1-propanol, *Sep. Purif. Technol.*, 2004, **35**, 191-202.
- [64] Stockfleth R., and Brunner G., Holdup, pressure drop, and flooding in packed countercurrent columns for the gas extraction, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2001, **40**, 347-356.
- [65] Ataki A., Wetting of structured packing elements-CFD and experiment, Doctor of Philosophy Thesis, Technical University of Kaiserslautern, Mechanical and Process Engineering Department, Kaiserslautern, 2006.
- [66] Lu J. G., Zheng Y. F., He D. L., Selective absorption of H₂S from gas mixtures into aqueous solutions of blended amines of methyldiethanolamine and 2-tertiarybutylamino-2-ethoxyethanol in a packed column, *Sep. Purif. Technol.*, 2006, **52**, 209-217.

- [67] Silva A. M., Teixeira C. F., Experiments in a large-scale venturi scrubber Part-1: Pressure drop, *Chem. Eng. Process.*, 2009, **48**, 59-67.
- [68] Viswanathan S., Examination of liquid film characteristics in the prediction of pressure drop in a venturi scrubber, *Chem. Eng. Sci.*, 1998, **53**(17), 3161-3175.
- [69] Silva A. M., Teixeira C. F., Experiments in a large-scale venturi scrubber Part-2: Droplet size, *Chem. Eng. Process.*, 2009, **48**, 424-431.
- [70] Pak S. I., Chang K. S., Performance estimation of a venturi scrubber using a computational model for capturing dust particles with liquid spray, *J. Hazard. Mater.*, 2006, **138**, 560-573.
- [71] Ribeiro A. P., Tognetti E. R., Gonçalves A. S., Coury J. R., A study on the collection efficiency of venturi scrubbers with multi-orifice injection, *The Fourth Mercosur Congress on Process Systems Engineering*, Brazil, 1-7 March 2007.
- [72] Ravindram M., and Pyla N., Modeling of venturi scrubber for the control of gaseous pollutants, *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, 1986, **25**(1), 35-39.
- [73] Val'dberg A. Y., and Safonov S. G., Designing a venturi scrubber with adjustable throat section, *Chem. Petrol. Eng.*, 2004, **40**, 163-164.
- [74] Stone N., Pickle line fume control with plate scrubbers, *AISE Conference*, Pittsburgh, 23-26 September 1991.
- [75] Richards J. R., Control of gaseous emissions, *North Carolina State University*, APTI-415, 161-175, 2000.
- [76] Crowder J. W., Keener T., Harrison P. D., Smith T., Control of particulate matter emissions, *Environmental Protection Agency*, APTI-413, 27-41, 2001.
- [77] Lin C. W., Chang P. Y., Formation and emission of chlorinated by-products from a bench-scale packed-bed odor scrubber, *Water Air Soil Poll.*, 2005, **162**, 19-35.
- [78] Mackowiak J., Model for the prediction of liquid phase mass transfer of random packed columns for gas-liquid systems, *Chem. Eng. Res. Des.*, 2011, **89**, 1308-1320.
- [79] Mackowiak J., Extended channel model for prediction of the pressure drop in single-phase flow in packed columns, *Chem. Eng. Res. Des.*, 2009, **87**, 123-134.
- [80] Ellenberger J., and Krishna R., Counter-current operation of structured catalytically packed distillation columns: pressure drop, holdup and mixing, *Chem. Eng. Sci.*, 1999, **54**, 1339-1345.
- [81] Perry R. H., and Chilton C. H., *Chemical Engineers' Handbook*, 5th ed., Mc Graw-Hill Companies, New York, 2008.

- [82] Bilet R., *Packed Towers in Processing and Environmental Technology*, 1st ed., Wiley-VCH, Weinheim, 1995.
- [83] Bagheri S. R., Jamshidi E., Najafabadi A., Removal of the gas pollutants of a thermal oxidizer with a dynamic scrubber, *Chem. Eng. Technol.*, 2007, **30**(2), 250-254.
- [84] Mahmoudkhani M., Heidel K. R., Ferreira J. C., Keith D. W., Cherry R. S., Low energy packed tower and caustic recovery for direct capture of CO₂ from air, *Energy Procedia*, 2009, **1**, 1535-1542.
- [85] Adisorn A., Paitoon T., Mass transfer coefficients and correlation for CO₂ absorption into 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP) using structured packing, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1998, **37**, 569-575.
- [86] Dankworth D. C., and Sundaresan S., A macroscopic model for countercurrent gas-liquid flow in packed columns, *AIChE J.*, 1989, **35**(8), 1282-1292.
- [87] Calvert S., Goldschmid J., Leith D., and Mehta D., Wet scrubber system study, *Environmental Protection Agency*, EPA-R272118a, 58-77, 1972.
- [88] Kolev N., *Packed Bed Columns for Absorption, Desorption, Rectification and Direct Heat Transfer*, 1st ed., Elsevier, Amsterdam, 2006.
- [89] Kohl A., and Nielsen R., *Gas Purification*, 5th ed., Gulf Publishing Company, Houston, 1997.
- [90] Çataltaş İ., *Kimya mühendisliğine giriş, ünit operasyonlar*, 2. baskı, İnkilap ve Aka Kitapevi, İstanbul, 1975.
- [91] Seader J. D., Henley E. J., *Separation process principles*, 2nd ed., John Wiley&Sons, Inc., New York, 1998.
- [92] Green C. W., Hydraulic characterization of structured packing via X-ray computed tomography, Doctor of Philosophy Thesis, The University of Texas, Chemical Engineering Department, Austin, 2006.
- [93] Erasmus A. B., Mass transfer in structured packing, Doctor of Philosophy Thesis, University of Stellenbosch, Department of Process Engineering, Stellenbosch, 2004.
- [94] Mahr B., and Mewes D., Two-phase flow in structured packings: Modeling and calculation on a macroscopic scale, *AIChE J.*, 2008, **54**(3), 614-626.
- [95] Tsai R. E., Seibert A. F., Eldridge R. B., and Rochelle G. T., A dimensionless model for predicting the mass-transfer area of structured packing, *AIChE J.*, 2011, **57**(5), 1173-1184.
- [96] Rautenbach C., Modelling of flow through porous packing elements of a CO₂ absorption tower, Master Degree Thesis, University of Stellenbosch, Department of Mathematical Sciences, Stellenbosch, 2009.

- [97] Rao C. S., *Environmental Pollution Control Engineering*, 2nd ed., New Age International Publishers, New Delhi, 2006.
- [98] Stolaroff J. K., Keith D. W., and Lowry G. V., Carbon dioxide capture from atmospheric air using sodium hydroxide spray, *Environ. Sci. Technol.*, 2008, **42**, 2728-2735.
- [99] Lin C., Chen B., Carbon dioxide absorption into NaOH solution in a cross-flow rotating packed bed, *J. Ind. Eng. Chem.*, 2007, **13**(7), 1083-1090.

EKLER

EK-A**Tablo A.1. 3 (L/dk) karışım gazı içeriğinde H₂S giderimi için dolgu kolonda karşıt akışlı deney sonuçları**

Giriş Konsantrasyonu	Deney No	H ₂ S Çıkış Değeri (ppmv)	Hata Payı (ppmv) (+/-)	Ortalama Değer (ppmv)	Ortalama Hata Payı (ppmv) (+/-)	Standart Sapma	Bağlı Hata (%)	Giderim Verimi (%)
250 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	8,7	0,26	8,9	0,26	0,46	5,1	96,4
	2	9,4	0,28					
	3	8,0	0,24					
	4	9,3	0,28					
	5	8,7	0,26					
	6	9,0	0,27					
500 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	77,5	2,33	82,1	2,46	5,3	5,2	83,0
	2	85,8	2,57					
	3	91,2	2,74					
	4	80,0	2,40					
	5	78,6	2,36					
	6	79,7	2,39					
750 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	188,9	5,67	180,4	5,41	8,3	4,6	75,4
	2	176,5	5,30					
	3	180,4	5,41					
	4	185,8	5,57					
	5	170,6	5,12					
1000 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	263,5	7,91	274,0	8,22	6,8	2,5	72,5
	2	282,7	8,48					
	3	275,8	8,27					
	4	271,0	8,13					
	5	286,2	8,59					
	6	272,0	8,16					
	7	270,1	8,10					
	8	271,3	8,14					

Tablo A.2. 3 (L/dk) karışım gazı içeriğinde CO₂ giderimi için dolgulu kolonda karşıt akışlı deney sonuçları

Giriş Konsantrasyonu	Deney No	CO ₂ Çıkış Değeri (%)	Hata Payı (%) (+/-)	Ortalama Değer (%)	Ortalama Hata Payı (%) (+/-)	Standart Sapma	Bağlı Hata (%)	Giderim Verimi (%)
250 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	17,5	0,53	17,5	0,52	0,21	1,2	29,4
	2	17,5	0,53					
	3	17,8	0,53					
	4	17,6	0,53					
	5	17,2	0,52					
	6	17,7	0,53					
500 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	18,6	0,56	18,7	0,56	0,12	0,7	24,8
	2	18,8	0,56					
	3	18,9	0,57					
	4	18,7	0,56					
	5	18,7	0,56					
	6	18,7	0,56					
750 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	21,5	0,65	21,2	0,63	0,27	1,2	15,0
	2	20,9	0,63					
	3	21,3	0,64					
	4	21,1	0,63					
	5	21,1	0,63					
1000 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	21,6	0,65	21,5	0,64	0,38	1,8	13,7
	2	21,0	0,63					
	3	21,9	0,66					
	4	21,6	0,65					
	5	21,0	0,63					
	6	21,7	0,65					
	7	21,9	0,66					
	8	21,9	0,66					

Tablo A.3. 4 (L/dk) karışım gazı içeriğinde H₂S giderimi için dolgulu kolonda karşıt akışlı deney sonuçları

Giriş Konsantrasyonu	Deney No	H ₂ S Çıkış Değeri (ppmv)	Hata Payı (ppmv) (+/-)	Ortalama Değer (ppmv)	Ortalama Hata Payı (ppmv) (+/-)	Standart Sapma	Bağlı Hata (%)	Giderim Verimi (%)
250 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	10,5	0,32	11,1	0,33	0,45	4,0	95,5
	2	11,3	0,34					
	3	10,8	0,32					
	4	11,0	0,33					
	5	11,9	0,36					
	6	11,6	0,35					
	7	10,9	0,33					
500 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	120,4	3,61	126,7	3,80	3,57	2,7	74,6
	2	123,7	3,71					
	3	131,0	3,93					
	4	131,2	3,94					
	5	128,0	3,84					
	6	126,6	3,80					
	7	126,0	3,78					
750 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	202,1	6,06	203,1	6,09	2,26	1,2	72,9
	2	207,6	6,23					
	3	203,5	6,11					
	4	201,7	6,05					
	5	203,4	6,10					
	6	200,4	6,01					
1000 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	285,0	8,55	281,1	8,43	2,50	0,9	71,8
	2	280,1	8,40					
	3	283,6	8,51					
	4	277,4	8,32					
	5	281,0	8,43					
	6	279,9	8,40					

Tablo A.4. 4 (L/dk) karışım gazı içeriğinde CO₂ giderimi için dolgulu kolonda karışıt akışlı deney sonuçları

Giriş Konsantrasyonu	Deney No	CO ₂ Çıkış Değeri (%)	Hata Payı (%) (+/-)	Ortalama Değer (%)	Ortalama Hata Payı (%) (+/-)	Standart Sapma	Bağlı Hata (%)	Giderim Verimi (%)
250 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	18,2	0,55	18,3	0,55	0,24	1,3	26,5
	2	18,7	0,56					
	3	18,5	0,56					
	4	18,5	0,56					
	5	18,2	0,55					
	6	18,4	0,55					
	7	18,0	0,54					
500 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	20,4	0,61	20,4	0,61	0,14	0,7	18,2
	2	20,6	0,62					
	3	20,4	0,61					
	4	20,4	0,61					
	5	20,6	0,62					
	6	20,5	0,62					
	7	20,2	0,61					
750 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	21,7	0,65	21,4	0,64	0,55	2,4	14,4
	2	20,6	0,62					
	3	20,8	0,62					
	4	21,9	0,66					
	5	21,7	0,65					
	6	21,7	0,65					
1000 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	21,9	0,66	21,7	0,65	0,11	0,5	12,8
	2	21,8	0,65					
	3	21,8	0,65					
	4	21,7	0,65					
	5	21,8	0,65					
	6	21,7	0,65					

Tablo A.5. 5 (L/dk) karışım gazı içeriğinde H₂S giderimi için dolgulu kolonda karşıt akışlı deney sonuçları

Giriş Konsantrasyonu	Deney No	H ₂ S Çıkış Değeri (ppmv)	Hata Payı (ppmv) (+/-)	Ortalama Değer (ppmv)	Ortalama Hata Payı (ppmv) (+/-)	Standart Sapma	Bağlı Hata (%)	Giderim Verimi (%)
250 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	36,3	1,09	35,0	1,05	2,33	5,8	85,9
	2	33,0	0,99					
	3	37,5	1,13					
	4	32,5	0,98					
	5	32,0	0,96					
500 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	166,7	5,00	164,8	4,94	4,12	2,5	67,0
	2	161,0	4,83					
	3	169,4	5,08					
	4	171,6	5,15					
	5	161,8	4,85					
	6	162,1	4,86					
	7	164,3	4,93					
750 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	298,3	8,95	304,8	9,14	3,42	1,2	59,3
	2	306,2	9,19					
	3	303,4	9,10					
	4	309,0	9,27					
	5	307,2	9,22					
	6	304,0	9,12					
1000 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	428,0	12,84	435,9	13,07	13,2	3,0	56,4
	2	455,0	13,65					
	3	446,8	13,40					
	4	443,7	13,31					
	5	422,3	12,67					
	6	420,0	12,60					

Tablo A.6. 5 (L/dk) karışım gazı içeriğinde CO₂ giderimi için dolgulu kolonda karışıt akışlı deney sonuçları

Giriş Konsantrasyonu	Deney No	CO ₂ Çıkış Değeri (%)	Hata Payı (%) (+/-)	Ortalama Değer (%)	Ortalama Hata Payı (%) (+/-)	Standart Sapma	Bağlı Hata (%)	Giderim Verimi (%)
250 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	20,9	0,63	20,7	0,62	0,29	1,4	17,0
	2	21,1	0,63					
	3	20,4	0,61					
	4	20,9	0,63					
	5	20,4	0,61					
500 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	21,9	0,66	21,7	0,65	0,25	1,2	12,9
	2	22,0	0,66					
	3	21,4	0,64					
	4	21,7	0,65					
	5	22,1	0,66					
	6	21,7	0,65					
	7	21,6	0,65					
750 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	21,6	0,65	22,0	0,66	0,24	1,1	11,8
	2	22,1	0,66					
	3	22,3	0,67					
	4	22,2	0,67					
	5	22,0	0,66					
	6	22,1	0,66					
1000 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	22,4	0,67	22,3	0,66	0,20	0,9	10,5
	2	22,0	0,66					
	3	22,5	0,68					
	4	22,5	0,68					
	5	22,4	0,67					
	6	22,4	0,67					

Tablo A.7. 3 (L/dk) karışım gazı içeriğinde H₂S giderimi için dolgulu kolonda eş yönlü akışlı deney sonuçları

Giriş Konsantrasyonu	Deney No	H ₂ S Çıkış Değeri (ppmv)	Hata Payı (ppmv) (+/-)	Ortalama Değer (ppmv)	Ortalama Hata Payı (ppmv) (+/-)	Standart Sapma	Bağlı Hata (%)	Giderim Verimi (%)
250 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	125,9	3,78	129,2	3,87	2,02	1,5	48,3
	2	132,0	3,96					
	3	131,4	3,94					
	4	128,9	3,87					
	5	129,0	3,87					
	6	128,2	3,85					
500 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	293,8	8,81	298,7	8,96	8,86	2,9	40,2
	2	301,3	9,04					
	3	318,9	9,57					
	4	290,0	8,70					
	5	297,8	8,93					
	6	295,2	8,86					
	7	294,0	8,82					
750 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	442,5	13,28	453,7	13,61	8,31	1,8	39,5
	2	467,0	14,01					
	3	458,7	13,76					
	4	450,5	13,52					
	5	452,8	13,58					
	6	451,0	13,53					
1000 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	688,0	20,64	685,6	20,56	5,81	0,9	31,4
	2	695,7	20,87					
	3	681,4	20,44					
	4	686,6	20,60					
	5	682,2	20,47					
	6	680,0	20,40					

Tablo A.8. 3 (L/dk) karışım gazı içeriğinde CO₂ giderimi için dolgulu kolonda eş yönlü akışlı deney sonuçları

Giriş Konsantrasyonu	Deney No	CO ₂ Çıkış Değeri (%)	Hata Payı (%) (+/-)	Ortalama Değer (%)	Ortalama Hata Payı (%) (+/-)	Standart Sapma	Bağlı Hata (%)	Giderim Verimi (%)
250 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	22,4	0,67	22,0	0,66	0,43	1,9	11,8
	2	22,1	0,66					
	3	21,9	0,66					
	4	21,8	0,65					
	5	22,6	0,68					
	6	21,4	0,64					
500 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	22,9	0,69	22,6	0,67	0,23	1,1	9,6
	2	22,4	0,67					
	3	22,7	0,68					
	4	22,7	0,68					
	5	22,8	0,68					
	6	22,4	0,67					
	7	22,3	0,67					
750 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	22,7	0,68	22,6	0,67	0,07	0,5	9,5
	2	22,6	0,68					
	3	22,7	0,68					
	4	22,6	0,68					
	5	22,6	0,68					
	6	22,5	0,68					
1000 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	23,5	0,71	23,4	0,70	0,20	0,9	6,4
	2	23,4	0,70					
	3	23,7	0,71					
	4	23,3	0,70					
	5	23,4	0,70					
	6	23,1	0,69					

Tablo A.9. 3 (L/dk) karışım gazı içeriğinde H₂S giderimi için statik mikserli kolonda karşıt akışlı deney sonuçları

Giriş Konsantrasyonu	Deney No	H ₂ S Çıkış Değeri (ppmv)	Hata Payı (ppmv) (+/-)	Ortalama Değer (ppmv)	Ortalama Hata Payı (ppmv) (+/-)	Standart Sapma	Bağlı Hata (%)	Giderim Verimi (%)
250 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	4,6	0,14	4,4	0,13	0,23	5,2	98,2
	2	4,2	0,13					
	3	4,3	0,13					
	4	4,4	0,13					
	5	4,7	0,14					
	6	4,2	0,13					
500 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	34,2	1,03	35,7	1,07	1,10	3,0	92,8
	2	36,8	1,10					
	3	35,6	1,07					
	4	36,1	1,08					
	5	37,1	1,11					
	6	35,9	1,08					
	7	34,4	1,03					
750 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	65,0	1,95	65,8	1,97	2,05	2,0	91,2
	2	67,7	2,03					
	3	67,7	2,03					
	4	66,1	1,98					
	5	62,8	1,88					
1000 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	90,7	2,72	88,0	2,64	1,57	1,8	91,1
	2	89,2	2,68					
	3	88,4	2,65					
	4	87,9	2,64					
	5	87,6	2,63					
	6	86,1	2,58					
	7	86,5	2,60					

Tablo A.10. 3 (L/dk) karışım gazı içeriğinde CO₂ giderimi için statik mikserli kolonda karşıt akışlı deney sonuçları

Giriş Konsantrasyonu	Deney No	CO ₂ Çıkış Değeri (%)	Hata Payı (%) (+/-)	Ortalama Değer (%)	Ortalama Hata Payı (%) (+/-)	Standart Sapma	Bağlı Hata (%)	Giderim Verimi (%)
250 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	16,8	0,50	16,5	0,49	0,60	3,6	33,8
	2	15,9	0,48					
	3	16,8	0,50					
	4	15,7	0,47					
	5	17,2	0,52					
	6	16,9	0,51					
500 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	18,7	0,56	18,3	0,54	0,25	1,4	26,9
	2	18,5	0,56					
	3	18,6	0,56					
	4	18,4	0,55					
	5	18,1	0,54					
	6	18,2	0,55					
	7	18,1	0,54					
750 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	19,9	0,60	19,4	0,58	0,45	2,3	22,3
	2	18,7	0,56					
	3	19,2	0,58					
	4	19,5	0,59					
	5	19,6	0,59					
1000 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	19,5	0,59	19,4	0,58	0,20	1,1	22,0
	2	19,4	0,58					
	3	19,7	0,59					
	4	19,5	0,59					
	5	19,1	0,57					
	6	19,5	0,59					
	7	19,2	0,58					

Tablo A.11. 4 (L/dk) karışım gazı içeriğinde H₂S giderimi için statik mikserli kolonda karşıt akışlı deney sonuçları

Giriş Konsantrasyonu	Deney No	H ₂ S Çıkış Değeri (ppmv)	Hata Payı (ppmv) (+/-)	Ortalama Değer (ppmv)	Ortalama Hata Payı (ppmv) (+/-)	Standart Sapma	Bağlı Hata (%)	Giderim Verimi (%)
250 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	6,6	0,20	6,3	0,18	0,33	5,2	97,4
	2	6,8	0,20					
	3	6,1	0,18					
	4	6,4	0,19					
	5	6,2	0,19					
	6	5,9	0,18					
500 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	42,0	1,26	40,6	1,21	0,98	2,4	91,8
	2	41,5	1,25					
	3	40,6	1,22					
	4	41,2	1,24					
	5	40,8	1,22					
	6	39,3	1,18					
750 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	77,3	2,32	76,3	2,28	0,74	1,1	89,8
	2	76,2	2,29					
	3	77,1	2,31					
	4	75,8	2,27					
	5	76,3	2,29					
	6	75,4	2,26					
1000 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	122,6	3,68	120,0	3,60	1,88	1,6	87,9
	2	120,5	3,62					
	3	118,3	3,55					
	4	121,4	3,64					
	5	119,7	3,59					
	6	117,6	3,53					

Tablo A.12. 4 (L/dk) karışım gazı içeriğinde CO₂ giderimi için statik mikserli kolonda karşıt akışlı deney sonuçları

Giriş Konsantrasyonu	Deney No	CO ₂ Çıkış Değeri (%)	Hata Payı (%) (+/-)	Ortalama Değer (%)	Ortalama Hata Payı (%) (+/-)	Standart Sapma	Bağlı Hata (%)	Giderim Verimi (%)
250 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	18,0	0,54	17,3	0,54	0,47	2,7	30,2
	2	17,3	0,52					
	3	17,1	0,51					
	4	17,0	0,51					
	5	18,1	0,54					
	6	17,6	0,53					
500 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	19,0	0,57	18,2	0,54	0,39	2,2	26,7
	2	18,4	0,55					
	3	18,2	0,55					
	4	18,0	0,54					
	5	18,3	0,55					
	6	18,0	0,54					
750 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	20,7	0,62	20,6	0,61	0,48	2,4	17,5
	2	20,9	0,63					
	3	20,3	0,61					
	4	21,2	0,64					
	5	20,6	0,62					
	6	19,8	0,59					
1000 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	21,8	0,65	21,7	0,65	0,23	1,1	13,1
	2	21,3	0,64					
	3	21,7	0,65					
	4	22,0	0,66					
	5	21,6	0,65					
	6	21,7	0,65					

Tablo A.13. 5 (L/dk) karışım gazı içeriğinde H₂S giderimi için statik mikserli kolonda karşıt akışlı deney sonuçları

Giriş Konsantrasyonu	Deney No	H ₂ S Çıkış Değeri (ppmv)	Hata Payı (ppmv) (+/-)	Ortalama Değer (ppmv)	Ortalama Hata Payı (ppmv) (+/-)	Standart Sapma	Bağlı Hata (%)	Giderim Verimi (%)
250 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	7,8	0,23	7,5	0,22	0,36	4,7	96,9
	2	8,1	0,24					
	3	7,6	0,23					
	4	7,3	0,22					
	5	7,4	0,22					
	6	7,1	0,21					
500 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	42,0	1,26	41,6	1,24	0,98	2,4	91,6
	2	42,6	1,28					
	3	42,9	1,29					
	4	41,3	1,24					
	5	41,6	1,25					
	6	40,3	1,21					
	7	40,5	1,22					
750 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	80,6	2,42	80,4	2,41	0,84	1,1	89,3
	2	79,1	2,37					
	3	80,9	2,43					
	4	81,3	2,44					
	5	80,2	2,41					
1000 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	131,5	3,95	133,8	4,01	2,37	1,8	81,6
	2	137,7	4,13					
	3	135,5	4,07					
	4	132,3	3,97					
	5	133,8	4,01					
	6	132,2	3,97					

Tablo A.14. 5 (L/dk) karışım gazı içeriğinde CO₂ giderimi için statik mikserli kolonda karşıt akışlı deney sonuçları

Giriş Konsantrasyonu	Deney No	CO ₂ Çıkış Değeri (%)	Hata Payı (%) (+/-)	Ortalama Değer (%)	Ortalama Hata Payı (%) (+/-)	Standart Sapma	Bağlı Hata (%)	Giderim Verimi (%)
250 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	21,8	0,65	21,8	0,65	0,47	2,2	12,6
	2	22,3	0,67					
	3	22,0	0,66					
	4	21,7	0,65					
	5	21,0	0,63					
	6	22,2	0,67					
500 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	21,6	0,65	21,7	0,65	0,43	1,9	13,1
	2	22,2	0,67					
	3	22,1	0,66					
	4	21,9	0,66					
	5	21,3	0,64					
	6	21,0	0,63					
	7	21,7	0,65					
750 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	22,7	0,68	22,4	0,67	0,39	1,7	10,1
	2	22,1	0,66					
	3	22,8	0,68					
	4	22,7	0,68					
	5	22,0	0,66					
1000 ppmv H ₂ S %25 CO ₂ %25 CH ₄	1	22,2	0,67	22,3	0,66	0,17	0,8	10,8
	2	22,6	0,68					
	3	22,3	0,67					
	4	22,4	0,67					
	5	22,1	0,66					
	6	22,3	0,67					

Tablo A.15. 3 (L/dk) azot içerikli H₂S giderimi için dolgulu kolonda karşıt akışlı deney sonuçları

Giriş Konsantrasyonu	Deney No	H ₂ S Çıkış Değeri (ppmv)	Hata Payı (ppmv) (+/-)	Ortalama Değer (ppmv)	Ortalama Hata Payı (ppmv) (+/-)	Standart Sapma	Bağlı Hata (%)	Giderim Verimi (%)
250 ppmv H ₂ S	1	0,36	0,01	0,39	0,01	0,02	4,6	99,85
	2	0,40	0,01					
	3	0,38	0,01					
	4	0,42	0,01					
	5	0,40	0,01					
	6	0,38	0,01					
	7	0,40	0,01					
	8	0,40	0,01					
500 ppmv H ₂ S	1	1,40	0,04	1,38	0,04	0,06	4,5	99,73
	2	1,38	0,04					
	3	1,50	0,05					
	4	1,40	0,04					
	5	1,28	0,04					
	6	1,36	0,04					
	7	1,34	0,04					
	8	1,40	0,04					
750 ppmv H ₂ S	1	3,70	0,11	3,61	0,10	0,14	4,0	99,51
	2	3,50	0,11					
	3	3,60	0,11					
	4	3,80	0,11					
	5	3,50	0,11					
	6	3,40	0,10					
	7	3,80	0,11					
	8	3,60	0,11					
1000 ppmv H ₂ S	1	6,50	0,20	6,43	0,19	0,10	1,6	99,35
	2	6,40	0,19					
	3	6,30	0,19					
	4	6,60	0,20					
	5	6,50	0,20					
	6	6,50	0,20					
	7	6,30	0,19					
	8	6,40	0,19					

Tablo A.16. 4 (L/dk) azot içerikli H₂S giderimi için dolgulu kolonda karşıt akışlı deney sonuçları

Giriş Konsantrasyonu	Deney No	H ₂ S Çıkış Değeri (ppmv)	Hata Payı (ppmv) (+/-)	Ortalama Değer (ppmv)	Ortalama Hata Payı (ppmv) (+/-)	Standart Sapma	Bağlı Hata (%)	Giderim Verimi (%)
250 ppmv H ₂ S	1	0,96	0,03	0,95	0,03	0,01	4,6	99,63
	2	1,00	0,03					
	3	0,88	0,03					
	4	1,00	0,03					
	5	1,00	0,03					
	6	0,98	0,03					
	7	0,96	0,03					
	8	0,88	0,03					
500 ppmv H ₂ S	1	1,98	0,06	2,04	0,06	0,06	4,5	99,59
	2	2,20	0,07					
	3	2,10	0,06					
	4	1,90	0,06					
	5	2,00	0,06					
	6	2,10	0,06					
	7	2,10	0,06					
	8	2,00	0,06					
750 ppmv H ₂ S	1	4,30	0,13	4,22	0,12	0,14	4,0	99,43
	2	4,00	0,12					
	3	4,40	0,13					
	4	4,40	0,13					
	5	4,20	0,13					
	6	4,00	0,12					
	7	4,20	0,13					
	8	4,30	0,13					
1000 ppmv H ₂ S	1	7,60	0,23	7,67	0,23	0,10	1,6	99,23
	2	7,70	0,23					
	3	7,80	0,23					
	4	7,70	0,23					
	5	7,60	0,23					
	6	7,80	0,23					
	7	7,70	0,23					
	8	7,50	0,23					

Tablo A.17. 5 (L/dk) azot içerikli H₂S giderimi için dolgulu kolonda karşıt akışlı deney sonuçları

Giriş Konsantrasyonu	Deney No	H ₂ S Çıkış Değeri (ppmv)	Hata Payı (ppmv) (+/-)	Ortalama Değer (ppmv)	Ortalama Hata Payı (ppmv) (+/-)	Standart Sapma	Bağlı Hata (%)	Giderim Verimi (%)
250 ppmv H ₂ S	1	1,62	0,05	1,62	0,05	0,07	4,4	99,40
	2	1,70	0,05					
	3	1,58	0,05					
	4	1,70	0,05					
	5	1,60	0,05					
	6	1,60	0,05					
	7	1,50	0,05					
	8	1,70	0,05					
500 ppmv H ₂ S	1	3,70	0,11	3,65	0,11	0,09	2,5	99,30
	2	3,60	0,11					
	3	3,60	0,11					
	4	3,80	0,11					
	5	3,60	0,11					
	6	3,70	0,11					
	7	3,50	0,11					
	8	3,70	0,11					
750 ppmv H ₂ S	1	5,70	0,17	5,75	0,17	0,11	2,0	99,20
	2	5,90	0,18					
	3	5,60	0,17					
	4	5,80	0,17					
	5	5,60	0,17					
	6	5,70	0,17					
	7	5,90	0,18					
	8	5,80	0,17					
1000 ppmv H ₂ S	1	8,40	0,25	8,38	0,25	0,12	1,5	99,20
	2	8,40	0,25					
	3	8,30	0,25					
	4	8,50	0,26					
	5	8,40	0,25					
	6	8,60	0,26					
	7	8,20	0,25					
	8	8,30	0,25					

Tablo A.18. 3 (L/dk) azot içerikli H₂S giderimi için dolgulu kolonda eş-yönlü akışlı deney sonuçları

Giriş Konsantrasyonu	Deney No	H ₂ S Çıkış Değeri (ppmv)	Hata Payı (ppmv) (+/-)	Ortalama Değer (ppmv)	Ortalama Hata Payı (ppmv) (+/-)	Standart Sapma	Bağlı Hata (%)	Giderim Verimi (%)
250 ppmv H ₂ S	1	1,00	0,03	0,99	0,03	0,04	4,7	99,61
	2	1,10	0,03					
	3	0,94	0,03					
	4	1,00	0,03					
	5	0,96	0,03					
	6	0,98	0,03					
	7	1,00	0,03					
	8	1,00	0,03					
500 ppmv H ₂ S	1	2,70	0,08	2,62	0,08	0,10	3,9	99,47
	2	2,50	0,08					
	3	2,60	0,08					
	4	2,80	0,08					
	5	2,70	0,08					
	6	2,60	0,08					
	7	2,60	0,08					
	8	2,50	0,08					
750 ppmv H ₂ S	1	4,60	0,14	4,60	0,14	0,10	2,3	99,38
	2	4,80	0,14					
	3	4,70	0,14					
	4	4,60	0,14					
	5	4,50	0,14					
	6	4,50	0,14					
	7	4,60	0,14					
	8	4,50	0,14					
1000 ppmv H ₂ S	1	7,50	0,23	7,50	0,23	0,10	1,4	99,24
	2	7,60	0,23					
	3	7,30	0,22					
	4	7,50	0,23					
	5	7,40	0,22					
	6	7,60	0,23					
	7	7,60	0,23					
	8	7,50	0,23					

Tablo A.19. 4 (L/dk) azot içerikli H₂S giderimi için dolgulu kolonda eş-yönlü akışlı deney sonuçları

Giriş Konsantrasyonu	Deney No	H ₂ S Çıkış Değeri (ppmv)	Hata Payı (ppmv) (+/-)	Ortalama Değer (ppmv)	Ortalama Hata Payı (ppmv) (+/-)	Standart Sapma	Bağlı Hata (%)	Giderim Verimi (%)
250 ppmv H ₂ S	1	1,80	0,05	1,78	0,05	0,08	4,7	99,30
	2	1,90	0,06					
	3	1,90	0,06					
	4	1,80	0,05					
	5	1,78	0,05					
	6	1,68	0,05					
	7	1,66	0,05					
	8	1,78	0,05					
500 ppmv H ₂ S	1	3,80	0,11	3,82	0,11	0,07	1,9	99,23
	2	3,90	0,12					
	3	3,80	0,11					
	4	3,70	0,11					
	5	3,80	0,11					
	6	3,90	0,12					
	7	3,80	0,11					
	8	3,90	0,12					
750 ppmv H ₂ S	1	5,50	0,17	5,61	0,17	0,11	2,0	99,25
	2	5,60	0,17					
	3	5,70	0,17					
	4	5,50	0,17					
	5	5,80	0,17					
	6	5,60	0,17					
	7	5,70	0,17					
	8	5,50	0,17					
1000 ppmv H ₂ S	1	8,40	0,25	8,46	0,25	0,11	1,4	99,15
	2	8,50	0,26					
	3	8,70	0,26					
	4	8,50	0,26					
	5	8,50	0,26					
	6	8,40	0,25					
	7	8,40	0,25					
	8	8,30	0,25					

Tablo A.20. 5 (L/dk) azot içerikli H₂S giderimi için dolgulu kolonda eş-yönlü akışlı deney sonuçları

Giriş Konsantrasyonu	Deney No	H ₂ S Çıkış Değeri (ppmv)	Hata Payı (ppmv) (+/-)	Ortalama Değer (ppmv)	Ortalama Hata Payı (ppmv) (+/-)	Standart Sapma	Bağlı Hata (%)	Giderim Verimi (%)
250 ppmv H ₂ S	1	2,20	0,07	2,23	0,06	0,07	3,3	99,10
	2	2,30	0,07					
	3	2,30	0,07					
	4	2,20	0,07					
	5	2,30	0,07					
	6	2,20	0,07					
	7	2,10	0,06					
	8	2,30	0,07					
500 ppmv H ₂ S	1	5,20	0,16	5,26	0,16	0,07	1,4	99,05
	2	5,30	0,16					
	3	5,40	0,16					
	4	5,30	0,16					
	5	5,20	0,16					
	6	5,20	0,16					
	7	5,30	0,16					
	8	5,20	0,16					
750 ppmv H ₂ S	1	6,90	0,21	6,85	0,20	0,09	1,3	99,05
	2	7,00	0,21					
	3	6,80	0,20					
	4	6,80	0,20					
	5	6,90	0,21					
	6	6,80	0,20					
	7	6,90	0,21					
	8	6,70	0,20					
1000 ppmv H ₂ S	1	9,70	0,29	9,61	0,28	0,11	1,2	98,80
	2	9,50	0,29					
	3	9,50	0,29					
	4	9,60	0,29					
	5	9,70	0,29					
	6	9,80	0,29					
	7	9,50	0,29					
	8	9,60	0,29					

Tablo A.21. 3 (L/dk) azot içerikli NH₃ giderimi için dolgulu kolonda karşıt akışlı deney sonuçları

Giriş Konsantrasyonu	Deney No	NH ₃ Çıkış Değeri (ppmv)	Hata Payı (ppmv) (+/-)	Ortalama Değer (ppmv)	Ortalama Hata Payı (ppmv) (+/-)	Standart Sapma	Bağlı Hata (%)	Giderim Verimi (%)
125 ppmv NH ₃	1	1,94	0,04	1,95	0,04	0,09	4,8	98,35
	2	2,10	0,04					
	3	1,86	0,04					
	4	1,88	0,04					
	5	2,0	0,04					
250 ppmv NH ₃	1	5,58	0,11	5,98	0,11	0,24	4,1	97,62
	2	6,20	0,12					
	3	5,76	0,12					
	4	5,92	0,12					
	5	6,30	0,13					
	6	5,88	0,12					
	7	6,20	0,12					
	8	6,0	0,12					
375 ppmv NH ₃	1	9,68	0,19	10,09	0,20	0,46	4,5	97,33
	2	10,40	0,21					
	3	9,56	0,19					
	4	9,76	0,20					
	5	10,8	0,22					
	6	10,6	0,21					
	7	9,78	0,20					
	8	10,2	0,20					
500 ppmv NH ₃	1	15,40	0,31	14,83	0,30	0,53	3,6	97,03
	2	13,90	0,28					
	3	14,80	0,30					
	4	14,80	0,30					
	5	15,70	0,31					
	6	14,70	0,29					
	7	14,60	0,29					
	8	14,80	0,30					

Tablo A.22. 4 (L/dk) azot içerikli NH₃ giderimi için dolgulu kolonda karşıt akışlı deney sonuçları

Giriş Konsantrasyonu	Deney No	NH ₃ Çıkış Değeri (ppmv)	Hata Payı (ppmv) (+/-)	Ortalama Değer (ppmv)	Ortalama Hata Payı (ppmv) (+/-)	Standart Sapma	Bağlı Hata (%)	Giderim Verimi (%)
125 ppmv NH ₃	1	3,86	0,08	4,04	0,08	0,16	4,0	96,70
	2	4,30	0,09					
	3	4,0	0,08					
	4	4,10	0,08					
	5	3,98	0,08					
250 ppmv NH ₃	1	9,20	0,18	8,81	0,17	0,33	3,8	96,47
	2	8,90	0,18					
	3	8,68	0,17					
	4	9,0	0,18					
	5	9,30	0,19					
	6	8,50	0,17					
	7	8,56	0,17					
	8	8,38	0,17					
375 ppmv NH ₃	1	15,52	0,31	14,90	0,30	0,42	2,8	96,02
	2	14,9	0,30					
	3	15,10	0,30					
	4	14,74	0,29					
	5	14,20	0,28					
	6	15,0	0,30					
	7	15,30	0,31					
	8	14,50	0,29					
500 ppmv NH ₃	1	21,10	0,42	20,36	0,40	0,73	3,5	95,93
	2	19,82	0,40					
	3	20,60	0,41					
	4	20,30	0,41					
	5	21,0	0,42					
	6	21,20	0,42					
	7	19,50	0,39					
	8	19,38	0,39					

Tablo A.23. 5 (L/dk) azot içerikli NH₃ giderimi için dolgulu kolonda karşıt akışlı deney sonuçları

Giriş Konsantrasyonu	Deney No	NH ₃ Çıkış Değeri (ppmv)	Hata Payı (ppmv) (+/-)	Ortalama Değer (ppmv)	Ortalama Hata Payı (ppmv) (+/-)	Standart Sapma	Bağlı Hata (%)	Giderim Verimi (%)
125 ppmv NH ₃	1	7,20	0,14	7,0	0,14	0,28	4,1	94,49
	2	7,10	0,14					
	3	7,30	0,15					
	4	6,86	0,14					
	5	6,58	0,13					
250 ppmv NH ₃	1	16,50	0,33	15,93	0,31	0,42	2,6	93,62
	2	15,82	0,32					
	3	16,10	0,32					
	4	15,92	0,32					
	5	15,20	0,30					
	6	16,40	0,33					
	7	15,68	0,31					
	8	16,0	0,32					
375 ppmv NH ₃	1	26,28	0,53	25,75	0,51	0,40	1,6	93,12
	2	25,80	0,52					
	3	26,30	0,53					
	4	25,56	0,51					
	5	25,0	0,50					
	6	26,10	0,52					
	7	25,72	0,51					
	8	25,10	0,50					
500 ppmv NH ₃	1	35,20	0,70	34,55	0,69	0,47	1,4	93,09
	2	34,36	0,69					
	3	34,60	0,69					
	4	35,30	0,71					
	5	34,0	0,68					
	6	34,52	0,69					
	7	34,48	0,69					
	8	34,10	0,68					

Tablo A.24. 3 (L/dk) azot içerikli NH₃ giderimi için dolgulu kolonda eş-yönlü akışlı deney sonuçları

Giriş Konsantrasyonu	Deney No	NH ₃ Çıkış Değeri (ppmv)	Hata Payı (ppmv) (+/-)	Ortalama Değer (ppmv)	Ortalama Hata Payı (ppmv) (+/-)	Standart Sapma	Bağlı Hata (%)	Giderim Verimi (%)
125 ppmv NH ₃	1	3,78	0,08	4,02	0,08	0,18	4,5	96,84
	2	4,20	0,08					
	3	4,10	0,08					
	4	4,0	0,08					
	5	4,30	0,09					
	6	3,86	0,08					
	7	3,96	0,08					
250 ppmv NH ₃	1	9,40	0,19	8,66	0,17	0,48	5,6	96,49
	2	8,90	0,18					
	3	8,38	0,17					
	4	8,18	0,16					
	5	8,46	0,17					
375 ppmv NH ₃	1	15,20	0,30	15,10	0,30	0,32	2,2	95,97
	2	15,55	0,31					
	3	14,96	0,30					
	4	15,10	0,30					
	5	15,6	0,31					
	6	15,0	0,30					
	7	14,78	0,30					
	8	14,80	0,30					
500 ppmv NH ₃	1	21,50	0,43	20,85	0,41	0,33	1,6	95,83
	2	20,80	0,42					
	3	21,12	0,42					
	4	20,56	0,41					
	5	21,0	0,42					
	6	20,70	0,41					
	7	20,62	0,41					
	8	20,60	0,41					

Tablo A.25. 4 (L/dk) azot içerikli NH₃ giderimi için dolgulu kolonda eş-yönlü akışlı deney sonuçları

Giriş Konsantrasyonu	Deney No	NH ₃ Çıkış Değeri (ppmv)	Hata Payı (ppmv) (+/-)	Ortalama Değer (ppmv)	Ortalama Hata Payı (ppmv) (+/-)	Standart Sapma	Bağlı Hata (%)	Giderim Verimi (%)
125 ppmv NH ₃	1	6,50	0,13	6,17	0,12	0,22	3,7	95,02
	2	6,40	0,13					
	3	5,92	0,12					
	4	6,30	0,13					
	5	6,0	0,12					
	6	6,10	0,12					
	7	6,0	0,12					
250 ppmv NH ₃	1	12,90	0,26	12,86	0,25	0,23	1,8	94,83
	2	13,12	0,26					
	3	12,56	0,25					
	4	12,80	0,26					
	5	13,0	0,26					
375 ppmv NH ₃	1	23,80	0,48	23,78	0,47	0,37	1,6	93,65
	2	23,12	0,46					
	3	24,46	0,49					
	4	23,62	0,47					
	5	24,16	0,48					
	6	23,86	0,48					
	7	23,70	0,47					
	8	23,80	0,48					
500 ppmv NH ₃	1	31,60	0,63	32,0	0,64	0,34	1,1	93,60
	2	32,26	0,65					
	3	31,78	0,64					
	4	32,50	0,65					
	5	32,40	0,65					
	6	31,72	0,63					
	7	32,10	0,64					
	8	31,84	0,64					

Tablo A.26. 5 (L/dk) azot içerikli NH₃ giderimi için dolgulu kolonda eş-yönlü akışlı deney sonuçları

Giriş Konsantrasyonu	Deney No	NH ₃ Çıkış Değeri (ppmv)	Hata Payı (ppmv) (+/-)	Ortalama Değer (ppmv)	Ortalama Hata Payı (ppmv) (+/-)	Standart Sapma	Bağlı Hata (%)	Giderim Verimi (%)
125 ppmv NH ₃	1	9,10	0,18	8,64	0,17	0,40	4,6	93,15
	2	8,70	0,17					
	3	9,20	0,18					
	4	8,62	0,17					
	5	8,38	0,17					
	6	8,50	0,17					
	7	8,12	0,16					
250 ppmv NH ₃	1	18,16	0,36	17,94	0,35	0,15	1,0	92,76
	2	17,98	0,36					
	3	18,0	0,36					
	4	17,80	0,36					
	5	17,80	0,36					
375 ppmv NH ₃	1	28,80	0,58	29,0	0,58	0,26	1,1	92,27
	2	29,28	0,59					
	3	28,70	0,57					
	4	29,16	0,58					
	5	29,0	0,58					
	6	29,38	0,59					
	7	28,90	0,58					
	8	28,70	0,57					
500 ppmv NH ₃	1	41,60	0,83	41,05	0,82	0,35	0,9	91,79
	2	40,80	0,82					
	3	41,18	0,82					
	4	41,36	0,83					
	5	40,60	0,81					
	6	41,28	0,83					
	7	40,80	0,82					
	8	40,80	0,82					

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] Ay Ş., Atakül H., Çetin-Durak Y., Sarıoğlan A., Üresin E., Er O., Akgün F., Hot gas clean-up with Turkish dolomites, *10th ISCARW Hydrogen Regulations, Codes and Standards*, Ullster University/Belfast, North Ireland, 24-28 January 2011.
- [2] Aydar E., Üresin E., Livatyalı H., Günal A., Güneş enerjisi sistemleri arasında CSP'nin yeri, *Enerji Teknolojileri ve Mekanik Tesisat Dergisi*, 2011, **181**, 80-88.
- [3] Çetin-Durak Y., Sarıoğlan A., Üresin E., Er O., Köylü-Tokgöz S., Ay Ş., Atakül H., Akgün F., Liquid fuel production from biomass and coal blends: Hot gas clean-up with Turkish dolomites and commercial monolithic catalyst, *ICPS 10 International Conference on Polygeneration Strategies with special focus on integrated biorefineries*, Leipzig, Germany, 7-9 September 2010.
- [4] Aydar E., Üresin E., Livatyalı H., Günal A., Yoğunlaştırmalı güneş enerjisinden elektrik üretimi, *TTMD Türk Tesisat Mühendisleri Derneği*, 2010, **68**, 35-40.
- [5] Aydar E., Üresin E., Livatyalı H., Günal A., Yoğunlaştırmalı güneş enerjisi teknolojileri, *Solar Future Conference 2010*, İstanbul, 11-12 Şubat 2010.
- [6] Güngör C., Kaya D., Üresin E., Termik santrallerin atık ısılarının değerlendirilmesi, *Mühendis ve Makina*, 2007, **575**, 19-26.
- [7] Arslan Ş., Üresin E., Mekatronik tabanlı bir hidrofor sistemi analizi, *SAU Fen Bilimleri Dergisi*, 2006, **10(2)**, 73-80.

ÖZGEÇMİŞ

1978 yılında Kocaeli'nin Gebze ilçesinde doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Gebze'de tamamladı. 1997 yılında girdiği Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2001 yılında Makine Mühendisi olarak mezun oldu. 2001-2005 yılları arasında, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 2006 yılından beri TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Enerji Enstitüsü'nde uzman araştırmacı olarak çalışmaktadır.