

AZOT OKSİT GAZLARININ  
DOLGULU KOLONDA ABSORPSİYONUNUN  
BİLGİSAYAR DESTEKLİ TASARIMI

35251

Kimya Müh. Alime ÇITAK

Osmangazi Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca  
Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı  
Proses ve Reaktör Tasarımı Bilim Dalında  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
olarak hazırlanmıştır.

Danışman  
Yrd. Doç. Dr. Süleyman KAYTAKOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
DOKÜMANI  
ÜRETİM KURUMU  
SİZİN MERKEZİ

Eylül-1994  
Eskisehir

**AZOT OKSİT GAZLARININ  
DOLGULU KOLONDA ABSORPSİYONUNUN  
BİLGİSAYAR DESTEKLİ TASARIMI**

Kimya Müh. Alime ÇITAK  
Yüksek Lisans  
Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı  
1994-Eskişehir

ALİME ÇITAK'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "AZOT OKSİT GAZLARININ DOLGULU KOLONDA ABSORPSİYONUNUN BİLGİSAYAR DESTEKLİ TASARIMI" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Üye: Y. Doc. Dr. Süleyman Kaytakoğlu *Suytakoglu*

Üye: Prof. Dr. M. Erçengiz Yıldırım

*E. Yıldırım*

Üye: Doc. Dr. Ü. BAKUR ÖZÜNBİRAN

*U. Özünbirán*

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..15-9-1994.....gün  
ve ..94-19/19.....sayılı kararıyla onaylanmıştır.

*R. Kaya*

Prof. Dr. Rüstem KAYA

Enstitü Müdürü

## ÖNSÖZ

Hava kirlenmesine neden olan gazlar arasında önemli bir yer tutan azot oksit gazlarıyla ilgili bir dolgulu kolon tasarımı içeren bu teorik çalışma, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Proses ve Reaktör Tasarımı Bilim Dalında, Yrd. Doç. Dr. Süleyman Kaytakoğlu'nun danışmanlığında yürütülmüştür.

1993-1994 tarihleri arasında yürütülen bu çalışmada, değerli vakitlerini ayırıp, hiçbir zaman yakın ilgi ve yardımlarını esirgemeyen, çalışmalarımı yönlendiren danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Süleyman Kaytakoğlu'na içtenlikle teşekkür ederim.

Ayrıca yardımlarını esirgemeyen değerli hocalarıma, Çevre Mühendisliği Bölümü'nde Arş. Gör. Müfide Banar'a, Arş. Gör. A. Savaş Koparal'a ve Araş. Gör. S. Eren Öcal'a teşekkür ederim.

Bugüne kadar devam eden tahsil hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme de minnet borçluyum.

## ÖZET

Katı, sıvı veya gaz yakıtların yanması sonucu açığa çıkan azot oksit gazları hava kirliliğinde büyük önem taşımaktadır. Atmosferde çok düşük derişimlerde bulunması istenen bu gazların işlem yerinde kontrolü veya sonradan giderilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada öncelikle, azot oksit gazlarının ( $\text{NO}_x$ ) fiziksel ve kimyasal özellikleri; oluşum şekilleri, kaynak ve etkileri; özellikle dolgulu kolonlarda absorpsiyonu ile ilgili literatür derlemesi yapılmıştır.

Sonra,  $\text{NO}_x$  giderme yöntemleri arasında yer alan dolgulu kolonlarda gaz absorpsiyonu ve bilgisayarla dolgulu kolon tasarımı üzerinde durulmuştur. Tasarımda kolon boyunca sıcaklık değişimi sabit alınarak; kolona ait çap, yükseklik, dolgu maddesi özellikleri ve ekonomik veriler belirlenmiştir.

Tasarım için çözünen, çözücü ve inert gaza ait fiziksel ve kimyasal özellikler, sıcaklık, basınç, gaz ve sıvı akış hızı ve işletme verileri Kütahya Gübre Fabrikası'nda dolgulu kolonda nitrik asit üretiminin gerçekleştirildiği tesis yetkililerinden temin edilerek kullanılmış ve böylece atmosfere 2500 ppm  $\text{NO}_x$  yayarak Kütahya ve çevresinin hava kalitesini olumsuz şekilde etkileyen bu absorpsiyon kolonunun uygunluğu araştırılmıştır.

### **Anahtar Kelimeler**

Azot oksit gazları

Gaz absorpsiyonu

Dolgulu kolon

Tasarım

## SUMMARY

NO<sub>x</sub> gases resulting from the combustion of solid, liquid or gaseous fuels have special importance in the air pollution. These gases were desired to be existed very low concentrations in the atmosphere that should be controlled within the combustion chamber or eliminated at later stage.

In this study, firstly, by the physical and chemical properties of nitrogen oxide gases, formation forms, sources and effects and particularly literature review on their absorption in the packed bed columns were made.

Then, the gas absorption in the packed bed columns taken place among the NO<sub>x</sub> removal methods and computer aided design of packed bed columns were discussed. In the design, taking the temperature variation through the column constant; diameter and height of column, specifications of packed materials and economical data were determined.

For the design, the physical and chemical properties of solvent, solute and inert gas; temperature, pressure, flow velocity of liquid and gas, operating data that are taken from responsible person of the Kütahya fertilizer plant in which HNO<sub>3</sub> is produced using packed bed column have been used and the convenience of this absorption column emitting 2500 ppm NO<sub>x</sub> into atmosphere, that badly affect Kütahya and its surroundings atmosphere, has been investigated.

### **Keywords**

Nitrogen oxide gases  
Gas absorption  
Packed column  
Design

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ .....	IV
ÖZET .....	V
SUMMARY .....	VI
İÇİNDEKİLER .....	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	X
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	XI
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	XII
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Amaç .....	3
2. GENEL VE TEORİK BİLGİLER .....	4
2.1. Azot Oksit Gazları .....	4
2.1.1. Azot oksit gazlarının fiziksel ve kimyasal özellikleri .....	4
2.1.2. NO <sub>x</sub> gazlarının oluşumu ve kaynakları .....	8
2.1.3. NO <sub>x</sub> gazlarının atmosferdeki tepkimeleri .....	13
2.1.4. Azot oksit gazlarının insan ve çevre sağlığına etkileri .....	15
2.2. Azot Oksit Gazlarının Oluşumunun Kontrolü ve Giderilme Teknolojileri ...	15
2.2.1. Azot oksit gazlarının oluşumunun kontrolü .....	17
2.2.2. Azot oksit gazlarının giderilme teknolojileri .....	19
2.2.2.1. <u>Kuru yöntemler</u> .....	19
2.2.2.2. <u>Islak yöntemler</u> .....	26

## İÇİNDEKİLER (Devam)

	<u>Sayfa</u>
3. GAZ ABSORPSİYONU .....	31
3.1. Genel Tanım .....	31
3.1.1. İdeal çözeltiler .....	31
3.1.2. İdeal olmayan sıvı çözeltiler .....	32
3.1.3. Absorpsiyon sistemlerinde termodinamik denge ilişkileri .....	32
3.1.4. Gaz çözünürlüğü .....	33
3.1.5. Çözücü seçimi .....	34
3.2. Absorpsiyonda Kullanılan Cihazlar ve Özellikleri .....	35
3.2.1. Kademeli gaz absorpsiyonu kolonları .....	35
3.2.2. Dolgulu gaz absorpsiyonu kolonları ve dolgu malzemeleri .....	37
3.2.2.1. <u>Dolgulu kolonların dizaynı</u> .....	37
3.2.2.2. <u>Sıvı ve gaz arasındaki temas</u> .....	40
3.2.2.3. <u>Sınırlanan akış hızları; yükleme ve taşma</u> .....	40
3.2.2.4. <u>Dolgulu kolonlarda basınç düşmesi</u> .....	43
4. GAZ ABSORPLAYICI DOLGULU KOLON TASARIMI .....	46
4.1. Gaz Absorpsiyon Kolonlarında Temel Tasarım Bağlıları .....	46
4.1.1. Dizayn eşitliği .....	47
4.1.2. Eşmolar zıt yayınma .....	50
4.1.3. Sabit bir bileşen içinde yayınma .....	52
4.1.4. Transfer ünitesinin değerlendirilmesi .....	56
4.1.5. Transfer ünitesi sayısının hesaplanması .....	58
4.1.6. Transfer ünitesi yüksekliğinin hesaplanması .....	65
4.1.6.1. Sıvı fazı ( $H_L$ ) .....	66
4.1.6.2. Gaz fazı ( $H_G$ ) .....	67



**İÇİNDEKİLER (Devam)**

	<u>Sayfa</u>
4.1.7. Maliyet hesapları .....	68
4.2. NO <sub>x</sub> Gazlarının Dolgulu Kolonda Absorpsiyonu İle İlgili Literatür Taraması .....	70
4.3. NO <sub>x</sub> Absorplayıcı Dolgulu Kolon Tasarımı.....	78
5. TEORİK BULGULAR .....	90
6. SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER .....	92
KAYNAKLAR DİZİNİ .....	93
EK AÇIKLAMALAR- A .....	97
EK AÇIKLAMALAR- B.....	100

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Hava kirleticilerin oluşumu ve etkileri .....	2
2.1. Eşitlik 2.3 için denge sabitinin sıcaklıkla değişimi .....	5
2.2. NO <sub>x</sub> 'in atmosferdeki muhtemel kimyasal dönüşümleri .....	14
2.3. NO <sub>x</sub> emisyonunu düşürücü mevcut teknikler .....	16
2.4. Yakma düzenlerinde modifikasyonla NO <sub>x</sub> emisyon kontrolü .....	18
2.5. Petrol ve gaz yakıcılarında, hava/yakıt oranı ile NO <sub>x</sub> ilişkisi .....	18
2.6. Çok kademeli yanmanın oluştuğu, düşük-NO <sub>x</sub> yakıcıları .....	19
2.7. NO <sub>x</sub> 'in, Pt, V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , TiO <sub>2</sub> esaslı katalizörler ve NH <sub>3</sub> ile seçimli katalitik indirgenmesi .....	21
2.8. Buhar üreten tesislerde NO <sub>x</sub> giderimi .....	22
2.9. Elektronla ışıma ve ürün oluşumu .....	25
2.10. Atık gazlardan NO <sub>x</sub> giderimi için mümkün olan alternatifler .....	29
3.1. Kampana raflı ve delikli raflı kolonların şematik görünüşü.....	36
3.2. Dolgulu kolon bileşenleri .....	38
3.3. Bazı dolgu maddesi türleri .....	39
3.4. Dolgulu kolonlarda basınç düşüşü karakteristikleri .....	44
3.5. Dolgulu kolonlarda taşma hızı .....	45
4.1. Dolgulu kolon için kütle denkliği.....	47
4.2. Transfer ünitesi ve denge kademesinin karşılaştırılması .....	57
4.3. Absorpsiyon için xy diyagramı .....	58
4.4. N <sub>G</sub> veya N <sub>OG</sub> için grafiksel integrasyon .....	60
4.5. N <sub>OG</sub> 'nin grafiksel değerlendirmesi .....	62
4.6. Kütahya Gübre Fabrikası A. Ş.'de kullanılan dolgulu absorpsiyon kolonunun şematik gösterimi .....	83
4.7. Dolgu çapına (Raschig halkası için) karşı doldurma faktörü (C <sub>f</sub> ) değişimi .....	84
4.8. Dolgu çapına (Raschig halkası için) karşı yüzey alanı (a <sub>v</sub> ) değişimi .....	84
4.9. Absorpsiyon kolonunun diferansiyel hacmi .....	89

**ÇİZELGELER DİZİNİ**

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Bileşiminde % 3.3 O <sub>2</sub> , % 76 N <sub>2</sub> bulunan bir baca gazında NO ve NO <sub>2</sub> bileşenlerinin denge derişimlerinin sıcaklıkla değişimi .....	10
2.2. Azot monoksitin elementlerinden oluşumu yönündeki tepkime için denge sabitinin sıcaklıkla değişimi .....	11
2.3. Değişik sıcaklıklarda % 75 N <sub>2</sub> ve % 3 O <sub>2</sub> içeren gaz karışımında NO derişiminin 500 ppm derişimine erişmesi için geçen süre ve NO denge derişimleri .....	11
2.4. NO <sub>2</sub> oluşumu için denge sabitinin sıcaklıkla değişimi .....	12
3.1. Dolgu maddelerinin fiziksel karakteristikleri .....	41
3.2. Kolon dolguları için sabitler .....	45
4.1. Transfer ünitesi sayısı (N) ve transfer ünitesi yüksekliği (H) .....	54
4.2. Eşitlik 4.52 için sabit değerler .....	66
4.3. Eşitlik 4.53 için amonyak-hava-su absorpsiyon veri sabitleri .....	67
4.4. Model parametreleri .....	79
4.5. Dolgulu absorpsiyon kolonu için model parametreleri .....	82

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklamalar</u>
a	dolgunun birim hacmi başına gaz-sıvı ara yüzey alanı, $\text{ft}^2/\text{ft}^3$
a	sabit (Denklem 4.22)
$a_p$	özgül dolgu yüzeyi, alan/hacim, $\text{ft}^2/\text{ft}^3$
$a_v$	saf sıvı ile bir gazın teması için yüzey alanı, $\text{m}^2/\text{m}^3$
A	kolon karşı kesit alanı, $\text{m}^2$
AREA	kolon alanı, $\text{ft}^2$
b	sabit (Denklem 4.22)
BC	gaz için pompalama maliyeti, \$
CC	sıkıştırma maliyeti, \$
$C_D$	deneysel sabit (Çizelge 3.1.)
$C_f$	doldurma faktörü, iki fazlı akış için, deneysel sabit (Çizelge 3.1.)
$C_i$	i bileşenin konsantrasyonu, $\text{kmol}/\text{m}^3$
$C_p$	ısı kapasitesi, $\text{Btu}/\text{lb}^\circ\text{F}$
dA	ara yüzey transfer alanı, $\text{ft}^2$
dh	diferansiyel kolon yüksekliği, m
$d_p$	kolon dolgu maddesinin çapı, ft
dz	diferansiyel kolon yüksekliği, ft
D	çözünen gazın sıvı fazı içerisindeki yayınlılık katsayısı, $\text{ft}^2/\text{hr}$
D	dolgulu kolon çapı, ft
DC	zengin sıvıdan çözüneni geri kazanma maliyeti, \$
DIAM	kolon çapı, ft
EDTA	etilen diammin tetraasetat
$e_{\text{NO}_2}$	etkin $\text{NO}_2$
$E_i$	anlık artma faktörü (boyutsuz)
$g_c$	dönüşüm faktörü, $\text{lb}\cdot\text{ft}/\text{lb}_f\cdot\text{hr}^2$
G	gaz akış hızı, $\text{m}^3/\text{s}$
$G_L$	sıvı kütle hızı, $\text{lb}/\text{hr}\cdot\text{ft}^2$
$G^1$	yüzeysel gaz kütle hızı, $\text{lb}/\text{ft}^2 \text{ hr}$
h	sabit (Çizelge 4.3.)

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (Devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklamalar</u>
H	Henry sabiti, atm/mol kesri
H	transfer birimi yüksekliği, ft
Ha	Hatta sayısı (boyutsuz)
He, $\bar{H}$	Henry kanunu sabiti, kmol/m <sup>3</sup> atm
H <sub>G</sub>	gaz fazı kütle transfer birimi yüksekliği, ft
HKKY	hava kalitesini koruma yönetmeliği
H <sub>L</sub>	sıvı fazı kütle transfer birimi yüksekliği, ft
H <sub>OG</sub>	gaz fazı kütle transfer birimi toplam yüksekliği, ft
H <sub>OL</sub>	sıvı fazı kütle transfer birimi toplam yüksekliği, ft
HP	beygir gücü, horse power
HT	kolon yüksekliği, ft
J	dönüşüm faktörü (Çizelge 3.1.)
k	ileri reaksiyon hız sabiti, m <sup>3</sup> kmol/s
k <sub>c</sub> , k <sub>c</sub> <sup>1</sup>	itici kuvvet konsantrasyonuna bağlı sıvı fazı kütle transfer katsayısı, lbmole/hr*ft <sup>2</sup> *(lbmole/ft <sup>3</sup> )
k <sub>g</sub>	gaz tarafı kütle transfer katsayısı, m/s
k <sub>G</sub>	kısmi basınç itici kuvvetine bağlı gaz fazı kütle transfer katsayısı, lbmole/hr*ft <sup>2</sup> *atm
k <sub>l</sub>	sıvı tarafı kütle transfer katsayısı, m/s
k <sub>y</sub> , k <sub>y</sub> <sup>1</sup>	mol kesri olarak itici kuvvete bağlı gaz fazı kütle transfer katsayısı, lbmole/hr*ft <sup>2</sup> *(mol kesri)
k <sub>x</sub> , k <sub>x</sub> <sup>1</sup>	mol kesri olarak itici kuvvete bağlı sıvı fazı kütle transfer katsayısı, lbmole/hr*ft <sup>2</sup> *(mol kesri)
K	reaksiyon için denge sabiti, atm <sup>-1</sup>
K <sub>c</sub> , K <sub>c</sub> <sup>1</sup>	itici kuvvet konsantrasyonuna bağlı toplam kütle transfer katsayısı, lbmole/hr*ft <sup>2</sup> *(lbmole/ft <sup>3</sup> )
K <sub>x</sub> , K <sub>x</sub> <sup>1</sup>	sıvı fazı kütle kesri olarak itici kuvvete bağlı toplam kütle transfer katsayısı, lbmole/hr*ft <sup>2</sup> *(kütle kesri)

## SİMGELELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (Devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklamalar</u>
$K_y, K_y'$	gaz fazı kütle kesri olarak itici kuvvete bağlı toplam kütle transfer katsayısı, lbmole/hr*ft <sup>2</sup> *(kütle kesri)
L	sıvı fazı molar akış hızı, lbmoles/hr.
L'	yüzeysel sıvı kütle hızı, lb/ft <sup>2</sup> hr
m	denge eğrisinin eğimi (boyutsuz)
m	Henry kanunu sabiti (boyutsuz), $\bar{H}RT = 24.44*\bar{H}$ , 298 K'de
m	kolon dolgu sabiti (Çizelge 3.2.)
n	kolon dolgu sabiti (Çizelge 3.2.)
n	reaksiyon mertebesi
n	sabit (Çizelge 16.4)
N	kütle transfer birimi sayısı (boyutsuz)
N <sub>G</sub>	gaz fazı kütle transfer birimi sayısı (boyutsuz)
N <sub>L</sub>	sıvı fazı kütle transfer birimi sayısı (boyutsuz)
NO <sub>2</sub> *	NO <sub>2</sub> = (NO <sub>2</sub> +2N <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )
N <sub>OG</sub>	gaz fazı kütle transfer birimi toplam sayısı (boyutsuz)
N <sub>OL</sub>	sıvı fazı kütle transfer birimi toplam sayısı (boyutsuz)
NO <sub>X</sub>	NO <sub>2</sub> *+NO
N <sub>Re</sub>	Reynolds sayısı (boyutsuz)
N <sub>sc</sub>	sıvı için Schmidt sayısı (boyutsuz)
NSCR	seçimli olmayan katalitik indirgeme
P	çözünen gazın kısmi basıncı
p	sabit (Çizelge 4.3.)
P <sub>0</sub>	çözünen gazın buhar basıncı, atm
P <sub>A</sub>	gaz yığı içerisindeki A bileşeninin kısmi basıncı, atm.
P <sub>Ai</sub>	gaz sıvı ara yüzeyindeki A bileşeninin kısmi basıncı, atm.
PCOST	küçük ft başına doldurma maliyeti, \$/ft <sup>3</sup>
P <sub>i</sub>	i gaz bileşeninin kısmi basıncı, atm
r	sabit (Çizelge 4.3.)

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (Devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklamalar</u>
RC	soğutma maliyeti, \$
$R_i$	i bileşenin birim yüzeydeki absorpsiyon hızı, $\text{kmol/m}^2\text{s}$
S	boş kolon karşı kesit alanı, $\text{ft}^2$
SCR	seçimli katalitik indirgeme
T	sıcaklık, °F veya °R
TC	kolon amortismanı, \$
TCOST	toplam maliyet, \$
V	gaz fazı molar akış hızı, $\text{lbmole/hr}$ .
$V^l$	içinde çözüneni olmayan gazın molar akış hızı, $\text{lbmole/hr}$
x	çözünen gazın çözeltideki mol kesri
x	sıvı fazındaki uçucu bileşenin konsantrasyonu, mol kesri
$x^*$	denge konsantrasyondaki sıvı fazı mol kesri
$x_i$	ara yüzeydeki sıvı fazı mol kesri
y	gaz fazındaki uçucu bileşenin konsantrasyonu, mol kesri
$y^*$	denge konsantrasyondaki gaz fazı mol kesri
$y_i$	ara yüzeydeki gaz fazı mol kesri
Y	gaz fazı mol oranı (boyutsuz)
$Y^*$	denge konsantrasyondaki gaz fazı mol oranı (boyutsuz)
$Y_i$	ara yüzeydeki gaz fazı mol oranı (boyutsuz)
z	dolgulu kolon yüksekliği, ft

**Yunan Sembolleri**

$\beta$	sabit (Çizelge 16.4)
$\mu_L$	sıvı vizkozitesi, lb/ft.hr
$\varepsilon$	kuru doldurma yatağındaki boşluk hacim kesri, boşluk hacmi/boşluk yatağı (boyutsuz)
$\rho$	yoğunluk, lb/ft <sup>3</sup>
$\rho_G$	gaz yoğunluğu, lb/ft <sup>3</sup>
$\mu_s$	sıvı vizkozitesi, c <sub>p</sub>
$q$	toplam ısı enerjisi transfer hızı, Btu/hr





## 1. GİRİŞ

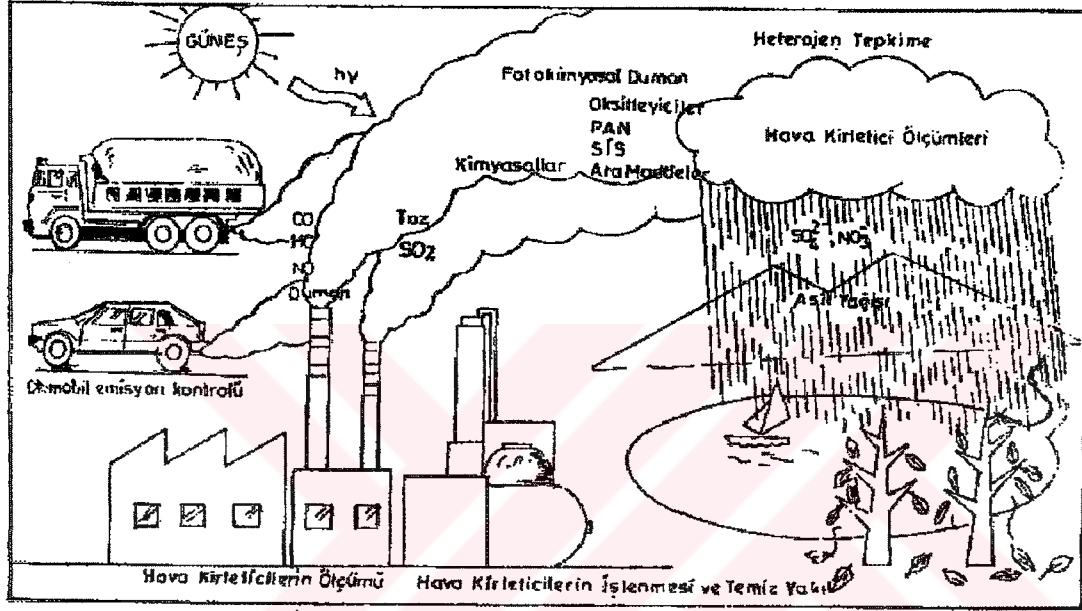
Hava kirliliğine neden olan gaz şeklindeki zararlı maddeler arasında  $SO_x$ ,  $NO_x$ ,  $CO_x$ , hidrokarbonlar, organik ve inorganik bileşikler ve asit buharları ile halojenli bileşikler sayılabilir ve bunlar milyonlarca ton/yıl hızda atmosfere atılmaktadır. Birincil kirlenmeyi oluşturan bu gazlar, atmosferde bulunan ve oksitleyici özellik gösteren ozon ile fotokimyasal tepkimelere girerek yükseltgenmektedir. Böylece oluşan aramaddeler, atmosferdeki su buharı ile tepkiyerek, sülfürik asit ( $H_2SO_4$ ), nitrik asit ( $HNO_3$ ), karbonik asit ( $H_2CO_3$ ) gibi ürünleri ve asit yağmurlarını oluşturmaktadır. Oluşan asit yağmurları ve çeşitli zararlı maddeler nedeniyle nehir, göl ve deniz suları kirlenmekte, yeraltı suları safsızlaşmakta; atmosferdeki ozon deliği büyümekte; toplu olarak insan ve hayvanlar ölmekte ve ormanlar tahrip olmaktadır (Şekil 1.1.). Bu nedenle, havayı kirleten atık gazların, minimum derişimlerde tutulmasının sağlanması veya bu derişimlere düşürülmesi, özellikle canlı yaşamının sürekliliği açısından önem taşımaktadır.

Yanma kaynaklı atık gazların temizlenmesi işlemlerinde en önemli problemlerden birisi  $NO_x$ 'in ayrılmasıdır. Kuvvet santrallerinden ve özellikle nitrik asit fabrikalarından kaynaklanan atık gaz için 19269 sayılı ve 2 Kasım 1986 tarihli HKKY'ne göre NO olarak verilen atık gaz emisyon sınır değeri 3.0 Bar işletme basıncında  $1 \text{ g/m}^3$ 'ü aşmamalıdır (HKKY, 1986). Bu tesislerden kaynaklanan atık gazlardaki  $NO_x$ 'in giderimi mümkün olup, daha iyi metodların arayışı da devam etmektedir.

Son yıllarda atmosferde özellikle  $NO_x$  gibi safsızlıkların azaltılması yönünde büyük çabalar sarfedilmektedir. Halen kullanılan çok çeşitli  $NO_x$  giderme metodları yanında yeni metodlar da önerilmektedir. Bu arada tüm bu mevcut giderme sistemlerinin ve yeni önerilenlerin uygun giderme sağlayıp sağlamadığı, endüstri tipine uygun olup olmadığı ve mevcut tesislerdeki çalışma koşullarını etkileyip etkilemediği de düşünülmelidir.

Kuru  $NO_x$  giderme tekniklerinin uluslararası öncülüğünü yapan seçimli katalitik indirgeme yöntemi (SCR) teknolojisinin verimi,  $NO_x$  yanında  $SO_2$ , CO, H-halojenler ve hidrokarbonlar gibi çok çeşitli diğer gazların ve tozun bulunması nedeniyle hayli

düşmektedir. Bu nedenle eşzamanlı giderimli bir yağ yıkama sisteminin geliştirilmesi gerekli görülmektedir. Bu yağ yıkama sistemleri, kademeli, dolgulu veya püskürtmeli kolon şeklinde değişik tiplerde olmaktadır. Yağ teknikler, kuru tekniklere göre daha az teknik, değişiklik ve yatırımla  $SO_2$  ve  $NO_x$  gazlarını birlikte giderebilmektedir.



Şekil 1.1. Hava kirlenicilerinin oluşumu ve etkileri (Döğeroğlu, 1988).

$NO_x$  gazının dolgulu kolonda absorpsiyonu nitrik asit üretiminde önemli bir adımdır.  $NO_x$  gazının absorpsiyonu diğer absorpsiyon işlemleriyle karşılaştırıldığı zaman aşağıdaki adımların gözönünde bulundurulması zorunluluğu nedeniyle bir hayli karmaşıktır (Suchak, Jethani, and Joshi, 1991):

- 1)  $NO_x$  gazının  $N_2O$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $N_2O_3$ ,  $N_2O_4$ ,  $N_2O_5$  vb. birçok bileşenlerin karışımından oluşmasıdır. Suda  $NO_x$  gazının absorpsiyonu, nitrik asit ve nitroz asiti verir.
- 2) Hem gaz faz hem de sıvı fazda tersinir ve tersinmez reaksiyonlar oluşmaktadır.
- 3) Birçok bileşenlerin eşzamanlı absorpsiyonunu, kimyasal reaksiyonlar takip eder. Önceden oluşmuş kimyasal reaksiyon ile meydana gelen bileşenlerin eşzamanlı desorpsiyonu oluşur. Örneğin  $NO_2$ ,  $N_2O_3$  ve  $N_2O_4$ 'ün absorpsiyonu, kimyasal reaksiyon ile birlikte yürür. Oysa  $NO$ ,  $NO_2$  ve  $HNO_2$ 'nin desorpsiyonu, kimyasal reaksiyon olduktan sonra oluşur.

4) Gaz faz ve sıvı faz bileşenleri arasında heterojen denge hakim olmaktadır.

$\text{NO}_x$  absorpsiyon kolonlarının dizaynı için birçok dengenin, kütle transfer hızlarının ve kimyasal reaksiyonun birleşik etkilerini anlamak gerekmektedir.  $\text{NO}_x$  absorpsiyonu ile birlikte açığa çıkan ısı etkisinin ve sıcaklık değişiminin de proses tasarımında gözönüne alınması gerekmektedir.  $\text{NO}_x$  absorplayıcı dolgulu kolon tasarımında aşağıdaki önemli özelliklerin gözönüne alınması gerekmektedir. Böylece oluşturulacak olan matematiksel modelleme dörtten fazla özelliği içerecektir.

- 1) Nitrik asitte  $\text{NO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}_3$  ve  $\text{N}_2\text{O}_4$ 'ün absorpsiyon hızları sudaki absorpsiyondan farklıdır. Nitrik asit derişimindeki artış ile absorpsiyon hızı azalır.
- 2)  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  ve  $\text{N}_2\text{O}_4$ 'ün verilen kısmi basınç değerleri için,  $\text{N}_2\text{O}_4$  ve  $\text{NO}_2$ 'nin absorpsiyonu olmaksızın nitrik asitin belirli bir sınırlayıcı derişimi vardır. Bu heterojen denge  $\text{NO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}_3$  ve  $\text{N}_2\text{O}_4$ 'ün absorpsiyon hızlarını önemli derecede azaltır (3 ile 4 kez) ve nitrik asit derişimi denge değerine yaklaştığı zaman indirgeme derecesi artar. Bu durum şimdiye kadar yayımlanan matematiksel modellerde ele alınmamıştır.
- 3) Nitrik asidin önemli bir miktarı, özellikle yüksek sıcaklıkta ve  $\text{NO}_x$  'in yüksek kısmi basınçlarında gaz fazında oluşur. Bundan dolayı matematiksel modellemede  $\text{HNO}_3$  oluşumu içerilmelidir.
- 4) Matematiksel modellemede ayrıntılı bir enerji denkleğinin de olması gerekir.

$\text{NO}_x$  gazlarının dolgulu kolonda kimyasal reaksiyonlu absorpsiyonu için Katima, Azapagic ve Handley, 1991'in çalışmalarındaki modelleme ve Kütahya Gübre Fabrikası A.Ş. yetkililerinden alınan veriler kullanılarak bilgisayar tasarımı yapılmıştır.

### 1.1. Amaç

Bu çalışmanın amacı, hava kalitesini olumsuz yönde etkileyen önemli bileşenlerden olan azot oksit gazlarını ve etkilerini tanımak, oluşum ve giderme yöntemlerini gözden geçirmek ve bilgisayarla  $\text{NO}_x$  absorplayıcı dolgulu bir kolon tasarlamaktır.

## 2. GENEL VE TEORİK BİLGİ

### 2.1. Azot Oksit Gazları

Azotun gaz halindeki kararlı oksitleri arasında diazot monoksit ( $N_2O$ ), azot monoksit ( $NO$ ), azot dioksit ( $NO_2$ ), diazot trioksit ( $N_2O_3$ ) ve diazot pentoksit ( $N_2O_5$ ) sayılabilir. Azot trioksit ( $NO_3$ ) azotun kararsız oksididir. Atmosferde daha çok  $N_2O$ ,  $NO$  ve  $NO_2$ 'ye rastlanmasına rağmen hava kirletici olarak  $NO$  ve  $NO_2$  önemlidir ve bu iki gazın karışımı " $NO_x$ " sembolü ile gösterilir (Kaytakoğlu, 1991; Ünal, 1985; Döğeroğlu, 1988).

#### 2.1.1. Azot oksit gazlarının fiziksel ve kimyasal özellikleri

Oda sıcaklığında ve atmosfer basıncında yanıcı ve zehirli olmayan  $NO$  gazı,  $NO_2$  oluşmasına yol açan tepkimeleri başlatır; gaz halinde renksiz olup dimerleşmez ve fotokimyasal çevrimde de önemli rol oynar. Aşağıda görülen rezonans formül yapısına rağmen sıvı veya katı halde tetramerleşir ve  $N_2O_3$  nedeniyle mavi renk alır (Erdik ve Sarıkaya, 1985; Kaytakoğlu, 1991).



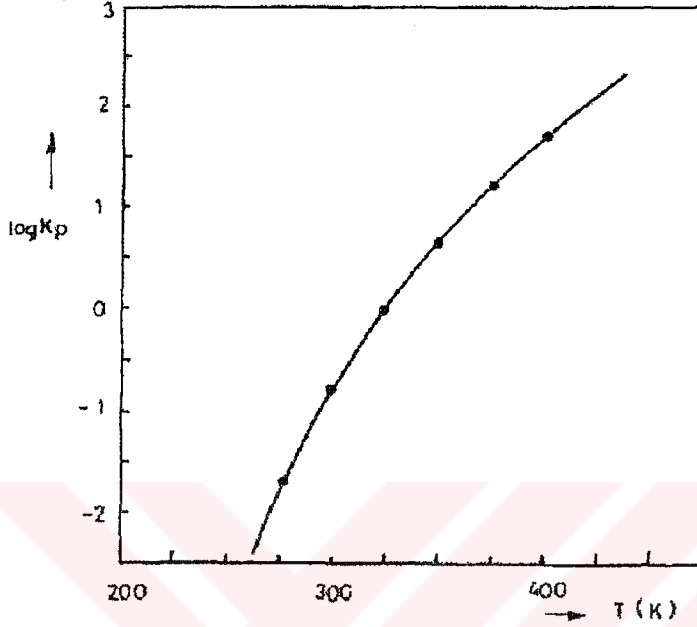
$NO$ , oda sıcaklığında ve atmosfer basıncında termodinamik açıdan kararsız olup oksijenin bulunduğu ortamda kısmi basıncına bağlı olarak  $NO_2$ 'e yükseltgenir. Oluşan  $NO_2$  ise dimeri  $N_2O_4$  ile dengede bulunur (Kaytakoğlu, 1991; Döğeroğlu, 1988).



Saf  $NO$  ve  $O_2$ 'in stokiyoimetrik karışımlarında gerçekleşen bu tepkime için  $\Delta H_{298}^0 = -52.6$  kJ/mol ve  $K_p = (P_{NO} P_{O_2}^{1/2} / P_{NO_2}) = 7.59 \cdot 10^{-7}$  atm<sup>1/2</sup> (300 K)'dir. Ayrıca



denge tepkimesi için  $\Delta H^{\circ}_{298} = -56.8$  kJ/mol olup, denge sabitinin sıcaklıkla değişimi Şekil 2.1'de verilmiştir (Kaytakoğlu, 1991).



Şekil 2.1. Eşitlik 2.3 için denge sabitinin sıcaklıkla değişimi (Kaytakoğlu, 1991).

NO gazı,  $\text{KMnO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$  ve  $\text{O}_3$  gibi çeşitli oksitleyici maddelerle tepkimeye girerek azotun yüksek oksitlerine, oksijenle de  $\text{NO}_2$ 'e dönüşebilir (Kaytakoğlu, 1991; Erdik ve Sarıkaya, 1985; Ünal, 1985).



NO, saf iken korozyon etkisi olmadığı halde, nem ve oksijen içeren ortamlarda nitrik ve nitroz asit oluşturduğu için korozyona neden olur.



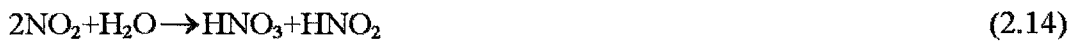
NO<sub>2</sub> gazı korozif, zehirli ve keskin kokusuyla kolaylıkla tanınır, görünür bölgedeki ışığı özellikle kısa dalga bölgesinde (3000-4000 Å) daha şiddetli olarak absorpladığı için havadaki derişimine bağılı olarak sarı-turuncu, kırmızı-kahverengi gibi bir görünümde olup radikal yapısından dolayı paramanyetiktir (Kaytakoğlu, 1991; Erdik ve Sarıkaya, 1985).

Soğutma ve basınçlandırma işlemleri sırasında önce kahverenkli bir sıvı şeklinde yoğunlaşır, daha sonra renksiz katı hale geçer; bu esnada paramanyetik özelliğini kaybederek dimeriyle dengede bulunma durumuyla yorumlanabilen diamağnetik özellik gösterir (Kaytakoğlu, 1991; Kara, 1984).

Bir NO<sub>2</sub> karışımı, sıvı fazda iken %1'den daha az oranda NO<sub>2</sub> içerdiği halde, katı faz tümüyle N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>'ten oluşur. Buharı ise 100 °C'de yaklaşık %90 NO<sub>2</sub> içerir. Sıcaklık, 140°C 'in üzerine çıkarıldığında, NO<sub>2</sub>'e dönüşüm tamamlanır. Bu sıcaklığın altında gaz ve sıvı özellikleri; NO<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> arasındaki dengeye bağılıdır. NO<sub>2</sub> gazı, metalleri ve diğer bazıkati ve gaz elementleri ve yüksek oksidasyon seviyelerinde olmayan bileşikleri oksitleyebildiği gibi kendisi de O<sub>3</sub>, NO<sub>3</sub> ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> gibi kuvvetli oksitleyicilerle tepkime vererek azotun yüksek oksitlerini oluşturur (Kaytakoğlu, 1991).



Ayrıca aşağıda görülebileceği gibi NO<sub>2</sub>, su ile tepkimeye girerek HNO<sub>3</sub> ve HNO<sub>2</sub> oluşturur.



N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, azot dioksitin dimeri olup, iyonlaşmayan, içinde basit olmayan tuzların çözüldüğü ve çözücü kapasitesi dietil eterle karşılaştırılabilen bir çözücüdür. Bir çok

organik bileşiği çözebilen ve organik tepkimelerin oluşmasını sağlayan bir ortam olarak da kullanılır. Sıvı  $N_2O_4$ , saf halde iyi bir iletken olmadığı halde dielektrik sabiti yüksek olan ikinci bir çözücü ilavesiyle iyonlaşabilir.

Oksitleyici özellik de gösteren sıvı haldeki  $N_2O_4$ , alkali, soy ve diğer metallerle tepkimesi sonucunda metal nitratları oluşturur. Ayrıca  $N_2O_4$ 'ten organik bileşenlerin nitrolanmasında,  $HNO_3$ ,  $HNO_2$ ,  $NaNO_3$  ve nitratlı gübrelerin üretilmesinde, damıtma sırasında akrilatların polimerizasyonunu önlemek için bazı oksidasyon tepkimelerinde katalizör olarak da faydalanılabilir (Kaytakoğlu, 1991; Ünal, 1985).



$N_2O$ , atmosferde, ozon veya atomik oksijen ile azotun tepkimesi veya azotlu bileşiklerin bozunması sonucu oluşabildiği gibi mikroorganizma faaliyetleri ve fosil yakıtların yanması sonucunda da oluşabilmektedir. Kostik soda ile nitrik asiti giderilerek saflaştırılıp, 100 atm. basınçta çelik tüplerde sıvı olarak saklanır ve çoğunlukla oksijenle karıştırılarak anestezi amaçları için kullanılır. Gaz halinde, oda sıcaklığında kimyasal etkinliği azdır.  $N_2O$  gazı, 500 °C gibi yüksek sıcaklıklarda  $N_2$  ve  $O_2$ 'e parçalanır, alkali pirogallolde çözünmez, mutlak alkolde çok az çözünür ve hidrojeni yakarak hacmi azalır (Kaytakoğlu, 1991).

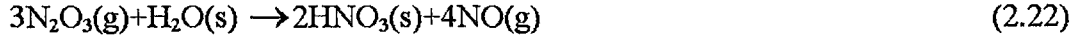


$N_2O_3$ , eşdeğer miktarda  $NO$  ve  $NO_2$  karışımının 20 °C soğutulmasıyla mavi bir sıvı olarak yoğunlaşır (Kaytakoğlu, 1991).





$N_2O_3$ , normal koşullarda NO ve  $NO_2$  vererek parçalanacak kadar kararsızdır.  $N_2O_3$ , nitroz asitin anhidritidir ve sulu alkalilerde çözünerek  $NO_2^-$  anyonunu, su ile tepkimesi sonucunda ise  $HNO_3$  ve  $HNO_2$ 'i meydana getirir (Kaytakoğlu, 1991).



$N_2O_5$ , katı halde ve renksiz olup  $32.5^\circ C$ 'de süblimleşme özelliği gösterir.  $N_2O_5$ , nitrik asitin anhidritidir ve  $HNO_3$ 'ten fosforpentaoksit kullanılarak su çekilmesiyle (dehidratasyon) hazırlanır. Yüksek sıcaklıkta, gaz fazında kararsız olan  $N_2O_5$ ,  $NO_2$  ve  $O_2$  vererek bozunur ve atmosferdeki su ile birleşerek nitrik asit oluşturur (Kaytakoğlu, 1991).



### 2.1.2. Azot oksit gazlarının oluşum kaynakları

Kömür, petrol, gazolin, doğal gaz gibi yakıtları kullanan durgun ve hareketli kaynaklardan, ham petrolün rafinasyon işlemlerinden, petrokimya tesislerinden, nitrik asit kullanarak bakır ve benzeri metalleri işleyen, kok ve demir-çelik üreten metalürjik tesislerden, nitrik asit, patlayıcı madde ve gübre üreten ve kullanan tesislerden ve diğer tüm yüksek sıcaklıkta işlem yapan kaynaklardan çıkan azot oksitleri kesikli veya sürekli şekilde doğaya yayılmaktadır (Kaytakoğlu, 1991).

$NO_x$  oluşumuna yol açan iki önemli azot kaynağı, havada % 79 oranında bulunan moleküler azot ile canlı ve cansız varlıkların bünyesindeki bileşik azottur. Yıldırım, şimşekler ve mikroorganizma faaliyetleri gibi doğal olaylar sonucu evrende azot dengesi kendiliğinden sağlanmakta ve bu doğal çevrim sırasında da azot oksitleri oluşabilmektedir. Havadaki serbest azotun bir kısmı mikroorganizmalar aracılığı ile toprakta bitkilerin kolayca alabileceği organik azot bileşiklerine dönüştürülür. Bu arada bitkilerle beslenen hayvan bünyesindeki organik azot da salgı, dışkı ve çürüme yolu ile yine toprağa aktarılır. Bitkilerin çürümesi ve bakteriyel parçalanması ile azotlu gübrelerin sentezi ve toprağa



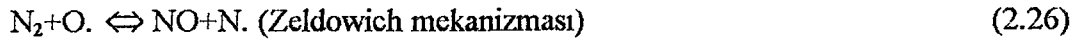
verilmesi sonunda toprakta biriken azotlu bileşiklerin bir kısmı yine bitkiler tarafından alınırken, diğer kısmı deniz, göl, nehir sularına karışır ve burada oluşan amonyak, sulardan veya topraktan buharlaşarak atmosfere katılır. Bütün bu bileşikler deniz, bitki ve toprak bakterilerinin etkisiyle denitrifiye olarak serbest azotun atmosfere dönmesini ve çevrimin tamamlanmasını sağlar (Kaytakoğlu, 1991).

İnsanların neden olduğu yapay azot oksitlerin %95'ini, sabit veya hareketli kaynaklarda yakıt kullanımı oluşturur. Bu  $\text{NO}_x$  miktarının, yaklaşık %43.8'ini yakıt kullanan buhar kazanları, kuvvet santralleri, evsel ve ticari amaçlı ısıtma sistemleri oluştururken, %51.3'ünü hareketli kaynaklar (benzin ve dizel motorlu taşıt araçları) oluşturmakta, ayrıca doğal gaz naklinde kullanılan ve doğal gazla çalıştırılan kompresör ve makinaların da  $\text{NO}_x$  emisyonunu arttırdığı bilinmektedir (Kaytakoğlu, 1991).

Yanma reaksiyonlarında,  $\text{NO}_x$  oluşumuna yol açan iki önemli azot kaynağı, yakma işlemlerinde kullanılan havanın azotu ile yakıt bünyesindeki bileşik azottur. Bu iki azot kaynağından  $\text{NO}_x$  oluşumunda asıl önem taşıyan, yakıtların içerdiği bileşik azottur. Teorik açıdan element azotun ( $\text{N}=\text{N}$ ) bağ enerjisi, organik bileşiklerdeki C-N bağının enerjisinden daha fazla olduğu için yakma havasında bulunan oksijen, C-N bağı ile daha kolay tepkime verir. Elementel azotun bulunmadığı 587-877 °C sıcaklık aralığındaki ortamlarda yapılan deneysel çalışmalar, karbon monoksitin oksitleyici olarak kullanıldığı yanma ortamına, azot içeren bir organik bileşik ilavesinin  $\text{NO}_x$  oluşturduğunu göstermiştir. Yakma süreçlerinde ikinci azot kaynağı, diğer tüm yüksek sıcaklık işlemlerinde olduğu gibi, yakma havasında bulunan serbest azottur. Bileşiminde azot içermeyen (metan gibi) yakıtların hava ile yakıldığı deneysel çalışmalarda  $\text{NO}_x$  oluşumunun gözlenmesi, hava azotunun da bu oluşumda gerçekten önemli bir rol oynadığını kanıtlamıştır (Kaytakoğlu, 1991).

Oda sıcaklığında,  $\text{N}_2$  ve  $\text{O}_2$  molekülü kolaylıkla tepkime veremeyeceğinden, NO ve  $\text{NO}_2$  miktarları yine düşük seviyelerde olmakla beraber NO miktarı,  $\text{NO}_2$ 'den daha azdır (Çizelge 2.1.). Ancak uygulanan gerçek yanma sıcaklıklarında (1277 °C) ortamda ihmal edilebilir seviyelerde  $\text{NO}_2$  bulunurken, NO oluşumu önem kazanır. Burada NO yakma süreçlerinin yüksek sıcaklık ve basınç koşullarında yalnız moleküler hava azotu ve

oksijeninin, Zeldowich serbest radikal mekanizmasına göre birleşmesiyle oluşabilir.



Bu denge tepkimesi, gazın derişimi, alev sıcaklığı, basıncı ve belirli sıcaklık, basınç ve derişim aralığında gazların davranışlarına ve yanma ortamında kalış süresine bağlı olarak değişir. Ayrıca hava/yakıt oranı da önemli bir parametredir (Kaytakoğlu, 1991; Döğeroğlu, 1988; Ünal, 1985).

Çizelge 2.2.'den de görüleceği üzere net tepkimenin denge sabiti 727 °C'in altındaki koşullarda,  $10^{-4}$  değerinden daha küçük olduğu için, bu sıcaklıklarda NO oluşumu ihmal edilebilir. Ancak NO oluşumu, 1227 °C' in üzerindeki sıcaklıklarda gerçekleşen yanma süreçlerinde özel önem taşır. Bu koşullarda, sabit ve hareketli kaynaklarda oluşan azot oksitleri, % 90 oranında NO içermekle birlikte, tepkimenin verimi 3200 °C sıcaklıkta bile % 4.4' ü geçmez (Kaytakoğlu, 1991). Sabit sıcaklıkta azot monoksitin belirli bir derişime ulaşabilmesi zamana bağlıdır (Çizelge 2.3.).

Çizelge 2.1. Bileşiminde % 3.3 O<sub>2</sub> %76 N<sub>2</sub> bulunan bir baca gazında, NO ve NO<sub>2</sub> bileşenlerinin denge derişimlerinin sıcaklıkla değişimi (Kaytakoğlu, 1991; Döğeroğlu, 1988)

T(°C)	NO (ppm)	NO <sub>2</sub> (ppm)
27	$1.1 \cdot 10^{-10}$	$3.8 \cdot 10^{-5}$
527	0.77	0.11
1127	250	0.87
1600	2000	1.87

Çizelge 2.2. Azot monoksitin elementlerinden oluşumu yönündeki tepkime için denge sabitinin sıcaklıkla değişimi (Kaytakoğlu, 1991; Döğeroğlu, 1988)

(Sıcaklık, °C) (P, atm) Denge sabiti	227	727	927	1227	1727	2227
$K_p = \frac{(P_{NO})^2}{(P_{N_2})(P_{O_2})}$	$10^{-15}$	$8.7 \cdot 10^{-5}$	$5.3 \cdot 10^{-4}$	$3.3 \cdot 10^{-3}$	$2.0 \cdot 10^{-2}$	$5.9 \cdot 10^{-2}$

Çizelge 2.3. Değişik sıcaklıklarda %75 N<sub>2</sub> ve %3 O<sub>2</sub> içeren gaz karışımında NO derişiminin 500 ppm değerine erişmesi için geçen süre ve NO denge derişimleri (Kaytakoğlu, 1991; Döğeroğlu, 1988)

Sıcaklık (°C)	Süre (s)	NO denge derişimi (ppm)
1315	1370	550
1538	16.2	1380
1760	1.1	2600
1982	0.117	4150

NO<sub>2</sub>, sıcaklık 600 °C' in üzerine çıktığında Çizelge 2.4.' de belirtilen denge parametrelerine bağlı olarak ısıl bozunmaya uğrar. NO' in atmosferik koşullarda oksijenle birleşerek, NO<sub>2</sub> oluşturması durumundaki denge tepkimesinin hızı artan sıcaklıkla azaldığından, NO<sub>2</sub>'in oluşması düşük sıcaklıklarda önem taşır. Yüksek sıcaklıkta ise denge, NO oluşumu yönüne kayar. Düşük sıcaklıklarda yapılan denge hesaplamaları ve deneysel sonuçlar, NO<sub>2</sub> derişiminin NO'den daha yüksek olduğunu göstermiştir.

Çizelge 2.4. NO<sub>2</sub> oluşumu için denge sabitinin sıcaklıkla değişimi (Kaytakoğlu, 1991; Döğeroğlu, 1988)

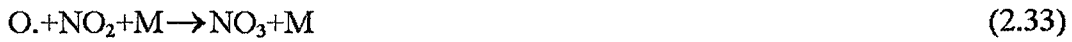
(Sıcaklık, °C)	27	227	727	1227	1727
(P,atm) Denge sabiti					
$K_p = \frac{P_{NO_2}}{(P_{NO})^{1/2}(P_{O_2})^{1/2}}$	10 <sup>6</sup>	1.2 10 <sup>2</sup>	1.1 10 <sup>-1</sup>	1.1 10 <sup>-2</sup>	3.5 10 <sup>-3</sup>

Yanma süreçlerinde, tüm yanma gazları, ısı kayıplarından dolayı soğur. Gazın soğuması sırasında ortamda fazla O<sub>2</sub> bulunuyorsa, NO'nin NO<sub>2</sub>'e dönüşümü artacaktır. Bu durumda termodinamik açıdan, yanma sürecini terkeden soğumuş baca gazındaki NO<sub>x</sub> miktarının, NO<sub>2</sub> yönünden zengin olduğu düşünülebilir. Ancak, gerçekte durum daha farklıdır. Her ne kadar NO<sub>x</sub> karışımı doğada NO<sub>2</sub> şeklinde bulunuyorsa da pek çok yanma sürecini terkeden baca gazlarının önemli derecede NO içerdiği bilinmektedir (Kaytakoğlu, 1991; Wark and Warner, 1976).

Yanma süreçlerinden atılan NO<sub>x</sub> gazlarının yaklaşık % 90-95' ini oluşturan NO, daha önce de belirtildiği gibi, diğer baca gazları ile birlikte atmosfere atılırken termodinamik açıdan kararsızdır ve sıcaklığı zamanla düşer. Sonunda NO<sub>x</sub>'in baca gazındaki derişimleri, daha yüksek sıcaklıklarda oluştukları derişim değerlerinde donar. Bu sıcaklığın (1277 °C) altındaki değerlerde oluşan NO<sub>2</sub> miktarı çok düşüktür. Böylece yanma gazlarında daha yüksek sıcaklıklarda bulunan NO'nin NO<sub>2</sub>'e oksitlenme tepkimesinin hemen tümü, tepkime kinetiği yardımıyla belirlenen zaman aralığı içinde atmosferde tamamlanır. Azot monoksitin N<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub>'e bozunması tepkimesinin yüksek aktivasyon enerjisi, yaklaşık 375 kJ/mol ile sınırlıdır ve bu da kinetik hızı sınırlar. Sonuç olarak, yüksek sıcaklıklarda oluşan NO, düşük sıcaklıklarda, elementlerine bozunmak yerine tercihen NO<sub>2</sub>'e dönüşür. Çeşitli kaynaklardan yayılan NO<sub>x</sub> miktarı, bölgesel ve zamana bağlı olup, özellikle kış aylarında ısınma gereksinimiyle yakıt kullanımının artması ve ayrıca günün belirli saatlerinde trafiğin yoğunlaşması nedeniyle artmaktadır (Kaytakoğlu, 1991; Döğeroğlu, 1988; Wark and Warner, 1976).

### 2.1.3. Azot oksit gazlarının atmosferdeki etkileşimi

Çeşitli kaynaklardan atmosfere yayılan azot oksitleri, güneş ışığının katalitik etkisiyle, atmosferde bulunan ozon, hidrokarbon ve nem gibi bileşiklerle tepkimeye girerek fotokimyasal duman ve aerosol bileşimini andıran pek çok istenmeyen yan ürün oluşturabilirler (Kaytakoğlu, 1991; Döğeroğlu, 1988). Atmosferdeki NO-O<sub>3</sub>-NO<sub>2</sub> arasında güneş ışığının etkisiyle (M, çarpışma ortamını sağlayan herhangi bir molekül veya yüzey olmak üzere) aşağıda verilen tepkime eşitliklerinden ve Şekil 2.2.'den görüldüğü gibi gerçekleşen bir "fotolitik çevrim" söz konusudur. Ayrıca azot oksitleri atmosferdeki su buharı ile tepkimeye girerek nitrik ve nitroz asit oluşturduğu gibi atmosferdeki SO<sub>2</sub>'in de fotokimyasal dumanla etkileşimi söz konusudur.





#### **2.1.4. Azot oksit gazlarının insan ve çevre sağlığına etkileri**

NO, atmosferde 0.5 ppm'in altında kalan derişim seviyelerinde bulunur ve bu düşük derişim nedeniyle insan sağlığı üzerindeki biyolojik zehir etkisi önemsiz olmakla beraber NO<sub>2</sub> ve fotokimyasal duman oluşumuna neden olduğu ve kendinden sonra gelen tepkimeleri başlattığı için NO oluşumunun kontrolü özel önem taşır. Her türlü durgun ve hareketli yanma kaynakları, endüstri, yıldırım ve şimşekler gibi bazı doğal olaylar ve mikroorganizmaların faaliyetleri sonucunda da oluşabilen azot oksitleri arasında insan ve çevre sağlığı açısından asıl önem taşıyan NO<sub>2</sub>'dir.

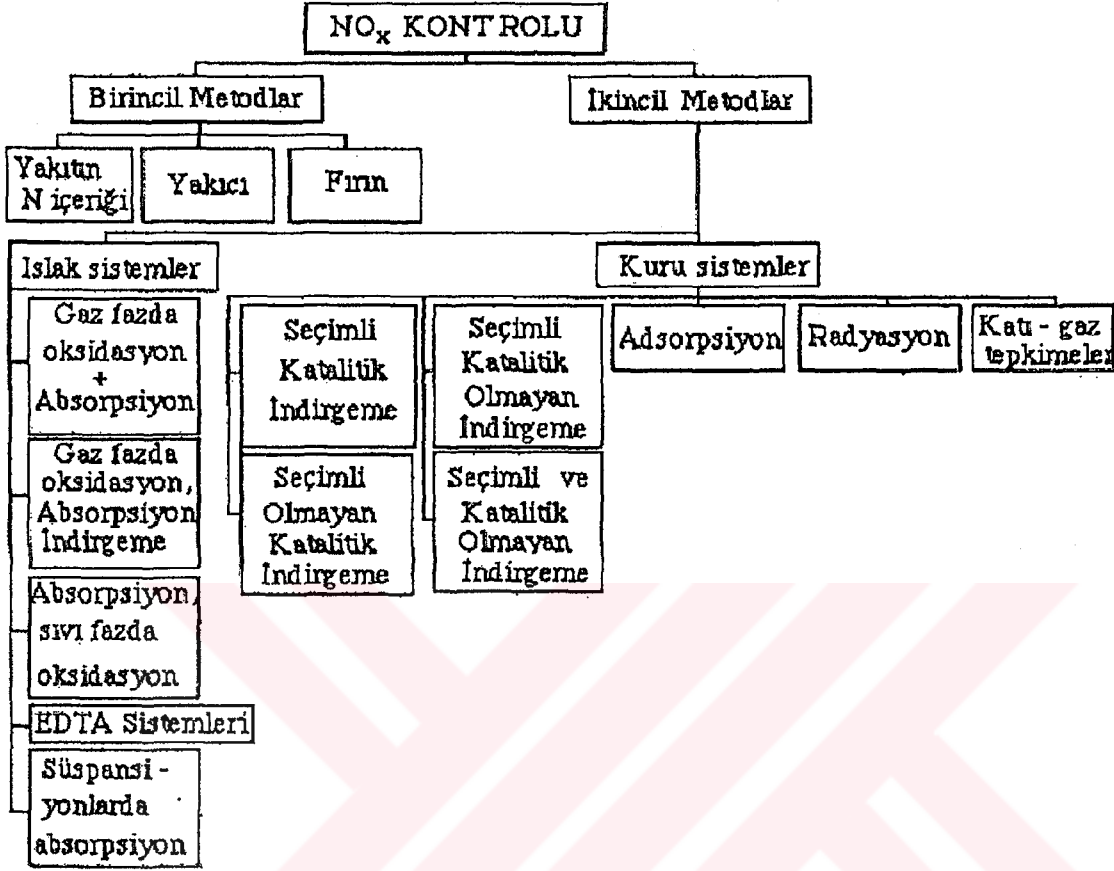
Bilindiği gibi gazların insan ve diğer canlı ve cansız varlıklar üzerine etkileri, sudaki çözünürlükleri, derişimleri ve maruz kalınan süre ile yakından ilgilidir. Tahriş edici nitelik taşıyan bu gazlardan bazıları (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>) burun ve ağız yoluyla vücuda girip, ağız, burun, nefes borusu ve bronşlarda çözünerek yanma, kaşınma, kuruma gibi çeşitli zararlara yol açabilirken, etkilerini hayvan, bitki ve cansız varlıklar üzerinde de gösterebilirler.

Suda ve canlıların mukoza sıvısında çözünürlüğü kükürt oksit gazlarına kıyasla daha az olan azot oksitleri, akciğerdeki hava boşluklarında birikerek bu organı çalışamaz duruma getirirler ve bu nedenle kükürt oksitlere göre insan sağlığı için daha tehlikelidir. Azot dioksit, özellikle akut solunum hastalıklarının ve kronik solunum enfeksiyonlarının oluşum oranını artırır. Hayvanlarda da etkisini özellikle akciğerlerde gösterir (Kaytakoğlu, 1991; Döğeroğlu, 1988).

#### **2.2. Azot Oksit Gazlarının Oluşumunun Kontrol ve Giderilme Teknolojileri**

Bu bölümde, NO<sub>x</sub> gazlarının oluşumunun kontrolü ve giderilmesi amacıyla yanmanın ve yakma faktörlerinin ayarlandığı tekniklere ve NO<sub>x</sub> giderici metotlara kısaca değinilmiştir. Şekil 2.3.'de mevcut kontrol teknolojileri toplu olarak verilmiştir.





Şekil 2.3. NO<sub>x</sub> emisyonunu düşürücü mevcut teknikler (Kaytakoğlu, 1991; Bosch and Janssen, 1988).

Mevcut birincil NO<sub>x</sub> giderme metotları arasında yakıtın N (doğal azot) içeriğinin kontrolü ile yakıcı ve yanma sistemlerinin ayarlanması sayılabilir. İkincil NO<sub>x</sub> giderme metotları da, ıslak ve kuru metotlar veya katalitik ve katalitik olmayan metotlar olarak iki gruba ayrılabilir. Bileşik atık gaz giderme işlemleri SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> ve parçacık emisyonunu birlikte azaltır. Ticari nitelikteki atık gaz tesisleri, daha çok kömürün yakıldığı kazanlarda oluşan SO<sub>2</sub> ve tozun uzaklaştırılması amacıyla geliştirilmişlerdir. Seçimli katalitik indirgeme tesislerinin gelişimi ise, demonstrasyon aşamasında ve ticari düzeydedir (Kaytakoğlu, 1991).



### 2.2.1. Azot oksit gazlarının oluşumunun kontrolü

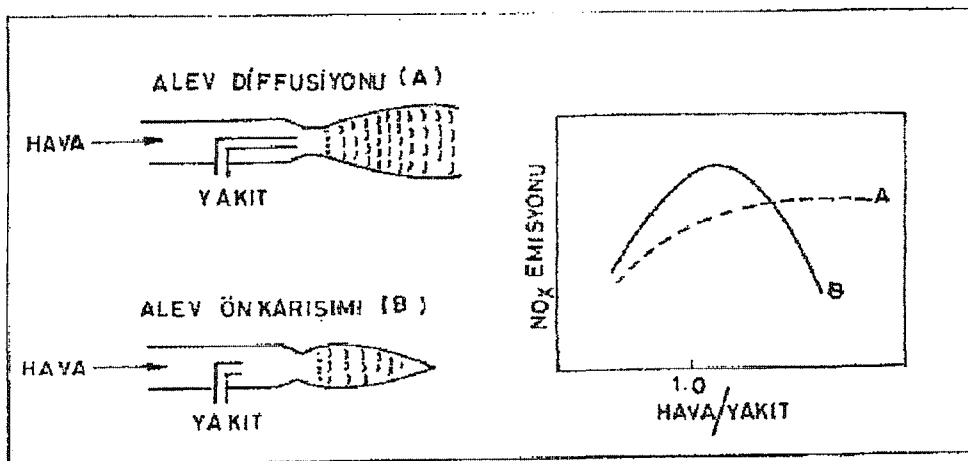
Birincil NO<sub>x</sub> giderme yöntemlerinden bahsedilen bu kısımda, azot oksit emisyonlarını çevre sağlığı ve korunması açısından yasal seviyelere düşürebilmek için uygulanabilen metotlardan ve bu gazların oluşum tepkimelerinin ve ilgili faktörlerin kontrolundan bahsedilecektir. Şekil 2.4.'de bu faktörler özet olarak verilmiştir. Yüksek sıcaklıktaki yanma süreçlerinde oluşan NO<sub>x</sub> miktarını etkileyen faktörler arasında, sürecin termodinamiği (sıcaklık, basınç, hava/yakıt oranı), madde derişimleri, gazların işlem koşullarında ve reaktördeki adyabatik alev sıcaklığında kalma süresi, soğutma ve seyreltme hızları, karışma derecesi, yakma cihazının tipi ve yakıttaki kimyasal bağlı azot miktarı sayılabilir (Kaytakoğlu, 1991).

Bütün bu temel faktörler dikkate alınarak önerilen teknikler, baca gazının dolaşıma geri verilmesi (Kaytakoğlu, 1991; Ünal, 1985), iki ve çok evreli yakma (Kaytakoğlu, 1991; Döğeroğlu, 1988; Nato (15), 1973; Nato (20), 1973; Parkinson, 1981), hava/yakıt oranının ayarlanması, az fazla hava ile yakma (Kaytakoğlu, 1991; Öser, 1982; Cost, 1985), yakma havasının sıcaklığını düşürerek veya yanma sonrasında gazları hızla soğutarak maksimum alev sıcaklıklarının düşürülmesi ve bu sıcaklıkta yanma gazlarının kalış sürelerinin azaltılması (Kaytakoğlu, 1991; Ünal, 1985; Döğeroğlu, 1988), yakıtın N içeriğinin azaltılması ve akışkan yatak ve benzeri yeni tip yakma cihazlarının tasarımıdır (Kaytakoğlu, 1991).

Yakıcı ve yanma sistemlerinin kontrolü NO<sub>x</sub> derişiminde önemli sayılacak azalma sağlayabilmektedir. Ayrıca, hava ve yakıtın karıştırılma yöntemleri ve hava/yakıt oranı da önemli olmaktadır. Değişik iki alev tipinde, NO<sub>x</sub> emisyonunun hava/yakıt oranı ile değişimi Şekil 2.5.'de, düşük NO<sub>x</sub> emisyonu için önerilen çok kademeli yakma sistemlerinin basit bir örneği ise Şekil 2.6.'da verilmiştir. Kontrole yönelik bu tür önlemler, mevcut kurulu tesislerde temel yapı değişikliğine ve ekonomik açıdan büyük yatırım masraflarına neden olabileceğinden ancak yeni kurulan tesisler için önerilebilirler. Bu nedenle kurulu tesislerde ikincil giderme yöntemlerinin uygulanması genellikle daha ekonomik ve pratik görünmektedir (Kaytakoğlu, 1991; Kara et al., 1987).



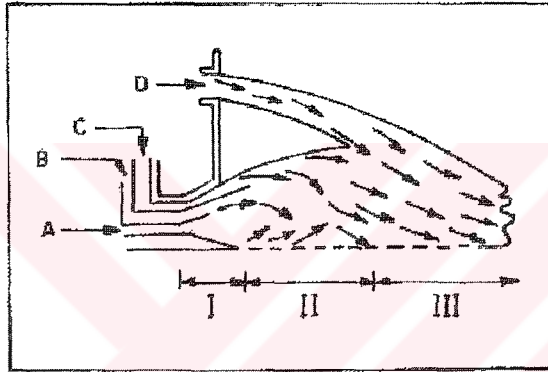
Şekil 2.4. Yakma düzenlerinde modifikasyonla NO<sub>x</sub> emisyon kontrolü (Bosch and Janssen, 1988; Ishimoto and Miyamae, 1985).



Şekil 2.5. Petrol ve gaz yakıcılarında, hava/yakıt oranı ile NO<sub>x</sub> ilişkisi (Kaytakoğlu, 1991; Cost, 1985).

### 2.2.2. Azot oksit gazlarının giderilme teknolojileri

Azot oksit gazlarının oluşumunun doğrudan kontrolünün mümkün olmadığı durumlarda, bu gazların, diğer tüm gazlar için olduğu gibi, atmosfere verilmeden önce uygun bir ortamda tutulup tersinir veya tersinmez bir tepkime ile zararsız maddelere dönüştürülerek giderilmesi gerekir. Bu işlemler genellikle "ikincil NO<sub>x</sub> giderme" yöntemleri olarak adlandırılır ve kendi aralarında kuru ve ıslak yöntemler olmak üzere iki ana gruba ayrılabilirler.



Şekil 2.6. Çok kademeli yanmanın oluştuğu, düşük-NO<sub>x</sub> yakıcıları (Kaytakoğlu, 1991; Parkinson, 1981).

- |                         |                           |
|-------------------------|---------------------------|
| I Yakıtca çok zengin ,  | A: Kömür ve birincil hava |
| II Etkin hava eklemesi, | B: İç ikincil hava        |
| III Son hava eklemesi,  | C: Dış ikincil hava       |
|                         | D: Üçüncül hava           |

#### 2.2.2.1. Kuru yöntemler

Kuru yöntemler de kendi aralarında aşağıdaki gibi alt gruplara ayrılabilir.

##### a) Seçimli Katalitik İndirgeme (SCR)

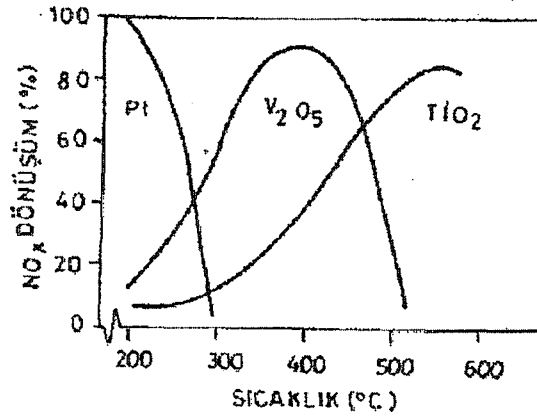
Seçimli katalitik indirgeme yöntemi teknolojisi esas itibariyle Japonya' da, NO<sub>x</sub> emisyonu sınır değerlerinin diğer ülkelere göre hayli düşük olması nedeniyle geliştirilmiş

ve endüstride, özellikle büyük miktarlarda buhar üreten tesislerde uygulanmıştır. Burada  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  veya zeolit üzerine tutturulmuş  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MoO}_3$  ve  $\text{WO}_3$  esaslı katalizörlerle, 300-450 °C sıcaklık aralığında ve  $\text{NH}_3$  eşliğinde  $\text{N}_2$  ve  $\text{H}_2\text{O}$ ' ya % 80'in üzerinde verimle indirgenmiş ve bu indirgenme tepkimeleri sırasında katalizör bileşimine bağlı olarak değişen miktarlarda  $\text{N}_2\text{O}$  oluşmuştur. Bu sıcaklık aralığının altında  $\text{NO}$  indirgeme hızının yavaşlaması, bu aralığın üzerinde ise  $\text{NH}_3$  yanmasından dolayı  $\text{NO}_x$  oluşumu söz konusu olmaktadır (Kaytakoğlu, 1991).

Seçimli katalitik indirgeme metodu ile  $\text{NO}_x$  indirgenmesi aşamasında  $\text{NH}_3$  yerine  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$  ve hidrokarbonların kullanımı önerilmiş ve denenmiştir.  $\text{NH}_3$ ' in söz konusu diğer tepkiyenlere göre seçimlilikteki üstünlüğü ve atık gazdaki  $\text{O}_2$  ile hızla tepkimeye girmesi, onun bu sistemde önemli ve değişmez öge olmasını sağlamıştır. Ara ve yan tepkimelerin başka kaynaklarda (Kaytakoğlu, 1991) verildiği bu  $\text{NO}_x$  giderme prosesi için basitleştirilmiş tepkimeler



şeklinde verilebilir. Atık gazlardaki  $\text{NO}_x$ , genellikle % 85-90 oranında  $\text{NO}$  içerdiğinden (2.38) tepkimesi (2.39) tepkimesine nazaran daha etkin ve ekonomik görünmektedir. En uygun  $\text{NO}_x$  giderimi 1 mol  $\text{NH}_3$ /1 mol  $\text{NO}_2$  oranı ile elde edilmekte, artan  $\text{NH}_3$  miktarı ile her ne kadar verim artıyorsa da  $\text{NH}_3$  kaybı da artmaktadır. Bu sistemin önemli parametreleri olarak katalizör ve ona uygun bir reaktör, ayrıca  $\text{NH}_3$  beslemesi ve  $\text{NH}_3$  depolanması sayılabilir. Söz konusu bu parametrelerin uygun seçimi ve düzenlemesi, bu giderme yöntemini daha karmaşık yapmaktadır. Ayrıca düşük sıcaklıklarda oluşan amonyum tuzlarının tıkanma ve korozyona neden olması ve  $\text{SO}_2$ 'nin katalizörü zehirleyen yüksek oksitlerine ( $\text{SO}_x$ ) oksitlenmesi de önemli problemler arasında sayılabilir (Kaytakoğlu, 1991). Şekil 2.7.,  $\text{NO}_x$  dönüşümünün, sıcaklık ve üç değişik katalizöre bağlılığını göstermektedir.



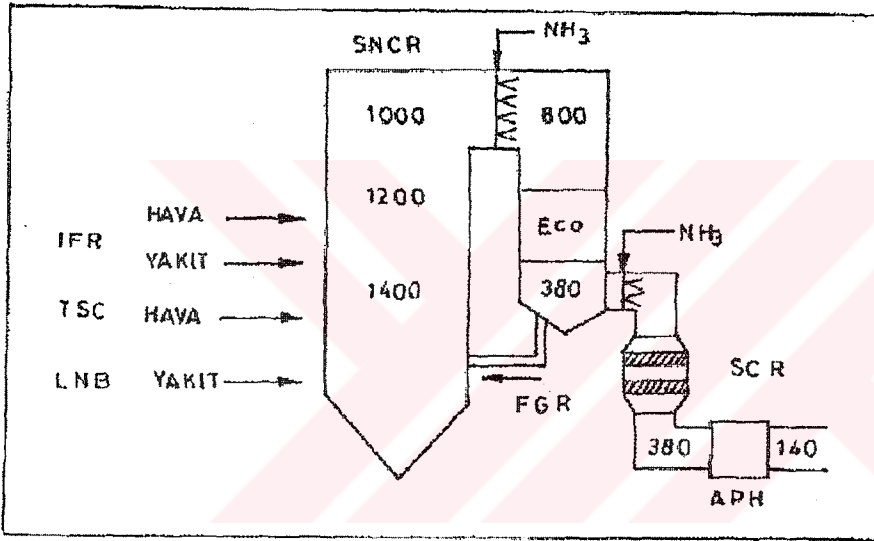
Şekil 2.7. NO<sub>x</sub>'in, Pt, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, TiO<sub>2</sub> esaslı katalizörler ve NH<sub>3</sub> ile seçimli katalitik indirgenmesi (Kaytakoğlu, 1991; Harrison et al., 1985).

Seçimli katalitik indirgeme tesisleri, toz tutmak için kullanılan elektrikli filtrelerden hem önce (yüksek toz içerikli ortamda) hem de sonra (düşük toz içerikli ortamda) kurulabilmektedir. Bu yöntemin Almanya'daki uygulamasında iki temel problemle karşılaşmıştır (Kaytakoğlu, 1991). İlkinde, seçimli katalitik indirgeme yöntemi tesislerinin, bir yakma tesisinde bulunan elektrikli filtrelerden önce kullanılması durumunda, yüksek miktarda kükürt içeren yakıtların kullanımından kaynaklanan temizlenmemiş uçucu tozlardan dolayı, yüksek miktardaki toz ve amonyum nitratın ayırımı probleminden bahsedilir. İkinci olarak bu tesislerin, nispeten düşük sıcaklıkta çalışan elektrikli filtre ve SO<sub>2</sub> giderici tesislerden sonra kullanılması durumunda ise, atık gazın tekrar katalitik giderimi için 80 °C' den uygun sıcaklık aralığına (300-450 °C) kadar ısıtılması gereklidir.

Seçimli katalitik indirgenme sistemleri, elektrikli filtrelerden sonra ve SO<sub>2</sub> giderme tesislerinden önce (düşük toz içerikli ortamda) monte edilebilmekte, özellikle kömürün yakıldığı yanma tesislerinde bu şık tercih edilmektedir. Şekil 2.8., seçimli katalitik NO<sub>x</sub> indirgenme sistemlerinin bir yakma ünitesiyle birlikte kullanımını göstermektedir. Ayrıca yüksek sıcaklıkta yakma kamaralarından uçan tozlara tutunmuş ağır metaller, seçimli katalitik NO<sub>x</sub> indirgenme tesislerine kadar gelebilmekte, bu da katalizör aktifliğinin hızla azalmasına (katalizör zehirlenmesine) ve katalizör aşınmasına neden olmaktadır. Bahsi

geçen yüksek sıcaklıktaki yakma kamaralarında bu problemlerin çözümü şimdiye kadar mümkün olmamıştır (Kaytakoğlu, 1991).

Seçimli katalitik indirgeme teknolojisine dayanan diğer bir teknik de; Shell' in 1964' de geliştirdiği bir metotla,  $\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  katalizör yardımıyla  $\text{SO}_2$ 'in  $\text{NO}_x$  ile birlikte giderilebilmesidir. Burada,  $\text{SO}_2$  katalizör üzerinde  $\text{O}_2$  ile tepkiyerek  $\text{CuSO}_4$  oluşturmakta,  $\text{NO}_x$  eklenen  $\text{NH}_3$  ile giderilebilmekte ve  $\text{CuSO}_4$ 'in tekrar  $\text{CuO}$  olarak geri kazanımı  $\text{H}_2$  ile sağlanmaktadır (Kaytakoğlu, 1991).



Şekil 2.8. Buhar üreten tesislerde  $\text{NO}_x$  giderimi (Kaytakoğlu, 1991).  
(Rakamlar, °C cinsinden gaz sıcaklığını belirtmektedir).

### b) Seçimli Olmayan Katalitik İndirgeme (NSCR)

Bu metot ilk olarak Federal Almanya' da geliştirilmiştir. Burada kısmen soğuk olan alev bölgesinin dışında,  $\text{NO}_x$ ' in genellikle indirgenen maddeler olarak beslenen hidrokarbonlar ( $\text{CH}_4$ ) ve fazla oksijenle yaklaşık 450 °C' de birleşmesi sağlanır.  $\text{SO}_2$  ise ikinci bir katalizörle yaklaşık 400 °C' de  $\text{SO}_3$ ' e oksitlenerek  $\text{H}_2\text{SO}_4$  olarak uzaklaştırılmaktadır. Bu metotun ikinci bir kullanım şekli ise, oksijence fakir atık gazdaki  $\text{NO}_x$  ve  $\text{SO}_2$ ' in soy metal oksit katalizörleri ile  $\text{N}_2$  ve  $\text{H}_2\text{S}$  verecek şekilde indirgenmesidir. Oksijence fakir atık gazda yüksek sıcaklıkta korozyonun artması ve indirgenen maddenin

çok miktarda kullanımı nedeniyle yüksek maliyet, dezavantaj olarak sayılabilir (Kaytakoğlu,1991; Necker, 1985).

### c) Seçimli Katalitik Olmayan İndirgeme (SNCR)

Katalitik ve katalitik olmayan NO<sub>x</sub> indirgenmesi Eşitlik 2.38'deki toplam tepkimeyle ayırdedilebilir (Weber, 1987). Isıl NO<sub>x</sub> giderme metodu olarak da bilinen seçimli katalitik olmayan indirgeme teknolojisinde (Exxon metodu) NO<sub>x</sub> yaklaşık 850-1050 °C sıcaklıkta yanma sisteminin üst kısmına beslenen NH<sub>3</sub> ve kompleks radikal mekanizma yardımıyla N<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O şeklinde indirgenebilmektedir. Toplam tepkime eşitlikleri aşağıdaki gibi verilebilir.



Bu metot, az yatırım ve düşük işletim maliyetleri nedeniyle avantajlı olup, mevcut tesisler için çok az bir teknik değişiklik gerektirmektedir. Düşük NO<sub>x</sub> giderim verimi yanında stokiyometrik değer üzerinde NH<sub>3</sub> beslemesi gerektiği için yüksek miktarda NH<sub>3</sub> atımının (20-30 ppm) söz konusu olması ise bir dezavantajdır. Prosesin kompleks tepkime mekanizması ile ilerleyişi, atık gaz ve NH<sub>3</sub>' in giderme sisteminin yüksek sıcaklıklarındaki uygun kalış süresinin ayarlanmasını zorlaştırmaktadır. Ayrıca bu yöntem, kömürün yakılması gibi yüksek miktarda toz yayan sistemlerde, NH<sub>3</sub>' in uçucu külde adsorplanması ve tepkimeye girmemiş bu NH<sub>3</sub>' in oksidasyonu ve korozif amonyum tuzları oluşturması nedeniyle uygun değildir (Kaytakoğlu,1991).

### d) Adsorpsiyon

Mitsui Mining Co. (Japonya) aktif kömüre dayanan bir metot önermiş, bu metot, 1976' da Bergbau-Forschung, Federal Almanya tarafından geliştirilmiştir. Burada iki kolon söz konusu olup, önce SO<sub>2</sub> antrasit veya taş kömür tipi sert kömürden elde edilen aktif kömür ile doldurulmuş olan ilk kolonda adsorplanmaktadır. İkinci kolonda ise NO<sub>x</sub>



$\text{NH}_3$  ile katalitik olarak indirgenmektedir.

İlk kolonda  $\text{SO}_2$ 'nin tamamen tutulamaması nedeniyle ikinci kolona geçen  $\text{SO}_2$  ( $\text{SO}_2$  bulaşması), burada amonyum sülfat ve amonyum hidrojen sülfat oluşturmaktadır. Ayrıca bulaşan bu  $\text{SO}_2$  katalizörün etkinliğini de azaltmaktadır. Katalizör, 350-600 °C arasında ısıl olarak yenilenebilmekte ve yenilenme işlemi sırasında hacimce % 20-30  $\text{SO}_2$  içeren gaz elde edilmekte ve bu gaz kükürt ve sülfürik asit üretiminde kullanılmaktadır (Kaytakoğlu,1991). Kömür yakarak elektrik üreten bir tesiste (Voerde der Steag AG, Essen, BRD) bulunan bu yöntemin deneme niteliğindeki bir ünitesi başarılı olmuştur. Dezavantaj olarak ise adsorber için büyük bir yer gereksinimi ve  $\text{NO}_x$  giderimi tesislerindeki ciddi yangın tehlikesi sayılabilir (Kaytakoğlu,1991).

#### **e) Elektronla Işıma**

Yeni bir teknik olup ilk olarak Japonya' da geliştirilmiştir.  $\text{SO}_2$  ve  $\text{NO}_x$ 'in birlikte giderilmesinin amaçlandığı bu sistem, elektron ışmalı kuru yıkayıcı olarak da adlandırılabilir. Burada atık gaz, içerisindeki katı parçacıklardan arındırıldıktan sonra bir ısı değiştiricide veya su püskürtülerek 70-120 °C sıcaklık aralığına soğutulmakta, sonra  $\text{SO}_2$  ve  $\text{NO}_x$  miktarıyla orantılı olarak  $\text{NH}_3$  eklenmekte ve daha sonra bu karışım, reaktörde elektron ışımaya tabi tutulmaktadır. Atık gazda  $\text{NO}_x$ 'in  $\text{NH}_3$  ile giderimi,  $\text{SO}_2$  varlığında artmakta ve oldukça tatmin edici, birlikte  $\text{NO}_x$  ve  $\text{SO}_2$  giderimi elde edilebilmektedir. Katı ürünler daha sonra bir elektrikli filtre ile çöktürülmekte ve gübre olarak kullanılabilir. Şekil 2.9.'da bu yöntem basitleştirilmiş olarak verilmektedir. Buradan da görüldüğü gibi tepkimenin ilerleyişi üç aşamada olmaktadır.

- Azot ve oksijen iyonlarının oluşumu ve bunların  $\text{O}_2$  ve  $\text{H}_2\text{O}$  ile serbest radikallere dönüşümü
- $\text{SO}_2$  ve  $\text{NO}_2$ ' in suyun varlığında  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ve  $\text{HNO}_3$  ' e oksidasyonu, bu asitlerin  $\text{NH}_3$  ile nötralizasyonu ve ticari nitelikte sayılabilecek  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  ve  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  oluşumu şeklinde sıralanabilir (Kaytakoğlu,1991).

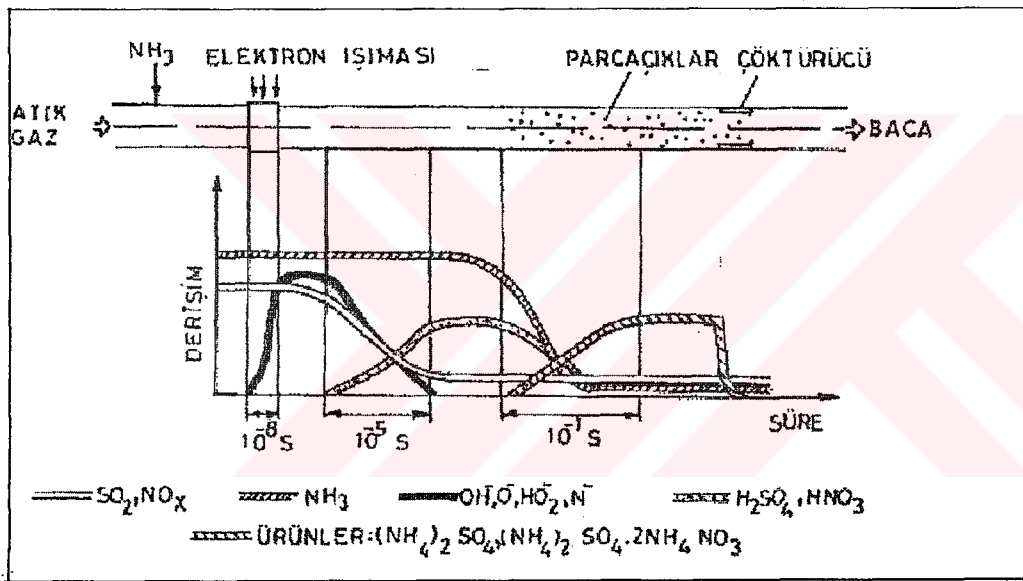
Bu yöntemin pilot ölçekteki uygulama üniteleri, Atom Araştırma Merkezi,



Karlsruhe ve Badenwerk AG, Karlsruhe, BRD tesislerinde bulunmaktadır (Kaytaoğlu,1991; Baumann et.al., 1985).

### f) Katı-gaz tepkimeleri

Bu yöntemde, SO<sub>2</sub> giderimine benzer şekilde, NO<sub>x</sub>'in akışkan yatak türü yakma sistemlerinde veya reaktörlerde, akışkanlaştırılmış katı maddelerle (CaO, CaCO<sub>3</sub>,Ca(OH)<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> gibi) tepkiyerek giderilmesi sağlanabilmektedir.



Şekil 2.9. Elektronla ışınım ve ürün oluşumu (Kaytaoğlu,1991; Baumann et al.,1985).

Bu amaçla laboratuvar ölçekteki akışkan yatakta, atmosferik basınç ve 300-450 °C sıcaklık aralığında yapılan çalışmalarda NO<sub>x</sub> 'in CaO ile gideriminde yaklaşık % 10-15 giderme verimi elde edilmiştir. Bu sonuç NO<sub>x</sub> ile CaO' in tepkimesinin CO<sub>2</sub>-CaO ve SO<sub>2</sub>-CaO arasındaki tepkimelere nazaran çok daha yavaş olduğu şeklinde yorumlanmıştır (Kaytaoğlu,1991; Kaytaoğlu et al., 1989).

### 2.2.2.2. Islak yöntemler

Islak yöntemler, genellikle küçük NO<sub>x</sub> kaynaklarına uygulanan katalitik olmayan sistemlerdir. Islak yöntemler, kademeli, dolgulu veya püskürtmeli kolonlarda kimyasal yıkama olarak da adlandırılabilir ve aynı anda SO<sub>2</sub> ve NO<sub>x</sub>' in giderilebilmesi bir avantaj olarak sayılabilmektedir. Bununla beraber ıslak sistemlerin

- Suda çok az çözünen NO' in absorplanmadan önce oldukça pahalı olan yöntemlerle oksidasyonu
- Absorpsiyon esnasında NO<sub>2</sub> ve NO<sub>3</sub> gibi çevre kirliliğini artırıcı istenmeyen yan ürünlerin oluşumu şeklinde iki ciddi dezavantajı söz konusudur.

Islak yöntemler, kademeli, dolgulu veya püskürtmeli kolonlarda gaz fazdaki NO' in sulu ortamda az çözünürlüğünden kaynaklanan absorpsiyon problemleri de gözönünde bulundurularak, kuru metotlara benzer şekilde gruplandırılabilir.

#### *a) Gaz fazda oksidasyon, absorpsiyon*

Bu yöntemde NO, gaz fazında, ilave edilen O<sub>3</sub> ve ClO<sub>2</sub> ile aşağıda verilen tepkime eşitliklerinde de görüldüğü gibi çözünürlüğü daha fazla olan NO<sub>2</sub>' e oksitlenmekte ve sonra NaOH, NH<sub>3</sub>' in sulu çözeltisi ve CaO, CaO/CaCO<sub>3</sub>' in sulu süspansiyonlarında absorplanmaktadır (Kaytakoğlu, 1991).

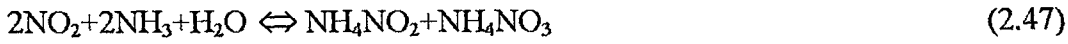


#### *b) Gaz fazda oksidasyon, absorpsiyon, indirgeme*

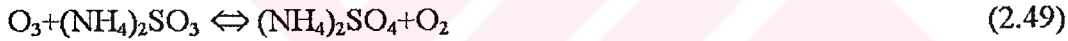
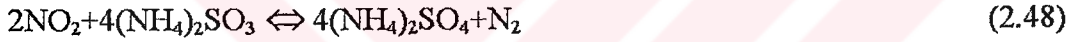
Geliştirilmiş Walther metodu olarak da bilinen bu yöntemin başarısı, uygulamada sulu amonyak çözeltilerinin kullanıldığı üç basamaklı yıkayıcılarla kanıtlanmıştır (Kaytakoğlu, 1991; Westermann, 1988; Schrod et al., 1985). Bu metot üç yıkama aşaması içermektedir. İlk aşamada, tozlarından arındırılmış atık gaz, aktifleştirilmiş (NH<sub>4</sub>)SO<sub>3</sub> çözeltisi ile (pH=6) yıkanarak SO<sub>2</sub> giderilebilir.



İkinci aşama sırasında  $\text{SO}_2$ ' den arındırılmış atık gaz,  $\text{O}_3$ 'la tepkimeye sokulur ve böylece NO'nin tamamına yakınının  $\text{NO}_2$ 'ye yükseltgenmesi sağlanır. Oluşan  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NH}_3$  içeren çözelti ile aşağıda görüldüğü gibi tepkimeye girerek absorplanır.



Üçüncü aşamada ilk yıkayıcıdan alınan çözelti ile, ikinci aşamayı terkeden gaz içerisindeki tutulamayan  $\text{NO}_2$  ve  $\text{O}_3$ 'ün giderilebilmesi için tekrar yıkanır (Kaytakoğlu, 1991; Bosch and Janssen, 1988).



### c) *Absorpsiyon, sıvı fazda oksidasyon*

Bu metot  $\text{NO}_x$ ' in, sıvı fazda,  $\text{KMnO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  veya  $\text{NaClO}_2$  ilavesiyle oksidasyonu esasına dayanmaktadır. Ciba-Geigy metodu olarak bilinen bu metotda, bir tepkime kolonunda, nitrosil sülfürik asit üzerinde ikinci basamak olarak, % 60-70 lik sülfürik asit ayrılmış ve % 30-50 lik  $\text{HNO}_3$ ' ten optimal bir  $\text{NO}/\text{NO}_2$  oranının elde edilmesi, uygun miktarda  $\text{HNO}_3$  ilavesiyle ayarlanmıştır (Kaytakoğlu, 1991).

### d) *Absorpsiyon, indirgeme*

Bu metotda  $\text{NO}_x$  ve  $\text{SO}_2$ , Fe(II) etilen diamin tetraasetat (EDTA) içeren sulu çözeltilerde absorplanabilmekte ve NO, uygun miktarlarda eklenen sülfid veya dithionit ile  $\text{N}_2$ 'e indirgenmektedir. Saarberg-Hölter-Lurgi, Saarve-Gladbeck-Frankfurt, BRD şirketleri tarafından daha da geliştirilen bu metotda 40-50 °C sıcaklık aralığına soğutulmuş ve içerdiği tozdan arındırılmış atık gaz Fe(II)EDTA ve  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  içeren absorplayicilerle yıkanmaktadır (Kaytakoğlu, 1991). NO, Fe(II)EDTA ile bir nitrosil kompleks

oluşturmakta ve bu suretle sulu çözeltilerde çözünürlüğü iyi olmayan NO'nun kütle aktarımında olumlu bir artış gözlenebilmekte ve  $SO_2/NO_x \geq 3$  olması halinde yaklaşık %70  $NO_x$  giderimi elde edilebilmektedir (Kaytakoğlu,1991).



Tepkimenin ikinci basamağında nitrosil kompleks,  $HSO_3^-/SO_3^{2-}$  iyonlarının etkisiyle asıl istenen bileşenler olan  $N_2$  ve  $Na_2SO_4$ 'e dönüşmektedir.



Pratikte, NO'nun, böyle bir ortamdaki absorpsiyonunun bu şekilde ilerleyişinde bir çok zorlukla karşılaşmış ve aşağıda sıralanan pek çok değişik yan ürün elde edilmiştir (Kaytakoğlu,1991; Gestrich, 1989):

- Sülfitin, fazla oksijenle sülfat ve dithionata oksidasyonu
- Fe(II)EDTA'in fazla oksijenle Fe(III)EDTA kompleksine oksidasyonu
- NO' in azot ve kükürtlü bileşiklere veya  $N_2O$ ' e indirgenmesi

Chang (1986), nitrit iyonunun sülfid ve hidrojen sülfid ile indirgenmesinde sekiz değişik ara ürün tesbit etmiştir. Bu ürünler nitrosil sulfonik asit ( $HO_3SNO$ ), hidroksil amin di sulfonik asit ( $(HO_3S)_2NOH$ ), amino trisulfonik asit ( $(HO_3S)_3N$ ), altnitrik asit ( $H_2N_2O_2$ ), hidroksil amin mono sulfonik asit ( $(HO_3S)NHOH$ ), amino di sulfonik asit ( $NH(HSO_3)_2$ ), hidroksil amin ( $NH_2OH$ ), amino mono sulfonik asit ( $(NH_2)HSO_3$ ) dir (Kaytakoğlu,1991; Chang, 1986).

Bu yöntemde atıksu sorunu sözkonusu olup, EDTA'nın topraktaki ağır metallere aktif etkisi de gözönünde bulundurulmalıdır. Absorbentlerin bu tarzda oksitlenmesi durumunda, etkileri çok azalmakta ve böylece oksitlenmiş bu tepkiyenlerin indirgenerek tekrar aktifleştirilmeleri sözkonusu olmaktadır. Bu amaçla yükseltgenmesi gerekli bu tepkiyenlerin elektrolitik olarak indirgenmesine alternatif olarak  $NaHSO_3$  veya  $Na_2S_2O_4$  ile kimyasal indirgenmesi tercih edilmektedir (Kaytakoğlu,1991).



Islak yöntemlerin kuru yöntemlere göre bilinen dezavantajları ise tesislerin ve işletme masraflarının büyüklüğü olup elde edilen ürünlerin yenilenmesi veya değerlendirilmesi de çoğunlukla kolay olmamaktadır. Bu yöntemlerle şimdiye kadar maksimum % 70 NO<sub>x</sub> giderimine ulaşılabilmektedir. Absorpsiyon indirgeme yöntemi iyi bilinen ve karşılaştırıldığında nispeten kolay uygulanabilen teknikler ve az masraf gerektiren SO<sub>2</sub> giderimi yöntemiyle birleştirilerek cazip hale getirilebilir. Böyle bir durumda NO<sub>x</sub> ve SO<sub>2</sub> giderimi yanında HCl, H<sub>2</sub>S ve ağır metal aerosollerinin de giderimi sözkonusu olabilir. NO<sub>x</sub> ve SO<sub>2</sub>' in birlikte giderildiği ıslak sistemler, gaz fazdaki toz parçacıklarından nispeten az miktarda etkilenmektedir. Tüm ıslak sistemlerin ortak özelliklerinden biri, sıvı fazda NO<sub>2</sub><sup>-</sup> oluşumu, seçimli katalitik indirgeme yöntemlerinin ise açığa çıkan değişik miktardaki N<sub>2</sub>O oluşumudur. Bilindiği gibi NO kaynağı olarak da kabul edilen N<sub>2</sub>O, kendi tepkime yeteneğine bağlı olarak, atmosferin yüksek tabakalarında O<sub>3</sub>' la tepkimeye girip NO oluşturabilmektedir (Kaytakoğlu, 1991).

### 3. GAZ ABSORPSİYONU

#### 3.1. Genel Tanım

Bir gaz karışımını uygun bir sıvı faz ile temas ettirerek, bu faz karışımında bulunan bir veya daha fazla sayıda bileşenin tercihli olarak ayrılması işlemi gaz absorpsiyonu olarak bilinir. Bir diğer deyişle, çözünebilir bir gazın, bir inert gaz ile yaptığı karışımdan, çözünen gazın içerisinde çözünebildiği bir sıvı yardımıyla alınmasıdır. Gaz absorpsiyonu, absorpsiyon veya desorpsiyon olarak bilinen kütle transfer işlemleriyle ilgilidir. Amonyak-hava karışımından, amonyağın sıvı su vasıtasıyla yıkanması buna tipik bir örnektir (Treybal, 1981; Çataltaş, 1973; Gülbaran, 1984).

#### 3.1.1. İdeal çözeltiler

İdeallik, madde moleküllerinin boyut, yapı ve kimyasal karakter olarak benzerliğini gerektirir. Gerçekte ideal çözeltiler yoktur. Gerçek karışımlar ancak sınırdaki ideallığa yaklaşır. İdeal çözeltileri tanımlayan dört önemli özellik şöyle özetlenebilir (Treybal, 1981; Ünal, 1985):

- 1) Karışma olayı (mixing), çözeltideki moleküller arası ortalama çekme ve itme kuvvetlerini etkilemez.
- 2) Çözeltinin hacmi, derişim (mol kesri) ile doğrusal olarak değişir (Amagat kanunu).
- 3) Maddelerin karışması sırasında ısı absorplanması veya ısı açığa çıkışı olmaz. Ancak, gazların sıvılarda absorpsiyonu için bu koşul, gazın yoğunlaşma ısısını içermez.
- 4) Çözeltinin toplam buhar basıncı, derişim (mol kesri) ile doğru orantılıdır.

İdeal bir sıvı çözeltisi ile dengede bulunan bir gaz karışımı, ideal gaz kanununa uyuyorsa, çözünen gazın kısmi basıncı ( $P$ ), aynı sıcaklıktaki buhar basıncı ( $P_0$ ) ile çözeltideki mol kesrinin ( $x$ ) çarpımına eşit olur (Rault kanunu).

$$P = x.P_0 \quad (3.1)$$

İdeal gaz kanununun uygulanabileceği sınırın üzerindeki toplam basınç değerlerinde çalışıldığında, basınç terimi yerine fugasiteler alınarak aynı kanun uygulanabilir (Lewis-Randall kanunu).

Böylece sıvı fazın ideal varsayılabildiği hallerde, bir gazın denge kısmi basıncı, deneysel işleme gerek olmadan, yalnız çözelti özelliklerinden yararlanarak hesaplanabilir.

### 3.1.2. İdeal olmayan sıvı çözeltileri

İdeal olmayan çözeltilerde, çözünen maddenin sıvıdaki derişiminin yüksek ( $x \approx 1$ ) olmadığı hallerde 3.1 bağıntısı hatalı sonuç verir. Bu durumda, sıvı faz ile dengedeki çözünen gazın kısmi basıncı, Henry kanunu ile ifade edilir. Henry sabiti (H), özellikle sıcaklığın bir fonksiyonudur (Ünal, 1985; Treybal, 1981; Gerrard, 1980).

$$P = x.H \quad (3.2)$$

Gaz fazın ideal olmaması ve sıvı faz ile kimyasal etkileşmesi veya elektrolitik ayrışma (dissociation), sıvı çözeltilerde geniş bir derişim aralığında Henry kanunundan sapmaya neden olur. Gazların çoğu 5 atmosfer basınca kadar Henry kanununa uyar. Çözünürlüğün düşük olduğu hallerde ( $x \approx 0$ ) (hidrojen-su sistemi) aynı kanun 34 atmosfere kadar uygulanabilir. Sıvıda kimyasal etkileşme olmadıkça, kritik sıcaklığın altında (buhar halinde) ve doyumluk değerinin yaklaşık % 50'sine kadar olan basınçlarda, gazlar Henry kanununu izler (Ünal, 1985; Treybal, 1981).

### 3.1.3. Absorpsiyon sistemlerinde termodinamik denge ilişkileri

Absorpsiyon sistemlerinde, öncelikle denge verilerine, (P-X) veya (X-Y) bağıntısına gerek duyulur. Dengedeki sistemlerde, gaz fazındaki kısmi basınçlar sistemin ideal oluşuna, sıcaklık ve toplam basınca bağlı olarak değişir (Ünal, 1985).



Gaz fazın ve bu fazla dengedeki sıvı çözeltilinin ideal davrandığı sistemlerde, bir gaz bileşenin kısmi basıncı, Dalton kanunu ( $P = y.P_t$ ) yardımı ile gaz fazın özellikleri cinsinden veya Rault kanunu yardımı ile sıvı fazın özellikleri cinsinden ifade edilebilir. Sıvı ile dengedeki bir gaz fazın çözünen bileşenin kısmi basıncı ise benzer şekilde, gaz fazın ideal olduğu ve Henry kanununun uygulanabildiği sistemlerde, Dalton kanunu yardımı ile gaz fazın özellikleri cinsinden veya Henry kanunu yardımı ile sıvı faz özellikleri cinsinden bulunan kısmi basınç değerleri eşit olduğundan dolayı aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$y = \left(\frac{H}{P_t}\right) \cdot x = m \cdot x \quad (3.3)$$

Bu bağıntılar yardımı ile gaz bileşenin sıvıdaki çözünürlüğü ve ayrıca sistem sıcaklığının ve basıncının bir fonksiyonu olarak istenen denge eğrileri elde edilebilir.

#### 3.1.4. Gaz çözünürlüğü

Bir gaz, uçucu olmayan bir sıvı ile sistem sıcaklığı ve basıncında dengeye geldiği an çözünen gazın sıvıdaki derişimi ( $x$ ), gaz çözünürlüğü olarak bilinir. Her bir gaz sıvı sistemi için genellikle deneysel olarak bulunması gerekengaz çözünürlüğünün, absorpsiyon hızını artırması ve gerekli çözücü miktarını azaltması açısından yüksek olması istenir.

Sistemin ideallik derecesine bağlı olarak, çözünürlük sistem basıncı ve sıcaklığı ve seçilen çözücü ile değişebilir. Verilen bir sıvı derişimi için çözünen bileşenin gaz fazındaki denge basıncı o gazın çözünürlüğünün bir ölçüsüdür. Sabit sıcaklıkta çözünürlük, sistem basıncı ile değişir. Yeterli basınç uygulandığında gazın yoğunlaşarak sıvı faza tamamen çözünmesi mümkündür (Gerrard, 1980; Ünal, 1985).

Gaz çözünürlüğü, Van't Hoff prensibi uyarınca, sıcaklıkla da değişir. Bir gazın çözünmesi sonucu genellikle ısı açığa çıktığından, dengedeki bir sistemin sıcaklığı artırıldığında gazın çözünürlüğü azalır. Diğer yandan hidrojen, oksijen, azot ve metan gibi

düşük molekül ağırlıklı birçok gazın sudaki çözünürlüğü, 100°C sıcaklığın ve atmosfer basıncının üzerinde, sıcaklık artışı ile artar (Treybal, 1981; Ünal, 1985).

Tek bir gaz yerine bir gaz karışımının sıvı ile dengeye getirildiği bazı özel hallerde (denge, gaz karışımı için kısmi basınçlar cinsinden ifade edilebildiği sürece) her bir gazın denge çözünürlüğü, diğer gazların varlığından bağımsız olacaktır.

Çözünürlüğün yüksek olması için öncelikle, çözünenin kimyasal yapısının çözücüye benzer olması araştırılır. Oluşan çözeltinin ideal olduğu hallerde, mol kesirleri cinsinden gaz çözünürlüğü, çözücüye bağlı değildir. Bu durumda, bir gazın herhangi bir çözücü içeren ideal bir çözeltideki çözünürlüğü her zaman aynıdır ve çözücü sıvının yapısı çözeltinin ideallikini belirlemekten başka bir etki yapmaz.

Ancak, çözünürlük ağırlık kesirleri cinsinden ifade edilirse, düşük molekül ağırlıklı çözücüler için daha yüksek çözünürlük değerleri elde edilir. Bu durumda, düşük molekül ağırlıklı çözücülerin kullanılması gerektiği açıktır.

Çözücü ile çözünen arasındaki kimyasal tepkime, gaz çözünürlüğünün artmasına neden olmakla beraber, çözücünün yeniden kullanılmak üzere geri kazanılabilmesi, bu tepkimenin tersinir olması ile mümkündür. İdeal olmayan çözeltilerde gaz çözünürlüğü, sıvıda uçucu olmayan bir bileşenin (sulu tuz çözeltisi gibi) varlığı ile de etkilenebilir.

### 3.1.5. Çözücü seçimi

Absorpsiyon işlemlerinde amaç, özel bir çözelti elde etmek ise, çözücü, ürünün yapısına bağlı olarak seçilmelidir. Amaç, bir gaz karışımından bazı bileşenlerin giderilmesi ise çözücüde belirli özellikler aranır. Bu özellikler arasında, gazın çözünürlüğü, çözücünün uçuculuğu ve korozyon etkisi, maliyeti, vizkozitesi ve sağlığa zararlı etkileri, tutuşabilirliği, kimyasal açıdan kararlı oluşu ve düşük donma noktasına sahip oluşu gibi diğer faktörler sayılabilir (Treybal, 1981; Ünal, 1985).

Uçuculuk yönünden bir absorpsiyon işlemini terk eden gaz, genellikle çözücüsü ile doymuş olduğundan, bu yolla oluşacak çözücü kayıplarını önlemek üzere, düşük buhar basıncına sahip çözücüler kullanılmalıdır. Gerekirse, daha az uçucu olan bir ikinci sıvı, buharlaşan sıvının geri kazanılmasında kullanılabilir.

Çözücünün korozyon etkisinden dolayı, kolay bulunamayan ve pahalı yapı malzemelerin seçimi gerekebilir.

Çözücünün kolay ve ucuz bulunabilir olması, kayıpların yüksek maliyete neden olması açısından da önemlidir. Bu yönden, su en sık kullanılan genel bir absorpsiyon sıvısıdır.

Ayrıca, yüksek absorpsiyon hızları sağlamak, absorpsiyon kolonunun taşıma karakteristiklerini iyileştirmek ve iyi bir ısı aktarımı sağlamak için çözücü vizkozitesinin düşük olması istenir (Ünal, 1985).

### **3.2. Absorpsiyonda Kullanılan Cihazlar ve Özellikleri**

#### **3.2.1. Kademeli gaz absorpsiyonu kolonları**

Gaz absorpsiyonunda sıvı ve gazın kademeli olarak teması için kullanılan tipik cihazlar kampana raflı ve delikli raflı kolonlardır (Şekil 3.1).

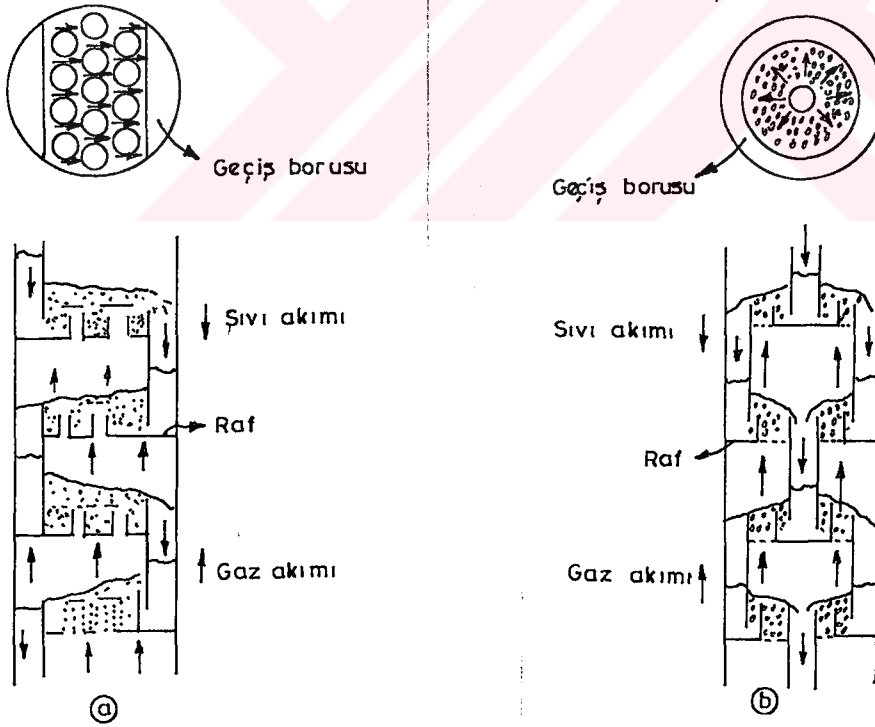
Kolonlar silindirik yapıdadırlar. Ceket (yüzey) kısmı, kullanılan sıvı-gaz akımı özelliklerine göre cam, plastik, tahta veya genellikle metalden yapılmıştır. Kolon çapı 1 metreden 9-10 metreye kadar olabilir. Raflar ise kullanılan akımlar tarafından korozyona uğramayacak metal veya alaşımlardan yapılabilir. Bu raflar çoğunlukla dairesel olup, çapları 1-2 cm'den 8-9 cm'ye kadar değişebilir.

Kampana raflı kolonlardaki sıvı akımı, raf üzerinde rafın bir ucundan diğer ucuna doğru akar. Bir raftan diğer rafa geçiş ise geçiş borusu yardımıyla olmaktadır. Kolondaki

gaz veya buhar akımı raflar arasından yukarıya doğru hareket ederek sıvı içinde dağılıma uğrarlar (Çataltaş,1973; Gözoğul ve Kaytakoğlu, 1986; Düzcesoy ve Kara, 1992).

Delikli raflı kolonlarda ise gaz, raf üzerindeki deliklerden yukarı doğru sıvı içinde ince kabarcıklar halinde dağılır. Sıvı akımı, raf üzerinde bir uçtan diğer uca yani merkezden kenarlara doğru akarak yarıçap doğrultusunda geçiş borusu ile alttaki rafa dökülür. Bir alttaki rafın sıvısının akış yönü kenardan merkeze doğrudur.

Kampana raflı ve delikli raflı kolonlarda bir raf bir kademeye karşılık gelir. Bu tip kolonlarda aranan özellik kademelerin etkinliğidir. Kademe etkinliği raf üzerindeki sıvının akış karakteristiklerine ve ayrılan maddenin transfer özelliklerine bağlıdır. Kampana başlıklı raflarda disk ve halka tipli akış, delikli raflarda ise çapraz akım tercih edilmektedir (Çataltaş,1973; Gözoğul ve Kaytakoğlu, 1986; Düzcesoy ve Kara, 1992).



Şekil 3.1. a) Kampana raflı, b) delikli raflı kolonların şematik görünüşü  
(Düzcesoy ve Kara, 1992).

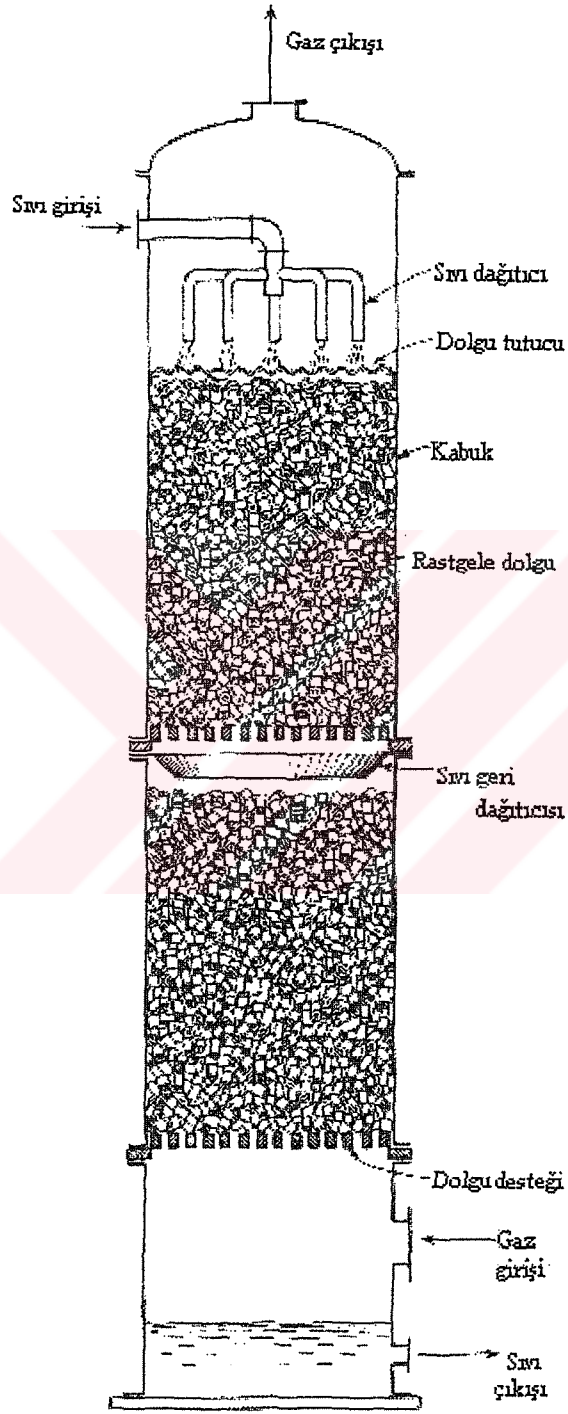
### 3.2.2. Dolgulu gaz absorpsiyonu kolonları ve dolgu maddeleri

Günümüzde dolgulu kolonlar kademeli kolonlardan daha fazla kullanılmaktadır. Çünkü kademeli kolonlar içerdikleri raflar ve rafların arasından geçişi sağlayan bağlantılar nedeniyle teknik ve ekonomik sorunlar yaratırlar. Absorpsiyon işlemlerinde kullanılan maddeler asidik veya bazik karakterlidirler. Bu nedenle kullanılan kolonun yapısı ve diğer malzemelerin seçimi çok iyi yapılmalıdır. Kolonlara ait özelliklerin bilinmesi de önemlidir (Şekil 3.2.) (Düzcesoy ve Kara, 1992).

#### 3.2.2.1. Dolgulu kolonların dizaynı

Gaz absorpsiyonunda ve diğer bazı işlemlerde kullanılan bir cihaz Şekil 3.2'de örnek olarak gösterilen, dolgulu bir kolondur. Cihaz, tabanında gaz girişi ve dağılma aralığı ve sırasıyla taban ve tepesinde sıvı ve gaz çıkışları bulunan, inert katı maddeciklerle desteklenmiş bir kolonu içermektedir. Katı parçacıklar kolon dolgusu diye adlandırılırlar. Giriş sıvısı ya saf çözücü olabilir ya da zayıf çözücü diye isimlendirilen çözücü içerisinde çözünen seyreltik bir çözelti olabilir. Giriş sıvısı dağıtıcı ile kolonun tepesinden dağıtılır ve ideal bir işlemde, dolgu yüzeylerini düzgün olarak ıslatır. Çözünen madde içeren, zengin gaz, dolgu altından dağıtım aralığına girer ve sıvının akışına ters yönde, dolgu aralarından yukarı doğru akar. Dolgu, sıvı ve gaz arasında geniş bir temas yüzeyi sağlar ve fazlar arasında sıkı bir temas kurar. Zengin gazdaki çözünen madde, kolona giren taze sıvı tarafından absorplanır ve seyreltik gaz tepeden kolonu terkeder. Sıvı kolondan aşağıya aktıkça çözünen madde yönünden zenginleşir ve kuvvetli çözelti diye adlandırılan konsantre sıvı, kolonun tabanından, sıvı çıkışından kolonu terkeder.

Çeşitli kolon dolguları bulunmakta ve genel olarak bunların birkaç tipi kullanılmaktadır. Dolgular kolon içersine ya gelişigüzel olarak atılmıştır veya elle yığılmıştır. Keyfi dolgulamada birimlerin ana boyutları 6 ile 50 mm arasında olup daha çok küçük kolonlarda kullanılır. Elle yığma yapılan dolgularda, birimler 5 ile 20 cm büyüklüğünde olup, geniş kolonlarda kullanılır.

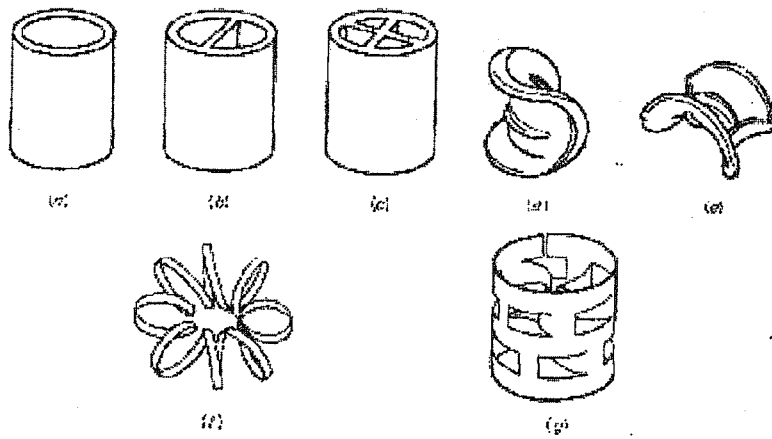


Şekil 3.2. Dolgulu kolon bileşenleri (Treybal, 1981).

Şekil 3.3.'de gösterilen halkalar ve eyerler gelişigüzel dolgulamaya örneklerdir. Spiral bölme halkaları elle yığılırlar. 5 ve 7.5 cm çapındaki geniş Raschig halkaları sık olarak elle yığma tipi dolgularda kullanılır (Gülbaran, 1981; McCabe and Smith, 1976). Absorpsiyon kolonunda kullanılan dolgu maddelerinde aranan özellikler,

- 1) Malzemelerin birim hacminin aktif yüzeyi büyük olmalıdır.
- 2) Malzemelerin birim hacminin ağırlığı az olmalıdır.
- 3) Malzemelerin serbest kesit alanı büyük olmalıdır.
- 4) Malzemelerin serbest hacmi büyük olmalıdır.
- 5) Dolgu maddesi tarafından tutulan sıvı ağırlığı az olmalıdır.
- 6) Kullanılan malzemeler ucuz ve mekanik olarak sağlam olmalıdır.
- 7) Temas ettiği sıvı-gaz akımlarıyla reaksiyon vermemelidir.

Dolgu maddeleri olarak ; kırılmış tahta parçaları, kırılmış taş parçaları, kok kömürü parçaları, topraktan yapılmış bazı malzemeler, özel olarak şekillendirilmiş Raschig halkaları, Berl eyerleri, Lessing halkaları, spiral halkalar ve bölmeli halkalar gibi malzemeler kullanılabilir (Çataltaş,1973; Gözoğul ve Kaytakoğlu, 1986; Kara ve Düzcesoy, 1992).



Şekil 3.3. Bazı dolgu maddesi tipleri (a) Raschig halkaları, (b) Lessing halkası, (c) Bölmeli halka, (d) Berl eyeri, (e) Intalox eyeri, (f) Tellerette, (g) Pall halkası (Treybal, 1981).



### 3.2.2.2. Sıvı ve gaz arasındaki temas

Sıvı ve gaz arasında iyi bir temas isteği, bilhassa geniş kolonlarda karşılaşılması güç bir iştir. İdeal durumda, sıvı, dolgulamanın tepesinde bir kere dağıtıldığında, kolondan aşağı doğru, bütün dolgulama yüzeyi üzerinde ince film halinde akar. Gerçekte, film bazı yerlerde kalınlaşır, bazı yerlerde inceler ve böylece küçük çaylar halinde toplanarak dolgulama içinden tayin edilmiş yol boyunca akar. Bilhassa düşük hızlı sıvılarda, dolgulama yüzeyi kuru olabilir veya durgun bir sıvı filmi tarafından kaplanmış olabilir. Bu etki kanalize olma diye bilinir. Bu da geniş dolgulu kolonların zayıf performansı için ana sebeptir.

Kanalize olma dolgulamanın yığma şeklinde yapıldığı kolonlarda çok şiddetlidir. Ezilmiş katılarda yapılan keyfi dolgulamada bu etki daha az şiddetli ve düzgün halka birimleriyle yapılan keyfi dolgulamada ise en az şiddettedir. Orta büyüklükteki kolonlarda, kanalize olma, kolon çapının, en azından, dolgu çapının sekiz katı yapılmasıyla minimuma indirilebilir. Eğer kolon çapının dolgu çapına oranı 8:1'den az ise sıvı dolgulamanın dışına ve kolon duvarlarından aşağıya akmaya başlar. Bu isteği karşılayacak dolgularla doldurulmuş küçük kolonlarda bile, sıvı dağılımı ve kanalize olma, kolon performansında büyük bir etkiye sahiptir. Geniş dolgular ile doldurulmuş uzun kolonlarda, kanalize olma etkisi fazla olup, dolgulu kısmın her 3 veya 4.5 m.'sinde sıvı için yeniden dağıtım sistemleri konmuştur.

Düşük sıvı hızlarında, ilk sıvı dağıtım gözonüne alınmaksızın, dolgu yüzeyinin çoğu akan sıvı tarafından ıslatılmaz. Sıvı hızı arttıkça, dolgu yüzeyinin ıslanmış kısmı da artacaktır. Genellikle yüksek olan kritik sıvı hızına ulaşıldığında, bütün dolgu yüzeyleri ıslanmış ve etkili olacaktır. Kritik hızdan yüksek sıvı hızlarında, kanalize olma etkisi önemli değildir (McCabe and Smith, 1976).

### 3.2.2.3. Sınırlanan akış hızları; yükleme ve taşma

Verilen bir dolguyu içeren ve içerisinde belirli bir sıvı akışı bulunan bir kolonda, gaz akış hızı için bir üst limit vardır. Bu limite karşılık gelen gaz hızına taşma hızı denir.





Çizelge 3.1. (Devam)

Dolgu maddeleri	Nominal (Anma) büyüklük, mm (in)										
	6 (½)	9.5 (¾)	13 (½)	16 (¾)	19 (½)	25 (1)	32 (1½)	38 (1½)	50 (2)	76 (3)	89 (3½)
Berl eyerleri											
Seramik											
$C_f$	900		240		170	110		65	45		
$C_D$			508		295	184					
$e$	0.50		0.63		0.65	0.69		0.75	0.72		
$q_p, m^2/m^3 (ft^2/ft^3)$	899 (274)		466 (142)		269 (82)	249 (76)		144 (44)	105 (32)		
İntaloğ eyerleri											
Seramik											
$C_f$	725	330	200		145	98		52	40	22	
$C_D$			399		256	241.5		96.2	71.3	40.6	
$e$	0.75		0.78		0.77	0.775		0.81	0.79		
$q_p, m^2/m^3 (ft^2/ft^3)$	984 (300)		623 (190)		335 (102)	256 (78)		195 (59.5)	118 (36)		
Plastik											
$C_f$						33			21	16	
$C_D$						96.7			56.5	30.1	
$e$						0.91			0.93	0.94	
$q_p, m^2/m^3 (ft^2/ft^3)$						207 (63)			108 (33)	89 (27)	

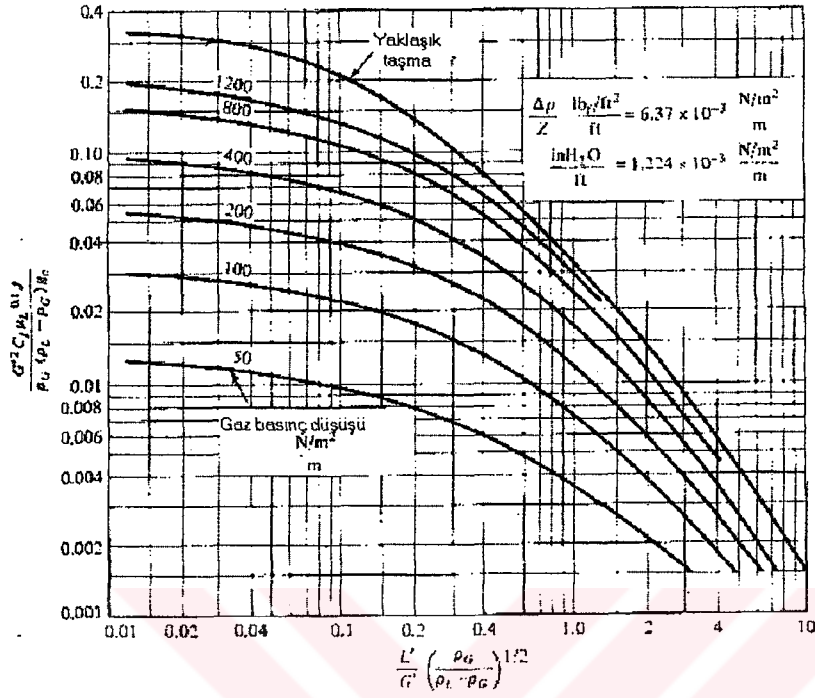
#### 3.2.2.4. Dolguolu kolonlarda basınç düşmesi

Dolguolu bir kolonda basınç düşüşü Şekil 3.4'de gösterildiği gibi hem gaz hem de sıvı akış hızları ile ilişkilidir. Dolguolu kolon içerisindeki gazın akışı genellikle türbülenttir; sonuç olarak, türbülent akış basınç düşüşü eşitliğinde olduğu gibi C eğrisinin eğimi yaklaşık 2 dir. Sabit bir gaz hızı için, Şekil 3.4'deki G doğrusundaki gibi sıvı hızının artması ile basınç düşüşü artar. Dolgu maddesinin her bir türü sıvı geçişi için sabit bir boşluk hacmine sahiptir ve sıvı hızı arttığı zaman boşluklar sıvı ile dolar, böylece gaz akışı için kesit alanı azalmış olur.

Rastgele doldurmanın doğası gereği, kolonda sayısız genişleme ve daralma kayıpları vardır ve her bir katı dolgu maddesi etrafında iki akışkanın (gaz-sıvı) akımı ile önemli ölçüde türbülans meydana gelir. Basınç düşüşü, yüzey sürtünmesi ve daha yüksek hızlarda önemli olan şekil sürüklenmesinin bir bileşimidir. Isı ve kütle transfer yüzey katsayıları ve yüzey sürtünmesi arasında doğrudan bir ilişki vardır, öyle ki, yüzey sürtünmesi ile verilebilir toplam basınç düşüşünün yüksek bir yüzdesine sahip olmak avantajlıdır. Yüzey sürtünmesinin sonucundaki basınç düşüşünün %10'dan yukarı olmadığı tahmin edilmektedir (Foust, 1960).

Şekil 3.4'de görüldüğü gibi, sabit bir sıvı akış hızı doğrusunu (A) ve saydam bir kolonun kullanılması halinde eğri üzerindeki 1 noktasına kadar basınç düşüş özelliği kuru dolgununkine (C) tamamen benzerdir. Doğrunun bu kısmının eğimi kuru eğrininki gibi yaklaşık aynıdır, fakat basınç düşüşü daha büyüktür. Boşlukların sıvı tarafından doldurulması ve dalgalanmalar ile yüzeylerin pürüzlenmesi nedeniyle daha büyük basınç düşüşü olur. Sıvı birikiminin olmaması nedeniyle dolgu boyunca aşağıya doğru sıvı düzgün olarak akar. İşaret edilen basınç düşüşünün gaz hızındaki bir artış ile çok hızlı olarak artması 1 noktasında eğimdeki değişmeyi meydana getirir. Bu nokta, akış modelinde ya da özelliklerinde herhangi bir değişimin gözlenmesine izin vermek için yeterince farklı olmayabilir. Belki dolguolu kısımda tutulan sıvının miktarındaki bir artışı gözlemek için mümkün olabilir. Tutulan sıvı birikim olarak ifade edilebilir. 1 noktası yüklenme noktası olarak adlandırılır ve gaz hızı üzerinde basınç düşüşünün bağılılığının artması fazlar arasında önemli bir sürüklenme meydana getirir. 1 noktası geçildiği zaman,





Şekil 3.5. Dolgulu kolonlarda taşma hızları (Treybal, 1981).

Çizelge 3.2. Kolon dolguları için sabitler (Foust, 1972)

Tür	m	n
Raschig halkaları		
1/2 in	139	0.00720
1 in	32.1	0.00434
2 in	11.13	0.00295
Berl eyerleri		
1/2 in	60.4	0.00340
1 in	16.01	0.00295

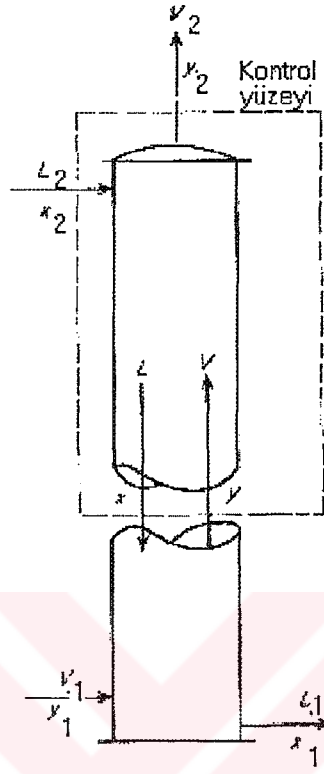
## 4. GAZ ABSORPLAYICI DOLGULU KOLON TASARIMI

### 4.1. Gaz Absorpsiyon Kolonlarında Temel Tasarım Bağlıntıları

Kütle transfer işlemleri kademeli kolonlarda ve dolgulu kolonlarda başarılı olmaktadır. Aşağıdaki gelişmeler yalnız dolgulu kolonlar için olup ilgilenilen cihazların iki türü arasında nitel bir karşılaştırma sözkonusudur.

- 1) Aynı akış hızları için, kademeli bir kolon içerisindeki basınç düşüşü dolgulu kolon içerisindekinden daha azdır.
- 2) Korozif kimyasal maddeler için dolgulu kolonların kademeli kolonlara göre birleştirilmesi daha kolay ve daha ucuz olur.
- 3) Kademeli kolonlara taşma olmaksızın elle daha büyük sıvı yüklenebilir.
- 4) Dolgulu bir kolonda sıvı birikimi kademeli kolona göre daha azdır.
- 5) Aynı durum için, kademeli kolonların ağırlığı dolgulu kolonlardan daha azdır.
- 6) Daha büyük çaplı dolgulu kolonlar sıvı dağıtımından dolayı yeterli değildir.
- 7) Kademeli kolonlar daha kolay temizlenir.

Kütle transfer işlemleri için kullanılan dolgulu kolonlarda kolon boyunca iki akışkan (sıvı-gaz) sürekli temas halindedir. Bu durum kademeli kolonlar ile zıtlık içindedir. Buraya iki akışkan birlikte girer, karışır ve sonra ayrılır; kademeyi terkeden iki akım yaklaşık dengededir; yaklaşma hızı hızlı olabilir. Sürekli temas halindeki cihazlarda, temas halindeki iki akım asla dengeye erişmez ve iki akımdaki varolan konsantrasyonların teması halindeki kütle transfer hızını belirleyen itici kuvvetleri tayin etmede fazlasıyla önemlidir. Kolon boyunca faz konsantrasyonları arasındaki ilişki işletme doğrusunu gösterir. Kademe işlemlerindeki gibi, işletme doğrusu kütle denkliği ile tayin edilir, fakat işletme doğrusu üzerindeki her nokta kademe işlemlerinden farklı fiziksel anlama sahiptir. Kademe hesaplamaları için işletme doğrusu her bir kademedeki kademeye akım bileşimlerine göre önemlidir.



Şekil 4.1. Dolgulu kolon için kütle denklığı (McCabe and Smith, 1976).

Tüm kütle işlemleri için yazılan tasarım eşitliği eşmolar zıt yayınmada özelliğini vurgulamak üzere yazılacaktır. Bu eşitliğin kullanılmasında, aşağıdaki uygulama benimsenecektir. Gaz fazı için kütle transferi pozitif olarak alınacak ve tasarım eşitliğinin integrali daima kolonun alt ve üstüne tekabül eden limitler arasında uygulanacaktır. Gaz fazı kolon içinde daima artmaktadır (Foust, 1960).

#### 4.1.1.1. Dizayn eşitliği

Distilasyon veya gaz absorpsiyonu gibi bir kütle transfer işlemi için kullanılan dolgulu bir kolonda (Şekil 4.1) yatışkın hal için, diferansiyel kolon üzerinde kütle denklığı ,

$$dV = dL \quad (4.1)$$

ve aynı kısım üzerinde bir bileşen denklığı :

$$d(Vy) = d(Lx) \quad (4.2)$$

Eşitlik 4.2 bileşen kütle denkliği eşitliğidir. Eşitlik kolon uzunluğu boyunca herhangi bir noktada temas halindeki iki fazın yığın bileşimlerini gösterir. Eşitlik 4.2 kolon boyunca herhangi bir nokta ve kolon altı arasında integrasyon ile aşağıdaki gibi olur:

$$Vy - V_1y_1 = Lx - L_1x_1$$

veya

$$Vy - L_1x_1 = Lx + V_1y_1 \quad (4.3)$$

Eşitlik 4.3 işletme eğrisi eşitliğidir ve  $x_1$  ve  $x_2$  arasında  $x$ 'in tüm değerleri için geçerlidir.  $V$  ve  $L$  hızları genel durumda konsantrasyondaki veya pozisyondaki değişimle değişir, bu eşitlik eğrisel işletme çizgisini tanımlar. Aşırı seyreltik durumlarda konsantrasyondaki değişimin  $V$  ve  $L$  üzerindeki etkisi ihmal edilir. Eşitlik 4.3'te tanımlandığı gibi işletme doğrusu aslında lineerdir.

Faz içindeki bileşenin değişim hızı fazdaki transfer hızına eşit olmalıdır. Böylece eşmolar zat yayınmadaki  $V$ - fazı için:

$$d(Vy) = k'_y (y_1 - y) dA = K'_y (y^* - y) dA \quad (4.4)$$

Dolgulu kolondaki bu transfer alanını ölçmek aşırı derecede zordur ve aşağıdaki gibi daha uygun bir şekilde ifade edilebilir.

$$dA = a S dZ \quad (4.5)$$

Eşitlik 4.5'deki  $a$  terimi kuru dolgu için yazılan Çizelge 3.1'deki  $a_p$  ( $a_v$ ) den farklıdır. Bu yeni terim dolgu bileşim özelliklerinin ve tutulan sıvının bir fonksiyonudur ve bu yüzden iki fazın akış hızlarına bağlıdır. Taşma olayında tanımlandığı gibi  $a$  niceliği aynı usuldeki akış hızları ile etkilenir.  $a$  terimi genellikle dolgulu kolonlarda bilinmez, (zaman)



(itici kuvvet) (dolgu hacmi) birimi başına transfer edilen miktarın birimleri ile  $k_y^1 a$  bir bileşim katsayısını vermesi için yüzey katsayısı ile birleştirilir. Böylece Eşitlik 4.4, Eşitlik 4.5 ile birleştirilirse aşağıdaki sonucu verir :

$$d(Vy) = k_y^1 a (y_i - y) S dZ = K_y^1 a (y^* - y) S dZ \quad (4.6)$$

Eşitlik 4.6, kolon uçları arasındaki konsantrasyonda toplam değişimin integrali alınarak gerekli kolon yüksekliğini bulmak için kullanılabilir.

$$\int_0^z dz = \int_{y_1}^{y_2} \frac{d(Vy)}{k_y^1 a S (y_i - y)} = \int_{y_1}^{y_2} \frac{d(Vy)}{K_y^1 a S (y^* - y)} \quad (4.7)$$

Benzer bir usulde, kolon yüksekliği sıvı faza dayanan tüm terminoloji ile uygun hızla birlikte bileşimdeki kullanılan L-faz değişimleri değerlendirilebilir.

$$\int_0^z dz = \int_{x_1}^{x_2} \frac{d(Lx)}{k_x^1 a S (x - x_i)} = \int_{x_1}^{x_2} \frac{d(Lx)}{K_x^1 a S (x - x^*)} \quad (4.8)$$

Eşitlik 4.7 veya 4.8'i kullanmak için aşağıdaki bilgiler gerekir,

- 1) Bu iki fazın taşınım özellikleri ve V ve L akış hızlarının bir fonksiyonu olarak  $k_x^1 a$ ,  $k_y^1 a$ ,  $K_x^1 a$  veya  $K_y^1 a$  'nın değerleri
- 2) Uç itici kuvvetler ve herbir fazdaki uç bileşimleri arasındaki ilişkiler,  $(x-x_i)$ ,  $(x-x^*)$ ,  $(y_i-y)$  veya  $(y^*-y)$  dir. Herbir fazdaki yığın bileşimler Eşitlik 4.3'den hesaplanabilir ve itici kuvvetler tanımlanacak metotlar ile tayin edilebilir.

Sabit bir bileşen boyunca yayınma durumu için tasarım eşitliği mekanizmalardaki farklılığı hesaplamak için uygun kütle transfer katsayılarını kullanarak Eşitlik 4.7 ve 4.8 için tanımlandığı gibi aynı usulde elde edilebilir.

Böylece, absorpsiyonda karşılaşıldığı gibi sabit bileşen boyunca yayınma için,

$$\int_0^z dz = \int_{y_1}^{y_2} \frac{d(Vy)}{k_y a S (y_i - y)} = \int_{y_1}^{y_2} \frac{d(Vy)}{K_y a S (y^* - y)} \quad (4.9)$$

ve L-fazı için

$$\int_0^z dz = \int_{x_1}^{x_2} \frac{d(Lx)}{k_x a S (x - x_i)} = \int_{x_1}^{x_2} \frac{d(Lx)}{K_x a S (x - x^*)} \quad (4.10)$$

Böylece, Eşitlik 4.7, 4.8, 4.9, ve 4.10 yayınmayan bir faz boyunca yayınmayı ve eşmolar zıt yayınmayı içeren kütle transfer işlemleri için önemli tasarım eşitliklerini gösterir. Bu eşitlikler ısı transferi için tasarım eşitliğine tam karşılıktır. Eşitlikler daha ayrıntılı olarak incelenecektir (Foust, 1960).

#### 4.1.2. Eşmolar zıt yayınma

McCabe - Thiele'nin varsayımına göre Eşitlik 4.7 aşağıdaki gibi yazılabilir,

$$\int_0^z dz = V \int_{y_1}^{y_2} \frac{d y}{k_y a S (y_i - y)} = V \int_{y_1}^{y_2} \frac{d y}{K_y a S (y^* - y)} \quad (4.11)$$

Burada molar akış hızı (V) kolonun zenginleşen kısmı tarafında sabit olarak düşünülür. Akış hızının büyüklüğü aynı zamanda besleme miktarına ve koşullarına bağlı olarak farklı olmasına karşın absorpsiyon kısmında sabit olacaktır. Aynı varsayımlar için, Eşitlik 4.8 aşağıdaki gibi olur,

$$\int_0^z dz = L \int_{x_1}^{x_2} \frac{d x}{k_x a S (x - x_i)} = L \int_{x_1}^{x_2} \frac{d x}{K_x a S (x - x^*)} \quad (4.12)$$

Bazı basitleştirmeler Eşitlik 4.11 veya 4.12'de yapılarak daha kullanışlı hale getirilebilir. Faz akış hızları ( L ve V ) sabit varsayılmıştır. Bireysel ve bileşik kütle transfer katsayıları bu akış hızlarının bir fonksiyonu olduğundan dolayı, katsayılar aynı zamanda sabit olmalıdır. Sağlanan fiziksel özellikler hissedilir derecede değişmez. Bu yüzden,

$$\int_0^z dz = \frac{V}{k_y^1 a S} \int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{(y_i - y)} = \frac{V}{K_y^1 a S} \int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{(y^* - y)} \quad (4.13)$$

ve

$$\int_0^z dz = \frac{L}{k_x^1 a S} \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{(x - x_i)} = \frac{L}{K_x^1 a S} \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{(x - x^*)} \quad (4.14)$$

Belirli bir ayırma için gerekli olan kolon yüksekliği Eşitlik 4.13 veya 4.14'ten biri kullanılarak elde edilebilir. İfade edilen varsayımların geçerliliği sağlanabilir. Her iki eşitlikteki integral terimleri mevcut itici güç ile bölünen her bir fazı için bileşimin toplam değişimine eşit olur. İntegrasyon ifadesi Chilton and Colburn'un transfer ünitesi sayısı (N) olarak tanımladığı bir niceliği verir. İntegralin dış sınırı transfer ünitesinin yüksekliğini (H) tanımlamaktadır. Kolon yüksekliği, transfer ünitesi yüksekliği ile transfer ünitesi sayısı çarpılarak hesaplanmaktadır.

$$z = H_G N_G = H_{OG} N_{OG} = H_L N_L = H_{OL} N_{OL} \quad (4.15)$$

Burada

$$H_G = \frac{V}{k_y^1 a S} \text{ ft}, \quad H_L = \frac{L}{k_x^1 a S} \text{ ft} \quad (4.15a)$$

$$H_{OG} = \frac{V}{K_y^1 a S} \text{ ft}, \quad H_{OL} = \frac{L}{K_x^1 a S} \text{ ft} \quad (4.15b)$$

$$N_G = \int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{y_i - y} \quad N_L = \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{x - x_i} \quad (4.15c)$$

$$N_{OG} = \int_1^2 \frac{dy}{y(y^*-y)} \quad N_{OL} = \int_1^2 \frac{dx}{x(x-x^*)} \quad (4.15d)$$

4.13-4.15 Eşitliklerini kullanmadan önce yayınma olmayan bir faz içinde yayınma için benzer eşitlikleri geliştirmek önemlidir.

#### 4.1.3. Sabit bir bileşen içinde yayınma

Gaz absorpsiyonu, sıvı-sıvı ekstraksiyonu, iyon değişimi ve adsorpsiyonu gibi kütle transfer işlemleri bu kısımda önemlidir. Çalışma eşitliklerinin geliştirilmesi için başlangıç noktası olarak Eşitlik 4.9 veya 4.10 alınmıştır. Bununla birlikte, distilasyondan farklı olarak V ve L sabiti varsayımı geçerli değildir. Örneğin, gaz absorpsiyonunda her iki faz, fazdan faza çözünen transferinin bir sonucu olarak değişen akış hızlarına sahip olacaktır. Özellikle çözünmeyen, içinde çözüneni olmayan gaz miktarının sabit kabul edilmesi ile bu karmaşıklığın önüne geçilebilir. Bu nedenle,  $V^1$  'yi içinde çözüneni olmayan gazın molar akış hızı ve  $V^1 = V(1-y)$  olarak alınır,

$$d(Vy) = V^1 d\left(\frac{y}{1-y}\right) = V^1 \frac{dy}{(1-y)^2} = V \frac{dy}{(1-y)} \quad (4.16)$$

Dolayısıyla ; Eşitlik 4.6'ya göre, tasarım eşitliği aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$d(Vy) = V \frac{dy}{(1-y)} = k_y a(y_i - y)Sdz = K_y a(y^* - y)Sdz \quad (4.17)$$

Kolon yüksekliği için Eşitlik 4.17'nin çözümü,

$$\int_0^z dz = \int_{y_1}^{y_2} \frac{V}{k_y a S (1-y)(y_i - y)} dy = \int_{y_1}^{y_2} \frac{V}{K_y a S (1-y)(y^* - y)} dy \quad (4.18)$$

L-fazı bakımından tasarım eşitliği,

$$\int_0^z dz = \int_{x_1}^{x_2} \frac{L}{k_x a S (1-x)(x-x_i)} dx = \int_{x_1}^{x_2} \frac{L}{K_x a S (1-x)(x-x^*)} dx \quad (4.19)$$

Eşitlik 4.18 ve 4.19 durgun yayınmayan faz içinden yayınmaya uygulanabilir. Kullanılmasında sık sık basitleştirme yapmak mümkün olmasına rağmen bu eşitlikler daima kullanılır. Önceki gibi, son değerın integral içinde kalmasına rağmen, eşitlikler transfer ünitesi yüksekliği ve transfer ünitesi bakımından ifade edilebilir, veya

$$\int_0^z dz = \int_{y_1}^{y_2} H_G dN_G = \int_{y_1}^{y_2} H_{OG} dN_{OG} = \int_{x_1}^{x_2} H_L dN_L = \int_{x_1}^{x_2} H_{OL} dN_{OL} \quad (4.20)$$

Burada  $H_G$  ve  $H_{OG}$  önceki gibi tanımlanır. Transfer ünitesi tanımı paydada  $(1-y)$  veya  $(1-x)$  terimi içermektedir.

Eğer  $H_G$  veya  $H_{OG}$  için aynı terimler integral işaretinden uzaklaştırılabiliyorsa ve bir sabit olarak ele alınabiliyorsa çözümün kolaylığı için yukarıdaki eşitlik uygun olacaktır. Bununla birlikte, eşitlik geliştirildiği zaman bu mümkün olmayacaktır.

$$\frac{k_c^1 D}{D} = 0.023 (N_{Re})^{0.83} (N_{Sc})^{0.44} \quad (4.21)$$

Yukarıdaki eşitlikte kütle transfer sayısı  $k_c^1$  için kullanılmakla birlikte bileşik katsayı  $k_c^1 a$  için aşağıdaki bağıntı kullanılmış olup benzer bağıntılar daha sonra ele alınmıştır.

Çizelge 4.1. Transfer ünitesi sayısı,  $N$  ve transfer ünitesi yüksekliği,  $H$  (Foust, 1960)

Mekanizma	Transfer ünitesi sayısı	Transfer ünitesi yüksekliği		İtici kuvvet
Eşmolar yayınma	$N_G \int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{y^* - y}$	$H_G$	$\frac{V}{k_y' a S}$	$y_i - y$
	$N_{OG} \int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{y^* - y}$	$H_{OG}$	$\frac{V}{K_y' a S}$	$y^* - y$
	$N_L \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{x - x_i}$	$H_L$	$\frac{L}{k_x' a S}$	$x - x_i$
	$N_{OL} \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{x - x^*}$	$H_{OL}$	$\frac{L}{K_x' a S}$	$x - x^*$
Sabit bir bileşen içinde yayınma	$N_G \int_{y_1}^{y_2} \frac{(1-y)_{lm} dy}{(1-y)(y_i - y)}$	$H_G$	$\frac{V}{k_y a S(1-y)_{lm}}$	$y_i - y$
	$N_{OG} \int_{y_1}^{y_2} \frac{(1-y)_{lm} dy}{(1-y)(y^* - y)}$	$H_{OG}$	$\frac{V}{K_y a S(1-y)_{lm}}$	$y^* - y$
	$N_L \int_{x_1}^{x_2} \frac{(1-x)_{lm} dx}{(1-x)(x - x_i)}$	$H_L$	$\frac{L}{k_x a S(1-x)_{lm}}$	$x - x_i$
	$N_{OL} \int_{x_1}^{x_2} \frac{(1-x)_{lm} dx}{(1-x)(x - x^*)}$	$H_{OL}$	$\frac{L}{K_x a S(1-x)_{lm}}$	$x - x^*$

$$\frac{k_y' a D}{D} = C (N_{Re})^a (N_{Sc})^b \quad (4.22)$$

Akış şartları, geometrisi ve fiziksel özellikleri belirtilmiş bir sistem için,  $k_y'$  a sabittir.

$$k_y' a = k_y a \frac{y_{blm}}{y_i} \quad (4.23)$$

$k'_y$  a belirtilmiş bir sistem için sabit olduğundan dolayı,  $k_y a y_{bim}/y_t$  ifadesi konsantrasyondan bağımsız olmalıdır. Bu varsayım, Eşitlik 4.18' in integral terimini basitleştirmek için kullanılacaktır. Eşitlik 4.18'in ikinci teriminin pay ve paydası  $y_{bim}/y_t$  ile bölümlim. Bu oran,  $(1-y)$  olarak  $y_b$  ifadesi ile ve yığın akımdaki ve ara yüzeydeki  $(1-y)$ 'nin logaritması alınarak bir bileşenin yerine ifade edilecektir. Sonuç olarak,

$$\int_0^z dz = \int_{y_1}^{y_2} \frac{V}{k_y a S(1-y)_{lm}} \frac{(1-y)_{lm} dy}{(1-y)(y_i - y)} = \int_{y_1}^{y_2} \frac{V}{K_y a S(1-y)_{lm}} \frac{(1-y)_{lm} dy}{(1-y)(y^* - y)} \quad (4.24)$$

Eşitlik 4.22 ve 4.23 ile, paydadaki  $k_y a (1-y)_{lm}$  terimi  $k'_y a$ 'ya eşittir ve konsantrasyondan bağımsızdır ve aynı zamanda cihazın geometrisine ve sıvı fazı akış hızına bağlıdır.

Genelde kütle transferi için bağıntular sıklıkla  $k$  ve  $V^{0.8}$  arasındaki orantıyı ifade eden akış hızlarını içermektedir. Tahmini olarak  $k_y a$ 'nın bir uygulamasını içeren sınıflandırma üzerinde  $V$  ile orantılı olduğu varsayılmıştır. Bu varsayımların temelinde  $V/k_y a S(1-y)_{lm}$  ve  $V/K_y a S(1-y)_{lm}$  ifadeleri genellikle sınır değerlerin ortalamasında her bir kolon için sabit varsayılır ve Eşitlik 4.24'deki integralin dışına alınabilir.

$$\int_0^z dz = \left[ \frac{V}{k_y a S(1-y)_{lm}} \right]_{ort} = \int_{y_1}^{y_2} \frac{(1-y)_{lm} dy}{(1-y)(y_i - y)} \quad (4.25)$$

ve

$$\int_0^z dz = \left[ \frac{V}{K_y a S(1-y)_{lm}} \right]_{ort} = \int_{y_1}^{y_2} \frac{(1-y)_{lm} dy}{(1-y)(y^* - y)} \quad (4.26)$$

Colburn L-fazı için aşağıdaki denklikleri önermektedir :

$$\int_0^z dz = \left[ \frac{L}{k_x a S(1-x)_{lm}} \right]_{ort} = \int_{x_1}^{x_2} \frac{(1-x)_{lm} dx}{(1-x)(x - x_i)}$$

$$\int_0^z dz = \left[ \frac{L}{K_x a S(1-x)_{lm}} \right]_{ort} = \int_{x_1}^{x_2} \frac{(1-x)_{lm} dx}{(1-x)(x-x^*)} \quad (4.27)$$

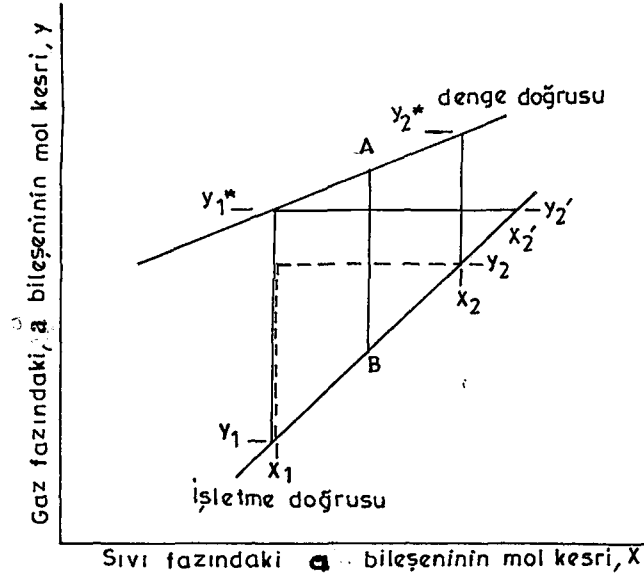
Eşitlik 4.26 veya 4.27'de transfer ünitesi yüksekliği integral işaretinin dışındaki nicelik ile ifade edilir ve transfer ünitesi sayısı integral terimi ile ifade edilir. Herbir eşitlik kütle transfer cihazının büyüklüğü için uygundur. Eşitlik 4.18 veya 4.19'un daha fazla basitleştirme olmamasına rağmen, transfer ünitesi yüksekliği az bir kayıpla integral içinden uzaklaştırılmıştır (Foust, 1960).

#### 4.1.4. Transfer ünitesinin değerlendirilmesi

Çizelge 4.1., kütle transferinin iki genel mekanizması için transfer ünitesinin yüksekliği ile beraber transfer ünitesinin daha genel tanımlarını göstermektedir. Eğer integralin değeri bir ise transfer ünitesinin anlamı, bir fazın zenginleşmesini tamamlaması için gerekli temas miktarı aynı fazdaki itici kuvvete eşitliği ile açıklanacaktır. Transfer ünitesi sayısı ve transfer ünitesi yüksekliği herhangi bir uygun birimde itici kuvvetin bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Bu katsayı kullanılan itici kuvvetin birimi ile tutarlı olmalıdır. Transfer ünitesi yüksekliği için bağıntılar sonra ele alınacaktır.

Fazların birisinin artışı veren, bu artışı meydana getiren ortalama itici kuvvete eşit olarak tek bir transfer birimi tanımlanabilir. Bu tanımlama, bir transfer ünitesi kullanarak elde edilen ayırma ile bir denge kademesi ile birleştirilen ayırmanın karşılaştırılması ile ilgilidir. Şekil 4.2. denge doğrusu ve işletme doğrusunun uygun bir xy diyagramını göstermektedir.





Şekil 4.2 Transfer ünitesi ve denge kademesinin karşılaştırılması (Foust, 1960).

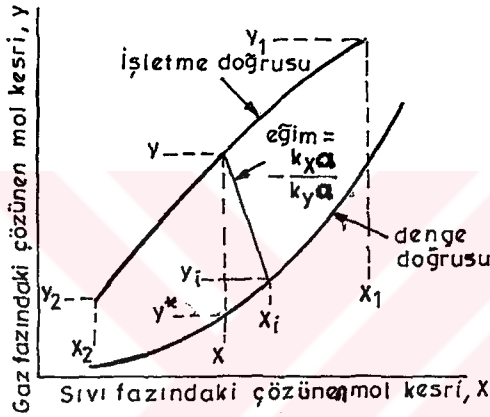
$(x_1)$  kademesini terkeden sıvı bileşimine bağlı olan  $(y_1^* - y_1)$  itici kuvvetine eşit olan  $(y_2' - y_1)$ 'in gaz fazı bileşimindeki bir değişmeyi vermesi için denge kademesi koyu çizgi ile gösterilir. Kesikli çizgi ile verilen transfer ünitesi, transfer ünite içindeki ortalama itici kuvvete eşit olan  $(y_2 - y_1)$  bileşimindeki bir değişmeyi vermektedir. İtici kuvvet bileşimin değişmesi ile değişecektir. İtici kuvvet  $(x_2, y_2)$ 'de  $y_2^* - y_2$   $(x_1, y_1)$ 'de  $y_1^* - y_1$  olur. En genel ifade ile, gaz faz için ortalama itici kuvvet aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$(y^* - y)_m = \frac{\int_{y_1}^{y_2} dy}{\int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{y^* - y}} \quad (4.28)$$

Sıvı fazı konsantrasyonları ve itici kuvvetler aynı zamanda denge kademesi ve transfer ünitesi arasındaki farkı göstermek için kullanılabilir. Eşitlik 4.28'in çözümü  $y^*$  ve  $y$  arasındaki ilişkiye bağlıdır. Eğer, hem denge eğrisi hem de işletme doğrusu doğru veya doğruya yakın ise, Eşitlik 4.28'in çözümü aritmetik ortalamayı verir,

$$(y^*-y)_m = \frac{(y^*-y_1) + (y_2^*-y_2)}{2} \quad (4.29)$$

Bu eşitlik  $y_2$ 'yi hesaplamak için deneme-yanılma çözümünü gerektirmektedir, fakat çözüm çok karışıktır. Şekil 4.2.'de görüldüğü gibi kesikli çizgi  $(y_2-y_1)$  değerine eşit ayırma ile bir transfer ünitesini göstermektedir. Verilen bir ayırma için gerekli transfer ünitesi sayısını grafiksel yoldan hesaplamak amacıyla Eşitlik 4.29 kullanılarak uygun bir denklik elde edilebilir.



Şekil 4.3. Absorpsiyon için xy diyagramı (Foust, 1960).

#### 4.1.5. Transfer ünitesi sayısının hesaplanması

Gaz absorpsiyonu problemi için gerekli olan transfer ünite sayısının değerlendirilmesi düşünüldüğünde,

$$N_{OG} = \int_{y_1}^{y_2} \frac{(1-y)_{lm} dy}{y(1-y)(y^*-y)} \quad (4.30)$$

$$N_G = \int_{y_1}^{y_2} \frac{(1-y)_{lm} dy}{y(1-y)(y_i - y)} \quad (4.30a)$$

Eşitlik 4.30 veya Eşitlik 4.30a'nın belirli bir çözümü için birkaç metod mevcuttur:

### 1) Grafiksel İntegrasyon

Eşitlik 4.30 veya 4.30a'nın belirli bir çözümü, çeşitli değişkenler arasında gerekli fonksiyonel bağıntıların yokluğunda tam olarak mümkün değildir. Bununla beraber, grafiksel integrasyon tekniklerini kullanarak iyi bir cevap elde edilebilir. Böylece, aşağıdaki gibi Eşitlik 4.30 veya Eşitlik 4.30a için gerekli bilgiler belirlenecektir.

- (a) x-y koordinatlarında denge verileri çizildiği ve aynı grafik üzerinde işletme doğrusu yerleştirildiğinde Şekil 4.3.'de gösterilen sınır bileşimler ile işletme doğrusu ve denge eğrisi bulunabilir.
- (b) Kolon içinden yukarı doğru yükselen, yerel itici kuvvetler ( $y_1$ -y) veya ( $y^*$ -y) ve yayınmayan bileşenin konsantrasyonu (1-y) , y'nin herhangi bir değeri için hesaplanabilir. Eşitlik 16.30 ya da 16.30a ile ifade edildiği gibi transfer ünitesi sayısı için kolon boyunca  $y_1$  ve  $y_2$  arasında y'nin birkaç değerinde bu işlem tekrar edilerek çizim yapılır (Şekil 4.4.). Yalnız grafiksel tekniklerin doğruluğu ile sınırlandığı için bu yöntem önemlidir.

Bu grafiksel yöntem gaz absorpsiyonu için gösterilir, fakat transfer ünitesi tanımlaması ve mekanizması için uygun bir değişiklik ile herhangi bir kütle transfer işlemi ile aynı şekilde kullanılabilir. Toplam itici kuvvetler ve tek bir direnç boyunca itici kuvvetlerin birisi verilen bir artış için gerekli transfer ünitesi sayısını belirlemek için kullanılabilir.

### 2) İntegralin Basitleştirilmesi

Gaz absorpsiyonu veya ekstraksiyonu gibi sabit bir bileşen içinde yayınmanın birçok durumu için, Wiegand  $(1-y)_m$  ifadesinin (1-y) ve (1-y\*)'ın aritmetik ortalaması ile tahmin edilebileceği gösterilmiştir. Eğer bu yaklaşım ile meydana gelen küçük hatalar kabul edilebilirse, Eşitlik 4.30 aşağıdaki şekli ile integre edilebilir,

$$N_{OG} = \int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{(y^* - y)} + \frac{1}{2} \ln \frac{1 - y_2}{1 - y_1} \quad (4.31)$$

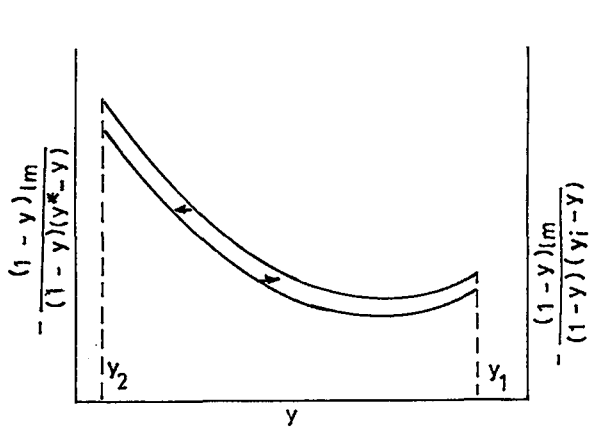
İntegral terimi grafiksel olarak değerlendirilmelidir, fakat bu Eşitlik 4.30'un integralinden daha basittir. Burada, integral terimi eşmolar yayınma için ele alınmıştır. Genellikle Eşitlik 4.31'in son terimi ihmal edilebilir, fakat terim her bir durum için açıklanmalıdır. Çoğu kez seyreltik çözeltiler için  $(1-y)$  ve  $(1-y)_{lm}$  yaklaşık olarak eşit olduğu için Eşitlik 4.30'da ihmal edilebilir. Herhangi bir durumda, yapılan basitleştirmelerin, varsayım ve hataların doğruluğunu karşılaştırmak için dikkat edilmeden yapılamayacağı vurgulanır. Eşitlik 4.30'daki integralin basitleştirilmiş sonuçları,

$$N_G = \int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{(y_i - y)} + \frac{1}{2} \ln \frac{1-y_2}{1-y_1} \quad (4.32)$$

$$N_{OG} = \int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{(y^* - y)} + \frac{1}{2} \ln \frac{1-y_2}{1-y_1} \quad (4.33)$$

$$N_L = \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{(x - x_i)} + \frac{1}{2} \ln \frac{1-x_2}{1-x_1} \quad (4.34)$$

$$N_{OL} = \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{(x - x^*)} + \frac{1}{2} \ln \frac{1-x_2}{1-x_1} \quad (4.35)$$



Şekil 4.4.  $N_G$  veya  $N_{OG}$  için grafiksel integrasyon (Foust, 1960).

Eşitlik 4.32' den 4.35'e kadar mol kesri birimleri kullanılır, fakat diğer birimler de kullanılabilir. Örneğin mol oranları bakımından,

$$N_G = \int_{y_1}^{y_2} \frac{dY}{(Y_i - Y)} - \frac{1}{2} \ln \frac{1 + Y_2}{1 + Y_1} \quad (4.36)$$

$$N_{OG} = \int_{y_1}^{y_2} \frac{dY}{(Y^* - Y)} - \frac{1}{2} \ln \frac{1 + Y_2}{1 + Y_1} \quad (4.37)$$

Kullanılacak eşitliğin seçimi keyfidir, fakat kütle transfer katsayısının genellikle en büyük direnç ile birleştirilmiş alana dayandığı ısı transferinde olduğu gibi, ana direnç bakımından itici kuvvetleri içeren eşitliği kullanmak mantıklı görünür. Bu, eğer gaz fazı kontrol direnci olarak söylenebilirse, o zaman gaz faza karşı itici kuvvet büyük olmaktadır ve iyi bir doğrulukla hesaplanabilir. Bu durumda Eşitlik 4.32 veya 4.36'nın kullanılması uygun olur.

### 3) Baker'ın Grafiksel Metodu

Eşitlik 4.28 kullanılarak bir transfer ünitesi aşağıdaki gibi tanımlanabilir,

$$N_G = 1 = \frac{(y_2 - y_1)}{(y^* - y)_{ort}} \quad (4.38)$$

Transfer ünitesi sayısını belirlemek için hem işletme doğrusu hem de denge doğrusu özellikle lineer olan bir transfer ünitesi uzunluğu üzerindeki varsayım ve itici kuvvetlerin bir aritmetik ortalamasının kullanımına dayanan basit bir grafiksel yöntem Baker tarafından önerilmiştir. Yöntem Şekil 4.5'te görülmektedir. Oluşan AB doğrusu işletme ve denge doğrusu arasındaki orta kısma dikey olarak yerleştirilir ve değerlendirme aşağıdaki gibi uygulanır: F noktasından başlayarak ortadaki AB doğrusuna yatay olacak şekilde, G noktası çizilir. Bu nokta H'a doğru FG'ye eşit mesafede genişler. H'dan işletme çizgisi üzerinde M'e dikey bir çizgi çizilir. Ortalama KP itici kuvvetine eşit olan

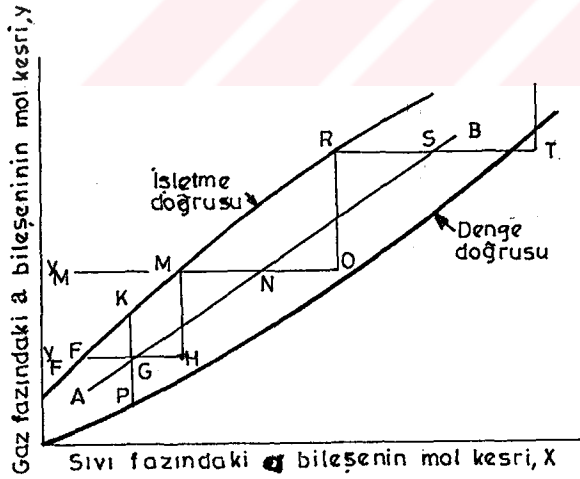
$y_M - y_F$ ' nin gaz fazı bileşimindeki değişmeyi verdiği için dolayı FHM bir transfer ünitesidir. Yöntem MN=NO örneğindeki gibi sürekli.

#### 4) Logaritmik Ortalama (Log-Mean) İtici Kuvveti

Seyreltik konsantrasyonların olması durumunda Eşitlik 4.30'un başka bir basitleştirilmesi önemli olmaktadır. Bu durum, logaritmik ortalama itici kuvvetin kullanılması ile basitleştirilmiş ısı-transfer tasarım eşitliğine benzerliğinden dolayı ele alınır. Seyreltik bir karışımda, Eşitlik 4.33 aşağıdaki denklige indirgenir:

$$N_{OG} = \int_1^2 \frac{dy}{y(y^* - y)} \quad (4.39)$$

Şimdi ilgili konsantrasyon aralığının üzerinde hem denge hem de işletme doğrusunun lineer olduğunu farzedelim. Bu varsayım q'ya karşı lineer bir T eğrisini gösteren ısı-değiştirme tasarımındaki sabit  $C_p$  varsayımına benzerdir.



Şekil 4.5.  $N_{OG}$ 'nin grafiksel değerlendirilmesi (Foust, 1960).

Denge eğrisi için, aşağıdakileri ele alalım,

$$y^* = mx + C \quad (4.40)$$

Sonra  $y_2^* = mx_2 + C$

ve  $y_1^* = mx_1 + C$

veya , C yok edilerek

$$m = \frac{y_2^* - y_1^*}{x_2 - x_1} \quad (4.41)$$

İşletme çizgisi için eşitlik,

$$L(x-x_1) = V(y-y_1)$$

veya

$$x = x_1 + \frac{V}{L}(y - y_1) \quad (4.42)$$

Bu yüzden,

$$y^* = m \left[ x_1 + \frac{V}{L}(y - y_1) \right] + C \quad (4.40a)$$

Eşitlik 4.40a'daki  $y^*$  Eşitlik 4.39'da yerine koyulduğunda aşağıdaki denklik elde edilir.

$$N_{OG} = \int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{y^* - y} = \int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{m \left[ x_1 + \frac{V}{L}(y - y_1) \right] + C - y} \quad (4.43)$$

Payda  $dx/(a+bx)$  şeklinde Eşitlik 4.43'e koymak için yeniden düzenledikten sonra, eşitlik aşağıdaki şekilde integre edilebilir.

$$N_{OG} = \frac{1}{\frac{mV}{L} - 1} \ln \frac{m \left[ x_1 + \frac{V}{L}(y_2 - y_1) \right] + C - y_2}{mx_1 + C - y_1} \quad (4.44)$$

Eşitlik 4.44, Eşitlik 4.40, 4.41, ve 4.42'nin uygun şekilleri yerine koyularak basitleştirilebilir.

$$N_{OG} = \frac{1}{\frac{y_2^* - y_1^*}{x_2 - x_1} \cdot \frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} - 1} \ln \frac{y_2^* - y_2}{y_1^* - y_1} \quad (4.45)$$

Yeniden düzenlendiği zaman aşağıdaki denklik elde edilir,

$$N_{OG} = \frac{y_2 - y_1}{(y_2^* - y_2) - (y_1^* - y_1)} \ln \frac{y_2^* - y_2}{y_1^* - y_1} \quad (4.46)$$

Fakat tanımlamaya göre,

$$(y^* - y)_{lm} = \frac{(y_2^* - y_2) - (y_1^* - y_1)}{\ln \frac{y_2^* - y_2}{y_1^* - y_1}}$$

Bu yüzden, Eşitlik 4.46 aşağıdaki denklige indirgenir ,

$$N_{OG} = \frac{y_2 - y_1}{(y^* - y)_{lm}} \quad (4.47)$$

Eşitlik 4.47 seyreltik çözeltiler ve düz denge ve işletme doğruları için sınırlanır. Ancak,  $(\Delta T)_{lm}$ 'in kullanımından farklı olarak,  $(y - y^*)_{lm}$ 'in kullanılması genel değildir. Bundan dolayı, çoğu zaman seyreltik çözeltiler için, mol-oranı birimlerinde denge eğrisi ve işletme doğrusunun çizimi bu doğruları lineer yapar ve mol-oranı birimlerinde Eşitlik 4.47'nin kullanımı uygun olur.



### 5) Denge ve İşletme Doğruları Hafif Eğimli Olduğu Zaman Transfer Ünitesinin Değerlendirilmesi

Transfer ünitesi sayısını tanımlayan değişik eşitliklerin integrali için yaklaşımlar işletme şartları için Colburn tarafından verilmiştir. Hem işletme doğrusu hem de denge eğrisi lineere yakındır. Bu çözümler gaz absorpsiyonu, desorpsiyon, distilasyon, stripping işlemleri ve sıvı ekstraksiyonu gibi kütle transferi için faydalı olur (Foust, 1960).

#### 4.1.6. Transfer ünitesi yüksekliğinin hesaplanması

Bireysel ve toplam kütle transfer katsayıları arasındaki bağıntı aşağıdaki gibi açıklanmıştır.

$$\frac{1}{K_y} = \frac{1}{k_y} + \frac{m}{k_x} \quad (4.48)$$

Yukarıdaki denklik, öncelikle dolgulu kolon işlemi için ele alınmış ve birim hacim başına ara yüzey alanı bileşik bir değeri vermesi için katsayılar ile birleştirilmiştir. Kütle transfer katsayı etkisi yayınlılık hariç aynı zamanda a niceliğinin etkisi ile Eşitlik 4.48'e benzer bir eşitlik bileşik katsayılar kullanılarak yazılabilir. Bu yüzden,

$$\frac{1}{K_y a} = \frac{1}{k_y a} + \frac{m}{k_x a} \quad (4.49)$$

Eşitlik 4.49 aynı zamanda aşağıdaki gibi yazılabilir,

$$\frac{V}{K_y a(1-y)_{lm}} = \frac{V}{k_y a(1-y)_{lm}} + \frac{mV}{L} \cdot \frac{L(1-x)_{lm}}{(1-x)_{lm}} \cdot \frac{1}{(1-y)_{lm}} \cdot \frac{1}{k_x a} \quad (4.50)$$

Eşitlik 4.50'nin her bir terimi, transfer ünitesinin yüksekliği ( $H_{OG}$ ,  $H_G$ , veya  $H_L$ ) olarak öncelikle tanımlanmıştır. Böylece, Eşitlik 4.50 aşağıdaki gibi olur,

$$H_{OG} = H_G + \frac{mV}{L} H_L \quad (4.51)$$

En yaygın olarak karşılaşılan kütle transfer işlemleri için sağ taraftaki  $(1-x)_m/(1-y)_m$  oranı bire yaklaşır. Ordinatı kesen  $H_G$  değeri ve eğiminin düz bir çizgisi  $H_L$ 'ye eşit olduğu zaman Eşitlik 4.51  $H_{OG}$  ve  $mV/L$ 'ye bağlı olur.  $H_{OG}$ ,  $mV/L$ 'nin bir fonksiyonu olarak ifade edildiğinde, Eşitlik 4.51 transfer prosesinde karşılaşılan kuvvetlerin göreceli büyüklükleri  $H_G$  ve  $H_L$ 'nin hesaplanması için uygundur. Ancak,  $m$ 'in sabit değeriyle seyreltik çözelti aralığı dışında genellikle karşılaşılmadığı için öyle basit değildir. Hemen hemen tüm sistemler için denge eğrisinin eğimi sabit değildir (Foust, 1960).

#### 4.1.6.1. Sıvı fazı ( $H_L$ )

Sherwood and Holloway, sıvı fazın direncinin baskın olduğu durumlar için absorpsiyon ve desorpsiyon verileri ile deneysel olarak ilgilenmişlerdir. Çeşitli dolgu maddeleri için,

$$H_L = \beta \left( \frac{G_L}{\mu_L} \right)^n \left( N_{sc} \right)^{0.5} \quad (4.52)$$

Çizelge 4.2. Eşitlik 4.52 için sabit değerler (Foust, 1960)

Dolgu maddesi	$\beta$	n	$G_L$ aralığı
Rashig halkaları			
1/2 in	0.00357	0.35	400-15000
1 in	0.01	0.22	400-15000
1.5 in	0.0111	0.22	400-15000
2 in	0.0125	0.22	400-15000
Berl eyerleri			
1/2 in	0.00666	0.28	400-15000
1 in	0.00588	0.28	400-15000
1.5 in	0.00625	0.28	400-15000
Spiral halkalar			
3 in	0.00909	0.28	400-15000

Eşitlik 4.52, sadece absorpsiyon ve desorpsiyon işlemlerindeki deneysel gözlemlerden geliştirilmiştir. Eşmolar transfer için, geliştirilmiş bir korelasyonu kullanmak için yeterli veri yoktur.

#### 4.1.6.2. Gaz Fazı ( $H_G$ )

$H_G$  için bağıntılar, gaz fazın hemen hemen tüm transfer direncini kapsadığı yapılan deneysel şartlardaki zorluklar nedeniyle  $H_L$  için olan denklemler kadar kolaylıkla kurulamaz. Fellingner'in geniş amonyak-su verileri  $H_G$  için uygun bir bağıntı elde etmede kullanılmıştır.

Geniş olarak bulunabilen amonyak-su verilerinden deneysel eşitlik aşağıdaki şekilde önerilir :

$$k_{Ga} = b(G_G)^p(G_L)^r \quad (4.53)$$

Burada b, p, ve r işletmede kullanılan dolgunun geometrisine ve spesifik akış hızlarına bağlı sabitlerdir. Hensel and Treybal, p ve r sembollerinin aynı sabitler olarak kullanılmasına karşındırlar ve Shulman and DeGouff, sabitlerin  $k_G$  ve a değerleri aynı değişkenler ile etkilenmediği için değişebileceğini önermektedirler. Bununla birlikte, Eşitlik 4.53 elde mevcut en iyi denklemdir. Çizelge 4.3. eşitlikteki sabitlerin değerini göstermektedir.

Çizelge 4.3. Eşitlik 4.53 için amonyak-hava-su absorpsiyon veri sabitleri.

Dolgu maddesi	h	p	r
Rashig halkası			
1/2 in	0.0065	0.90	0.39
1 in	0.036	0.77	0.20
1.5 in	0.0142	0.72	0.38
2 in	0.048	0.88	0.09
Berl eyeri			
1 in	0.0085	0.75	0.40

Amonyak-su sistemi için bağıntı aşağıdaki metod ile başka gaz-sıvı sistemleri için uygulanabilir. Kütle-transfer katsayıları için değişik bağıntıların bileşik katsayı  $k_{Ga}$  için yazılabildiği farzedilir. Sonra amonyak sistemi için,

$$(k_{Ga})_{NH_3} = (\text{sabit } (N_{Re})^u (N_{Sc})^h)_{NH_3} \quad (4.54)$$

ve herhangi bir sistem için

$$k_{Ga} = \text{sabit } (N_{Re})^u (N_{Sc})^h \quad (4.54a)$$

Eğer özel olmayan sistemler için işletme şartları  $N_{Re}$  ve kolon geometrisine göre benzer ise, yukarıdaki eşitliklerdeki sabitler her iki sistem için aynı olacaktır; o zaman Eşitlik 4.54 ile Eşitlik 4.54a bölünerek aşağıdaki denklik elde edilir ;

$$\frac{k_{Ga}}{(k_{Ga})_{NH_3}} = \left[ \frac{(N_{Sc})_{NH_3}}{N_{Sc}} \right]^h \quad (4.55)$$

Schmidt grubundaki sembolün değeri ile ilgili olarak bazı belirsizlikler vardır, fakat şimdilik 2/3 değeri önerilmektedir.

Ancak, eşmolar transfer için transfer ünitesi yüksekliği ya da kütle transfer katsayıları için bağıntılar mevcut değildir. Verilen bir sistem için spesifik verilerin yokluğunda deneysel verilerin yerine kolon tasarımı için elde mevcut olmalıdır. Eşitlik 4.52 ve 4.55 tahmini bir cevap için kullanılabilir (Foust, 1960).

#### 4.1.7. Maliyet hesapları

Bu tasarımın ekonomisi ile ilgili denklemlerin Brockmeier and Himmelblau, 1972, ve Düzcsoy ve Kara, 1992'nin çalışmalarından temin edilerek olduğu gibi kullanılmıştır.

Kolon amortismanı,

$$TC = 14.4*DIAM*HT*P + 33*DIAM + 0.2*AREA*HT*PCOST \quad (4.56)$$

Kullanılan güç miktarı,

$$HP = 1.172E-05*(GY/100)^3*CF*HT*AREA / (100*DENG)^2 \quad (4.57)$$

Gaz için pompalama maliyeti,

$$BC = 528 * HP \quad (4.58)$$

Sıkıştırma maliyeti,

$$CC = -366*PI*(Ggin*QMG)*((PI/P)^{0.23} - 1) \quad (4.59)$$

Soğutma maliyeti,

$$RC = (0.0233*GXAV*AREA*CPL*(TIF - TF)) + (0.00583*GYAV*AREA*(TIF - TF)) + (0.0233*Ggin*(YNOXin - YNOXout)*QMNOX*HVAP/QMG) \quad (4.60)$$

Zengin sıvıdan çözüneni geri kazanma maliyeti,

$$DC = Glout*8750*DCOST \quad (4.61)$$

Toplam maliyet,

$$TCOST = TC + BC + DC + CC + RC \quad (4.62)$$

denklemleri ile hesaplanmıştır.

#### 4.2. NO<sub>x</sub> Gazlarının Dolgulu Kolonda Absorpsiyonu İle İlgili Literatür Taraması

Azot oksitlerin absorpsiyonu birçok laboratuvar ve mühendislik-ölçekli deneylerin konusu olmuş ve azot oksit absorpsiyonunun teorisi iyi bir temel üzerine kurulmuştur. Bununla birlikte, önceki mühendislik-ölçekli deneysel çalışmalar, önerilen azot oksit giderme prosesleri için doğrudan uygulanamamıştır.

Suda ve seyreltik nitrik asitte NO<sub>2</sub>\* gazının (NO<sub>2</sub> konsantrasyonu ve dengedeki dimerinin konsantrasyonu, N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>'ün toplamı) absorpsiyonu ve NO'nun gaz faz oksidasyonu, azot oksit giderme metodunun temelini oluşturmaktadır.

Bu literatür taramasının amacı,

- 1) Suda veya seyreltik asitte NO<sub>x</sub> ( NO<sub>2</sub>\* + NO'nun toplamı) bileşenlerinin dengede olmayan absorpsiyonu ile birleşmiş hız sınırlayıcı mekanizmalarını tanımlamak,
- 2) Azot oksit absorpsiyon cihazlarının tüm tasarımı için gerekli literatürün yokluğunu göstermek içindir.

*Chambers ve Sherwood, (1937)*, hem ıslak cidarlı kolonu hem de kesikli bir sistemi kullanarak 298 K'de nitrik asit çözeltisinde azottan NO<sub>2</sub>\*'ın absorpsiyonunu aşağıdaki reaksiyonları temel alarak çalışmışlardır (Counce, 1977);



NO<sub>2</sub>\*'ın kısmi basıncı yaklaşık olarak 0.05 ile 0.06 atm arasında iken asit konsantrasyonu 18.5 M'a kadar değiştirilmiş, reaksiyon 4.63'ün hızlı bir şekilde olduğu ve N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>'ün hidrolizinin reaksiyon 4.64 ile tam olarak gösterildiği varsayılmıştır. Absorpsiyon

hızının yaklaşık olarak gaz hızının 0.8 kuvveti ile orantılı olduğu için gaz faz direncinin kontrol mekanizması olduğu bulunmuştur (Counce, 1977).

Nitrik asit içinde  $\text{NO}_2^*$ - $\text{N}_2$  gaz karışımlarından  $\text{NO}_2^*$ 'in absorpsiyon hızı üzerine , sistem sıcaklığının,  $\text{NO}_2^*$  konsantrasyonunun ve asit molaritesinin etkilerini *Denbigh and Prince, (1947)*, ıslak cidarlı bir kolon kullanarak araştırmışlardır (Counce, 1977). Burada 298 K ve 313 K sıcaklıkları kullanılmış;  $\text{NO}_2^*$  kısmi basıncı 0-0.27 atm. aralığında ve asit molaritesi 1.7-13.0 M aralığında değişmiştir. Reaksiyon 4.64'ün  $\text{N}_2\text{O}_4$  ve suyun reaksiyonunu tanımladığını varsaymışlardır. 5.7 M'a kadar asit kuvveti için,  $\text{NO}_2^*$ 'in absorpsiyon hızı kimyasal reaksiyonla birleştirilmiş absorpsiyon prosesi teorisine göre aşağıdaki eşitlik ile gösterilmiştir,

$$R_{\text{NO}_2^*} = 2 \left[ \frac{\sqrt{D_{\text{N}_2\text{O}_4, \text{H}_2\text{O}} k_2}}{H_{\text{N}_2\text{O}_4}} \right] P_{\text{N}_2\text{O}_4} \quad (4.65)$$

Bu eşitlik için deneysel değerler elde edilmiştir. Reaksiyon 4.64'ün hız kontrollü adım olduğu bulunmuştur (Counce, 1977).

*Dekker, Snoeck ve Kramers, (1959)*, 298-308 K işletme sıcaklığında ve 0.03-0.15 atm.  $\text{NO}_2^*$  giriş kısmi basıncında, 0.2-0.4 saniyelik temas zamanları için ıslak cidarlı bir kolonda  $\text{NO}_2^*$ 'in absorpsiyonunu araştırmışlardır. Absorpsiyon hızı için Eşitlik 4.65'e benzer bir eşitlikle bağlantı kurulmuştur. Deneysel sonuçlar aşağıdaki model ile oldukça uyum içindedir:

- 1) Gaz fazındaki  $\text{NO}_2$  ve  $\text{N}_2\text{O}_4$  birbirleriyle sürekli dengededir,
- 2) Gaz sıvı ara yüzeyinde, yalnız  $\text{N}_2\text{O}_4$  suda çözünmektedir ve
- 3) Sudaki  $\text{N}_2\text{O}_4$ 'ün yayılması  $\text{N}_2\text{O}_4$  ve su arasındaki hızlı, yalancı birinci mertebeden kimyasal reaksiyon ile birleştirilir.

$\text{NO}_2^*$ 'in absorpsiyonu gaz fazın fotometrik analizi ile ve  $\text{HNO}_3$  ve  $\text{HNO}_2$ 'nin her ikisi için sıvı asit fazının titrasyonu ile ölçülmüştür (Counce, 1977).

*Counce, (1977)*, 0.01 atm.'den daha büyük  $\text{NO}_2^*$  kısmi basınçlarında azot oksit absorpsiyonu için hakim olan mekanizmanın  $\text{HNO}_2$  ve  $\text{HNO}_3$  için  $\text{N}_2\text{O}_4$ 'ün hidrolizi ve çözünmesi olarak ele almıştır. Bununla birlikte, gaz sıvı temas süresi büyük ise ya da NO gazının yüksek konsantrasyonları gaz sıvı teması sırasında mevcut ise,  $\text{N}_2\text{O}_3$ 'ün hidrolizi ve çözünmesi ve  $\text{HNO}_2$ 'nin çözünmesi o zaman rakip bir absorpsiyon mekanizması olarak görünür. Geri döngülü bir sistemde, gaz fazı ile dengede olan yatışkın haldeki  $\text{HNO}_2$ 'nin konsantrasyonu rapor edilmiştir. NO'nun gaz fazı oksidasyonu oldukça yavaş ilerler, reaksiyonun ilerlemesi için uygun gaz yüzeyi gerekmektedir ve sıcaklığı azaltılmalıdır (*Counce, 1977*).

Nitrik asit endüstrisinde  $\text{NO}_x$  absorpsiyon cihazı olarak kademeli kolonlar görülmektedir. Bununla birlikte, nitrik asit imali için sürekli dolgulu kolonlar da kullanılmaktadır. Bu uygulamaların her ikisi yüksek basınçtaki ( $> 5.0$  atm. ) absorpsiyon için kullanılır. Özellikle atmosferik basınçta  $\text{NO}_x$  gazı bileşenlerinin yıkanması için absorpsiyon cihazı olarak kademeli kolonlar daha uygun görülmektedir.  $\text{NO}_x$  gazının düşük konsantrasyonlarında, dolgulu bir absorpsiyon kolonunun kullanılması alternatif olarak görülmektedir (*Counce, 1977*).

Azot oksitlerin ( $\text{NO}_x$ ), absorpsiyon yöntemi ile giderilmesine yönelik olarak yapılan çalışmalarda, çeşitli sıvı ortamlar incelenmiştir. Azot oksitlerin özellikle azot monoksidin sudaki çözünürlüğünün az olması nedeniyle, çözünürlüğü arttırabilmek için, ortama çeşitli asidik ve bazik maddeler eklenerek, absorpsiyon verimleri karşılaştırılmıştır (*Ünal, 1985*).

*Komiyama ve Inoue, (1980)*, teorik model çalışmasında, azot monoksit ve azot dioksit karışımının sudaki absorpsiyonu incelenmiştir. Nitrik asit üretmek amacı ile bu iki azot oksidin,  $\text{N}_2\text{O}_3$  ve  $\text{N}_2\text{O}_4$  şeklinde ve kimyasal absorpsiyon temelinde, düzgün-sıvı-seviyeli (flat-liquid-level) ve kabarcıklı (bubbling) tip absorplayıcılarda, laboratuvar ölçeğinde giderilmesi düşünülmüştür. Her iki absorpsiyon kolonu için kütle aktarım katsayılarının, absorpsiyon hızına etkisi incelenmiştir (*Ünal, 1985*).



*Sada vd., (1978)*,  $\text{KMnO}_4$  ve ayrıca  $\text{KMnO}_4\text{-NaOH}$  çözeltilerinde azot monoksidin absorpsiyonunu, diğerinde de yine azot monoksidin  $\text{NaClO}_2\text{-NaOH}$  karışımını içeren çözeltilerdeki absorpsiyonunu incelemişlerdir. Laboratuvar ölçeğindeki çalışmalarında kesikli-karıştırmalı (batch-stirred) absorplayıcılar kullanılarak, reaksiyon hız sabitinin NaOH derişimi ile değişimini incelemişlerdir (Sada et al.,1977; Ünal, 1985).

*Kameoka ve Pigford, (1977)*, azot dioksidin, su, sülfirik asit, sodyum sülfid çözeltilerindeki absorpsiyonunu inceleyerek, absorpsiyon kapasitelerini karşılaştırmışlardır. Azot dioksidin önce  $\text{N}_2\text{O}_4$  şekline dönüştürölüp, daha sonra absorpsiyonun gerçekleştirildiği bu çalışmada, NaOH ile yapılan absorpsiyonun sudan daha büyük verim sağladığı, ayrıca  $\text{SO}_2$  ve  $\text{NO}_2$ 'nin birlikte giderilmesi için  $\text{NaSO}_3$  çözeltisinin kullanılabileceği gösterilmiştir (Kameoka and Pigford, 1977; Ünal, 1985).

*Sada ve çalışma arkadaşları*, sabit yanma kaynaklarından yayılan azot monoksidin yanısıra kükürt dioksidin de aynı anda giderilmesine yönelik olarak yaptıkları iki ayrı çalışmada,  $\text{FeSO}_4$  çözeltisi ve Fe II-EDTA (etilen diamin tetra asetik asit) ilave edilmiş  $\text{MgSO}_3$  çözeltilerini absorpsiyon sıvısı olarak kullanmışlardır. Bu çalışmalarda azot monoksidin,  $\text{FeSO}_4$  ve Fe II-EDTA ile kompleks bir ürüne dönüştüğü reaksiyonlar için absorpsiyon kapasitesinin büyük olduğu ve bu çözeltilerin kolayca geri kazanılabildikleri belirtilmiştir (Sada et al., 1978; Sada et al., 1980; Ünal, 1985).

Nitrik asit üreten tesislerle ilgili bir başka çalışmada (*Lefers, 1980*), azot oksitlerin nitrik asitte absorplanarak giderilmesi incelenmiştir. Çözünürlüğü arttırmak amacı ile sıvı ortama permanganat, klorit gibi iyonları içeren maddelerin eklenmesinin ekonomik olmadığı ve ayrıca değişik kirlenmelere de neden oldukları düşüncesi ile bu tür işletmelerde, absorplayıcı olarak  $\text{HNO}_3$  kullanımının verimi arttırabileceği ve ekonomik avantajlar sağlayabileceği önerilmiştir ( Ünal, 1985).

*Myerson ve Sanday'in 1981* yılında yaptıkları çalışma, azot monoksidin, kireçtaşı ( $\text{CaCO}_3$ ) doldurulmuş bir dolgulu kolondaki absorpsiyonu ile ilgili olup, özellikle gübre üreten tesisler için önerilmiştir. Azot monoksidin önce azot diokside, daha sonra da  $\text{N}_2\text{O}_4$  şekline yükseltlendiği bu çalışmada, kolon hacminin, NO derişiminin, gaz akım hızının ve

NO<sub>x</sub>'lerin kısmi basıncının ve dolgu maddesi miktarının absorpsiyon verimine etkisi incelenmiştir (Ünal, 1985).

*Nüyama ve Smith, (1976)*, absorpsiyon ve adsorpsiyon işlemlerinin birlikte gerçekleşmesinin giderme verimini arttıracakını düşünerek, üç fazlı (gez-sıvı-katı) sistemler üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmada, adsorplayıcı olarak aktif karbon içeren bir bulamaç (slurry) reaktöründe, 25°C ve 1 atm. basınç koşullarında azot monoksidin giderilmesi incelenmiş ve belirlenen kütle aktarım parametreleri deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Ünal, 1985).

Erzurum'da fosil kökenli yakıtların yanması sonucu meydana gelen hava kirleticileri içerisinde azot oksitleri belirlemek amacıyla 1980-1981 kış döneminde, azot oksit gazlarının ölçümü yapılmış, Erzurum'daki hava kirliliğinde azot oksit gazlarının önemli bir role sahip olduğu gösterilmiştir (Ünal, 1985).

*Counce ve Perona, (1983)*, azot oksitlerinin dolgulu kolonda giderme verimi Intalox eyerleri ile % 97'ye ulaştığını bulmuştur. Çalışmalarda atmosferik basınçta yıkayıcı çözelti olarak su ve % 10 NO beslemesi içeren çözeltiler kullanılmıştır. Araştırmada kütle transferi, kinetik bağıntıları ve denge verileri mevcut olan bir model esas alınmıştır. Bu model kullanılarak hesaplanan giderme etkinlikleri ile deneysel veriler mükemmel bir uyum içerisindedir (Counce and Perona, 1983).

*Hoffman ve Emig, (1979)*, azot oksitlerin absorpsiyonu hakkındaki bilgilerin şimdiki ifadesi ile ilgilenir. Değişik kaynaklardan alınan modeller, tartışılan temel fiziko-kimyasal kavramlar, reaksiyon ve reaktör modelleri ve hesaplanan modeller incelenmiştir. Bazı örneklerin değişik korelasyon ilişkileri yeniden hesaplanmıştır ve tüm nümerik eşitlikler SI birimine dönüştürülmüştür. Hem dinamik hem de statik yaklaşım gösteren tam çalışılmış bir örnek mevcuttur (Hoffman and Emig, 1979).

*Counce ve Selby, (1988)*, atmosferik basınçta seyreltik NO<sub>x</sub> gaz karışımlarının sulu zıt akım yıkama prensibine göre pilot ölçekli tesislerdeki deneylerini, yüksek verimli plastik kafes tel dolgusu ile doldurulan bir adsorplayıcı kullanarak yürütmüşlerdir. 125-

2500 ppm NO<sub>x</sub> gaz karışımı için NO<sub>x</sub> uzaklaştırma verimliği %10-60 olarak elde edilmiştir; NO<sub>x</sub> bileşenleri NO<sub>2</sub>\* (NO<sub>2</sub>+N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) olarak alınmıştır. Deneysel sonuçlar NO<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>'ün hidrolizine ve absorpsiyonuna dayandırılan basitleştirilmiş bir model ile uygunluk içindedir. Aynı zamanda gaz-sıvı arayüzey alanı ve sıvı faz kütle transfer katsayısı tahmini olarak hesaplanmıştır; arayüzey alanı sıvı hızından bağımsız olarak bulunmuştur (Counce and Selby, 1988).

*Suchak, Jethani ve Joshi, (1991)*, seri olarak bağlanmış üç tane dolgulu kolonda azot oksitlerin absorpsiyonu çalışılmış dolgulu kolonun ikisi 254 mm iç çap ve 6 m uzunlukta, üçüncüsü 800 mm iç çap ve 3 m uzunluktadır. Absorpsiyon aynı zamanda 800 mm iç çap, 7 ve 10 m uzunluktaki iki dolgulu kolonda da seri olarak çalışılmıştır. Nitrik ve sülfürik asit karışımından oluşan çözelti absorplayıcı olarak kullanılmıştır. Absorpsiyonun spesifik hızları düz yüzeyli karıştırılmış bir hücre kullanılarak ölçülmüştür. Adyabatik işlemler için matematiksel bir model geliştirilmiştir. Bu modelde, gaz fazı reaksiyonları ve denge, gaz fazı kütle transferi, ara yüzey dengesi ve sıvı fazı reaksiyonları ele alınmıştır. Heterojen gaz fazı dengesi başlangıçta modelde kapsanmış, asit konsantrasyonu itibarı ile kimyasal reaksiyonlu (NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ve N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>'ün) absorpsiyon hızlarındaki değişme düşünülmüştür. Gaz fazındaki nitrik asitin oluşumu aynı zamanda modelde ele alınmıştır. Model tahminleri ve deneysel gözlemler arasında uygunluk gözlenmektedir (Suchak, Jethani and Joshi, 1991).

Büyük boyutlu absorplayıcıların benzetimi model gelişiminde güveni arttırmaktadır. Yayımlanmış çalışmada, bazı deneysel verilerin pilot ölçekli absorplayıcılarda toplanmış olmasına rağmen , Counce ve Perona, (1983) tarafından yürütülen araştırmada su hariç başka absorban kullanılmamıştır. Bundan dolayı, büyük ölçekli benzetim hakkında bilgi halen yetersizdir. Ayrıca nitrik asitin başka elektrotları içerdiği durumdaki çalışması yapılmamıştır. Bu nedenle, büyük ölçekli absorplayıcı benzetimini yapma düşünülmüştür. Nitrik ve sülfürik asit karışımlarının çözeltisi çözücü olarak kullanılmıştır. Model tahmini ve deneysel gözlemler arasında karşılaştırma yapılmıştır (Suchak, Jethani and Joshi, 1991).

*Katima ve Handley, (1991)* tarafından yapılan deneyler, absorplanan azot oksitlerin ( $\text{NO}_x$ ) konsantrasyonu, 150 ve 10000 ppm arasında ve hava içerisindeki azot oksit ile azot dioksit oranı ( $\text{NO}/\text{NO}_2$ ), 0 ve 4 arasında iken, 298 K ve atmosferik basınçta çalışan bir absorpsiyon kolonunun performansını değerlendirmek için yürütülmüştür. %8 w/w'lik sodyum hidroksit çözeltisi yıkama sıvısı olarak kullanılmıştır. % 97'ye kadar absorpsiyon verimliliği elde edilmiştir. Absorpsiyon hızını tahmin etmek için basit bir matematiksel model geliştirilmiştir. Bu model, hızlı yalancı birinci mertebeden, diazot trioksit ( $\text{N}_2\text{O}_3$ ), diazot tetraoksit ( $\text{N}_2\text{O}_4$ ) ve yalancı ikinci mertebeden azot dioksit ( $\text{NO}_2$ )'in hidrolizi ve denge gaz faz oluşumu ve nitroz asitin ( $\text{HNO}_2$ ) fiziksel absorpsiyonu varsayımına dayanır. Model,  $\text{N}_2\text{O}_3$  ve  $\text{N}_2\text{O}_4$  için kabul edilen absorpsiyon katsayılarını bağımsız olarak kullanır. Tahmin edilen sonuçlar deneysel gözlemler ile uygunluk içindedir. Önerilen model, endüstriyel bir dolgulu kolonun performansını kontrol etmek ve tahmin için doğrulukla kullanılabilir (Katima and Handley, 1991).

*Katima, Azapagic ve Handley, (1992)* tarafından yapılan deneyler, dolgulu kolonun performansı ve  $\text{NO}_x$  absorpsiyon hızı üzerindeki NaOH konsantrasyonunun etkisini değerlendirmek için yapılmıştır. Absorpsiyon prosesi atmosferik basınçta ve 298 K'de çalışılmıştır. NaOH konsantrasyonları ağırlıkça % 0-19 (w/w) arasında,  $\text{NO}/\text{NO}_2$  oranı 0.5 ve hava karışımındaki  $\text{NO}_x$  konsantrasyonu 150 ve 10000 ppm arasında kullanılmıştır. Kolonun performansı, sudaki absorpsiyona bağlı olarak artan mevcut hidroksil iyonu (NaOH'in % 2'sine kadar) artırılmıştır; bununla birlikte, yüksek konsantrasyonlarda NaOH konsantrasyonundan bağımsız olduğu görülmüştür. NaOH çözeltisinde  $\text{NO}_x$ 'in absorpsiyon hızı sudakine benzetilmiş,  $\text{NO}_x$  bileşenleri ve OH-iyonları arasında doğrudan bir reaksiyon olmadığı önerilmiş ve böylece her iki durumda absorpsiyon prosesi esas taşıyan bileşenlerin hidrolizi ile kontrol edilmiştir.  $\text{NO}_x$  absorpsiyonu sırasında kolon absorpsiyon verimliliği NaOH ve suda, sırasıyla, % 92 ve %87'ye kadar elde edilmiştir (Katima, Azapagic and Handley, 1992).

*Katima, Azapagic ve Handley, (1993)*, azot oksitlerin ( $\text{NO}_x$ ) absorpsiyon hızı ve kolon absorpsiyon verimliliği üzerine sıcaklık ve gaz akış hızının etkisini dolgulu bir kolonda 2M'lık sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi kullanarak çalışmışlardır. Absorpsiyon prosesi 0.8 l/dak. sıvı akış hızı ve  $\text{NO}/\text{NO}_2$  oranı 0.5,  $\text{NO}_x$  konsantrasyonu

150 ve 10000 ppm olan 7.75 cm iç çap ve 0.9 m uzunluktaki bir kolonda yürütülmüştür. Gaz akış hızı 20'den 60 l/dak.'ya ve sıcaklık 15'den 45 °C'ye değiştirilmiş ve gaz akış hızının azalması ile kolon absorpsiyon verimliliğinin arttığı bulunmuştur. Bununla birlikte, ortalama kolon absorpsiyon hızı üzerinde gaz akış hızının değişiminin önemli bir etkisi yoktur. Kolon absorpsiyon verimliliği aynı zamanda 25°C'ye kadar azalan bir sıcaklık ile artar. Sıcaklıktaki daha fazla azalma kolon performansındaki azalmaya neden olur. Herhangi bir NO<sub>x</sub> konsantrasyonunda ortalama absorpsiyon hızı üzerine sıcaklık değişiminin önemli bir etkisi yoktur (Katima, Azapagic and Handley, 1993).



### 4.3. NO<sub>x</sub> Absorplayıcı Dolgulu Kolon Tasarımı

NO<sub>x</sub> gazlarının dolgulu bir kolonda kimyasal olarak absorpsiyonu için tasarıma başlamadan önce dolgulu kolon tasarımı ile ilgili kaynakların incelenmesi yapılmıştır. Bu, inceleme tez konusuna yaklaşımda önemli rol almıştır.

Öncelikle, *Ünal, 1985'in* “Azot monoksit giderici dolgulu bir absorpsiyon kolonunun tasarımı” adlı yüksek lisans tezi ele alınmıştır. Bu tez çalışmasında, yanma olayları sonucu oluşan gazların yalnız hava ve azot monoksit içerdiği varsayımı yapılarak, bu karışımdan azot monoksidin su ile fiziksel olarak giderilmesi için ters akım prensibine göre çalışan dolgulu bir absorpsiyon kolonunun tasarımı yapılmıştır. Bilgisayar tasarımının oluşturulmasında ve çözümünde Brockmeier ve Himmelblau, 1972'den yararlanılmıştır. Bu tezi incelemedeki amaç, gaz taşma hızı için kullanılan Bertetti denkleminin bu tez çalışması için geliştirilen programa uygulanabilmesini, kolon yüksekliği için hangi yöntemlerin nasıl kullanılacağını ve maliyet hesaplamalarının nasıl yapılacağını araştırmaktır. Fiziksel absorpsiyonun olması durumunda ne gibi varsayımlar yapıldığı ve kimyasal absorpsiyondan farklılığı da incelenmiştir.

Ayrıca, *Demir, 1983'ün* “Azot oksitlerin suya soğurulması için bir kademeli kolon tasarımı” adlı tezi incelenmiştir. Bu tez çalışmasının amacı, absorpsiyon kolonuna belli bir akış hızında gönderilen azot oksit gaz karışımından, NO<sub>2</sub>\*'ın % 98'ini su ile % 60'lık HNO<sub>3</sub>'e çevirmek ve azot oksit gazlarını maksimum ölçüde kazanmaktır. Buna göre kolon tasarımı yapılmış ve bu kademeli kolon için yapılan tasarımın bilgisayar programı oluşturulmuştur. Bundan amaç ise kademeli kolondaki adımları dolgulu kolona uyarlamaktır. Kademeli kolondaki diferansiyel birim küçültülerek dolgulu kolon yaklaşımına gidilmiş fakat bundan olumlu sonuç alınamamıştır.

NO<sub>x</sub> gazlarının dolgulu bir kolonda kimyasal olarak absorpsiyonunun tasarımı için *Katima et al., 1991,'nin* “Dolgulu bir kolonda sodyum hidroksit çözeltilerinde azot oksitlerin absorpsiyonunun modellenmesi” adlı çalışma esas alınmıştır.



Kütahya Gübre Fabrikası A.Ş.'den elde edilen gerçek işletme verilerini bu çalışmada önerilen modele uygulamadan önce Çizelge 4.4.'de verilen model parametrelerini ve verilen gaz akış hızını kullanarak, çalışmadaki dolgulu kolon yüksekliğini hesaplayacak bir bilgisayar programı yazılmıştır. Bu programda 10000 ppm gaz girişi,  $NO/NO_2 = 1/2$ , 1.27 cm (çap \* uzunluk) paslanmaz çelik lessing halkaları, 298 K ve atmosfer basıncıta % 90 giderme verimliliği için dolgulu kolon yüksekliği 87.75 cm olarak bulunmuştur. Çalışmadaki model parametrelerin kullanılması ile verilen sonuçlar ile Ek A'daki bilgisayar programından elde edilen sonuçların uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

Çizelge 4. 4. Model parametreleri (Katima et al., 1991)

Parametre	Değer	Birim
$(m\sqrt{kD})_{NO_2}$	0.116	m/s
$(m\sqrt{kD})_{NO}$	2.721	m/s
$k_R$	2.10E-2	m/s
$k_i$	3.75E-5	m/s
$K_1$	6.86	atm <sup>-1</sup>
$K_2$	0.535	atm <sup>-1</sup>
$K_3$	1.01	atm <sup>-1</sup>
$k_i$	2.62E-11	ppm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
$\bar{H}_{NO_2}$	1.2E-2	kmol/m <sup>3</sup> atm
$\bar{H}_{NO}$	1.93E-3	kmol/m <sup>3</sup> atm
a	157	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
$k_{NO_2}$	2.16E7	m <sup>3</sup> /kmols
$D_{NO_2}$	1.5E-9	m <sup>2</sup> /s
$P_{O_2}$	2.1E5	ppm (havadaki O <sub>2</sub> %)
$P_{H_2O}$	2.0E4	ppm (buhar tabloları)

Bilgisayar programının doğrulunu ispatladıktan sonra, NO<sub>x</sub> absorplayıcı kolonun tasarımı için *Kütahya Gübre Fabrikası'ndaki* nitrik asit üretiminin gerçekleştirildiği NO<sub>x</sub> absorpsiyon kolonlarında kullanılan çözücü, çözünen ve inert gaza ait fiziksel ve kimyasal özellikler; sıcaklık, basınç, gaz ve sıvı akış hızı gibi işletme verileri sözkonusu tesis yetkililerinden temin edilerek kullanılmıştır. Böylece atmosfere aşırı miktarda NO<sub>x</sub>

yayarak Kütahya ve çevresinin hava kalitesini olumsuz şekilde etkileyen bu absorpsiyon kolonlarının uygunluğu araştırılmıştır. Bu araştırmada azot oksit gazlarının dolgulu kolonda su ile kimyasal olarak absorpsiyon işlemi ele alınmıştır. Kimyasal reaksiyon adımları ve yapılan varsayımlar aşağıda verilmiştir:

**a) Problemin oluşturulması:**

Kütahya Gübre Fabrikası'nda görevli Nitrik Asit Üretim Mühendisi Ali Sallantı ile kurulan temas sonucu elde edilen gerçek işletme verileri ve bilgiler Şekil 4.6.'da ve aşağıda verilmektedir.

**1) Kullanılan Kolonlar Hakkındaki Bilgiler:**

Kolon sayısı	: 6 adet
Kolon boyutları	: 4700 * 20000 mm
Malzeme	: Paslanmaz sac
Dolgu yüksekliği	: 16000 mm
Çalışma basıncı	: 1 atm
Çalışma sıcaklığı	: 30 °C

**Kolon Dibi Asit Konsantrasyonları:**

1. Kolon	: 56.3 (w/V)
2. Kolon	: 26.7 (w/V)
3. Kolon	: 12.1 (w/V)
4. Kolon	: 6.2 (w/V)
5. Kolon	: 4.2 (w/V)
6. Kolon	: 2.0 (w/V)

**2) Dolgu Maddesi Hakkındaki Bilgiler:**

Dolgu maddesi: Seramik raschig halkası

Özellikleri : 120 \* 120 \* 10 mm



### 3) Akışkan Tipi ve Debileri Hakkındaki Bilgiler:

<u>1. Kolon gaz girişi:</u>		<u>% Bileşim</u>
NO	:164 Nm <sup>3</sup> /h	0.7
NO <sub>2</sub>	: 1476 Nm <sup>3</sup> /h	6.3
O <sub>2</sub>	:1763 Nm <sup>3</sup> /h	7.5
N <sub>2</sub>	: 17574 Nm <sup>3</sup> /h	75
Toplam	: 20977 Nm <sup>3</sup> /h	_____
H <sub>2</sub> O	: 2570 Nm <sup>3</sup> /h	10.5
Sıcaklık	: 50 °C	

### 1. Kolon sıvı çıkışı:

6.9 t/h (% 56 w/V Asit)

<u>6. Kolon gaz çıkışı:</u>		<u>% Bileşim</u>
NO <sub>x</sub>	:2500 ppm $\left\{ \begin{array}{l} 37.53\text{Nm}^3/\text{hNO} \\ 11.21\text{Nm}^3/\text{hNO}_2 \end{array} \right.$	0.193 0.057
O <sub>2</sub>	: 1682 Nm <sup>3</sup> /h	8.626
N <sub>2</sub>	: 17574 Nm <sup>3</sup> /h	90.135
Toplam	: 19256 Nm <sup>3</sup> /h	_____
H <sub>2</sub> O	: 193 Nm <sup>3</sup> /h	0.989
Sıcaklık	: 30 °C	

### 6. Kolon sıvı girişi:

4.3 t/h su

Sıcaklık: 25 °C

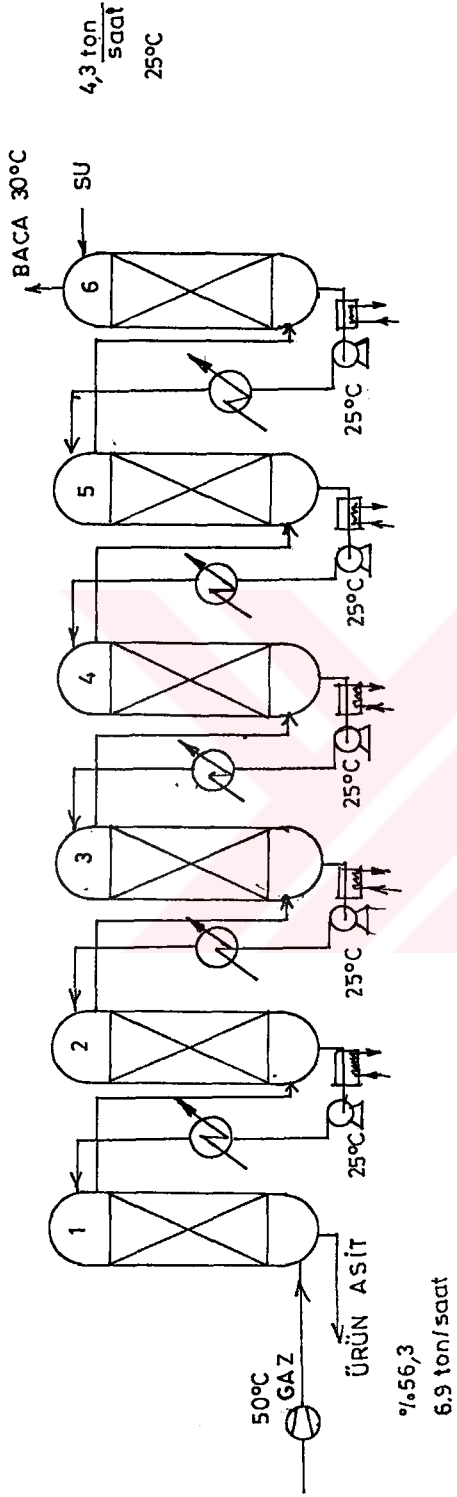
$C_f$  simgesi ile gösterilen doldurma faktörünün değeri, dolgu maddesinin özelliğine ve dolgu çapına bağlı olarak değişmektedir. Raschig halkasının 3 in'lik çapa kadar olan  $C_f$  değeri çizelgelerde mevcuttur (Perry and Chilton, 1973; Treybal, 1981; McCabe and Smith, 1976). 3 in'den büyük raschig halkası için  $C_f$  değeri çizelgedeki değerlerin

kullanılması ile Şekil 4.7.'nin çizimi sonucu ( $C_f=184.031*x^{-1.56686}$ ) elde edilen denklemden bulunabilir. Aynı şekilde, 3 in'den büyük raschig halkası için gerekli  $a_v$ , yüzey alanı değeri de Şekil 4.8.'in çizimi sonucu ( $a_v=55.935*x^{-0.989804}$ ) elde edilen denklemden bulunabilir. x bileşeninin absorpsiyonunda (Eşitlik 4.92) ve Bertetti denkleminde kullanılan değerler Çizelge 4.5.'de görülmektedir.

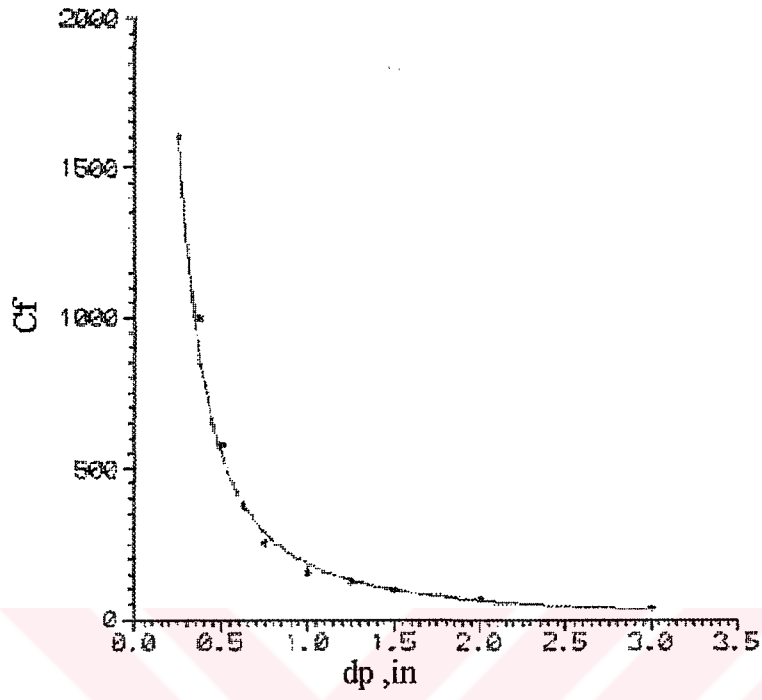
Çizelge 4.5. Dolgulu absorpsiyon kolonu için model parametreleri

Parametre	Değer	Birim	Referans
$(\bar{H}\sqrt{kD})_{N_2O_4}$	5.8E-5	mol/cm <sup>2</sup> s atm	Wendel and Pigford, (1958)
$(\bar{H}\sqrt{kD})_{N_2O_3}$	2.9E-4	mol/cm <sup>2</sup> s atm	Deiss, (1986)
$k_{RNO_2}$	3.024E-4	kmol/m <sup>2</sup> s atm	Kaytakoğlu, (1991)
$k_l$	3.75E-5	m/s	Katima et al., (1991)
$\bar{H}_{NO_2}$	4.04E-2	kmol/m <sup>3</sup> atm	Hoffmann and Emig, (1979)
$\bar{H}_{NO}$	1.93E-3	kmol/m <sup>3</sup> atm	Hoffmann and Emig, (1979)
$a_v$	43	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	Kütahya Gübre Fab. A.Ş.(1994)
$k_{NO_2}$	7.4E+10	cm <sup>3</sup> /gmols	Takeuchi et al., (1977)
$D_{NO_2}$	2.16E-5	cm <sup>2</sup> /s	Wilke and Change, (1955)
$\mu_{H_2O}$	0.9	cp	McCabe and Smith, (1976)
$\rho_{H_2O}$	1.0974 (%18'lik ort. nitrik asit)	gr/cm <sup>3</sup>	Perry and Chilton, (1973)

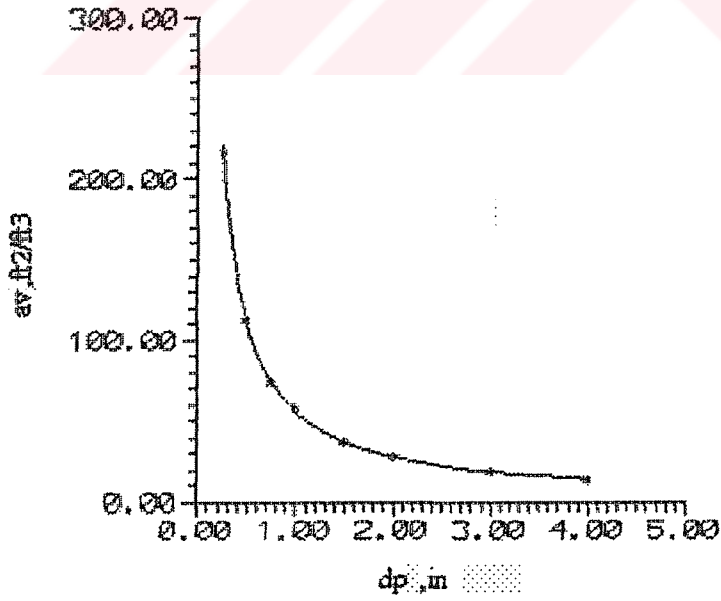
Kolonların içinde herhangi bir soğutma olmayıp kolon diplerinden alınan asit soğutulmakta ve 25 °C'de diğer kolonun üstüne verilmektedir. Tasarımda enerji dengeli kullanılmamış, her üniteden sonra soğutma olduğu için 30 °C çalışma sıcaklığı ve 1 atmosfer çalışma basıncı kullanılmıştır.



Şekil 4.6. Kütahya Gübre Fabrikası A. Ş.'de kullanılan dolgulu absorpsiyon kolonunun şematik gösterimi.



Şekil 4.7. Dolgu çapına (Raschig halkası) karşı doldurma faktörü ( $C_f$ ) değişimi.



Şekil 4.8. Dolgu çapına (Raschig halkası) karşı yüzey alanı ( $a_v$ ) değişimi.

## b) Teori

$\text{NO}_x$  absorpsiyonu sırasında aşağıdaki denge ve reaksiyonlar meydana gelmektedir (Katima et al., 1991):



Aynı zamanda



$\text{NO}_2$  kısmi basıncı, 2000 ppm (0.002 atm)'den büyük olduğu zaman,  $\text{NO}_2$  ve  $\text{N}_2\text{O}_4$  ( $e\text{NO}_2$  olarak ifade ediliyor)'ün denge karışımının sudaki absorpsiyon hızı esas olarak  $\text{N}_2\text{O}_4$ 'ün yalancı birinci mertebeden hidrolizi ile kontrol edilmektedir. Bu yüzden, absorpsiyon hızı  $\text{N}_2\text{O}_4$  kısmi basıncı ile orantılıdır, burada orantı sabiti, absorpsiyon katsayısı ( $\bar{H}\sqrt{kD}$ ) olarak bilinir. Bu değer 0.40 ve 1.60 mol/m<sup>2</sup>s atm (0.0098 ile 0.039 m/s) arasında bulunur. 800 ppm'e kadar düşük  $e\text{NO}_2$  konsantrasyonları için esas transfer olan bileşen olarak  $\text{N}_2\text{O}_4$  rapor edilmiştir. Komiyama and Inoue, 1980, tarafından 300 ve

800 ppm arasında absorpsiyon hızının  $3/2$  kuvveti ile artan  $\text{NO}_2$  konsantrasyonu ile orantılı olduğu rapor edilmiştir.  $c\text{NO}_2$ 'nin absorpsiyon hızını tayin için iki film teorisine dayanan tam bir çözüm önerilmiştir. Bu model,  $\text{NO}_2$  ve  $\text{N}_2\text{O}_4$ 'ün sürekli olarak dengede olduğunu kabul eder ve böylece, bileşenlerin herbirinin çözünmesine, yayınmasına ve bileşenler arasındaki mevcut dengeye göre sıvı filmde hidroliz olan  $\text{N}_2\text{O}_4$ 'ün oluşmasına katkıda bulunur.

Aynı zamanda, suda  $\text{N}_2\text{O}_3$ 'ün absorpsiyonu kendi kısmi basıncı ile orantılıdır ve absorpsiyon katsayısı  $1.59$  ve  $5.0 \text{ mol/m}^2\text{s atm}$  ( $0.0389$  ve  $0.122 \text{ m/s}$ ) arasındadır (Katima ve Handley, 1991).

Çok düşük  $\text{NO}_x$  kısmi basınçlarında, gaz karışımlarındaki  $\text{N}_2\text{O}_4$  ve  $\text{N}_2\text{O}_3$  kısmi basınçları ihmal edilecek kadar küçüktür, öyleki gaz fazı oluşumunun olasılığı ve  $\text{HNO}_2$ 'nin fiziksel absorpsiyonu bağıl olarak önemli olur. Açık olarak,  $\text{NO}_x$  absorpsiyon modelindeki zorluklar gerçekten aşağıda görüldüğü gibi fazladır:

- a) Toplam reaksiyon  $\text{NO}_2^-$  veya  $\text{NO}_2^-$  ve  $\text{NO}_3^-$  iyonlarını gösteren beş farklı bileşenin eşanlı absorpsiyonunu meydana getirir, öyleki basit bir sıvı fazın  $\text{NO}_2^-$  ve  $\text{NO}_3^-$  dengesi, reaksiyon mekanizmasını veya bireysel bileşenlerin fraksiyonel katkısını belirtmek için yeterli değildir.
- b) Çeşitli reaksiyon mekanizmalarının oransal katkısı  $\text{NO}_x$  konsantrasyonu ile ve bundan dolayı kolon yüksekliği ile değişir.
- c)  $\text{NaOH}$ 'da absorpsiyon olduğu zaman tüm reaksiyonlar birbiri ardına ve tersinmez olarak meydana gelir.

Modeli basitleştirmek için, aşağıdaki varsayımlar yapılabilir:

- a) Gösterilen denge reaksiyonları kolon yüksekliği boyunca korunmaktadır.
- b) Her bir bileşen  $\text{NO}_x$  konsantrasyon seviyesinin önemsenmediği absorpsiyon prosesine katılır.
- c) Her bir reaksiyon mekanizmasının fraksiyonel katkısı bileşenlerin denge konsantrasyonunun bir fonksiyonudur.

d) OH iyonlarının bulunması durumunda tersinir reaksiyonlar ihmal edilebilir.

Model asıl olarak,  $N_2O_4$  ve  $N_2O_3$ 'ün hızlı yalancı birinci mertebeden hidrolizi,  $NO_2$ 'nin yalancı ikinci mertebe hidrolizi ve  $HNO_2$ 'nin gaz fazı oluşumunu ve çözünmesini içeren  $NO_x$  absorpsiyon mekanizması bulunmasındaki varsayımına dayanır. Model aynı zamanda,  $NO_2$  ve  $NO$ 'nun fiziksel absorpsiyonunu ve yağın gaz fazındaki  $NO$  ile  $NO_2$ 'nin oksidasyonunu kapsar.

Model,  $NO_x$  bileşenlerinin Hatta sayılarının 8 ile 4200 arasında bir değerde olduğunu ileri sürmektedir. Böylece anlık artma faktörü ( $E_i$ ) 36800'lük bir minimum değere sahiptir. Bunun anlamı, bu çalışmada kapsanan  $NO_x$  konsantrasyonları için tüm reaksiyonlar çok hızlı tepkimeli,  $HNO_2$ 'nin nötralleşmesi hariç, orta hızlı yalancı m. mertebe reaksiyon sistemi ( $1 \ll Ha \ll E_i$ ,  $E=Ha$  durumunda olduğu zaman) şartları altında ele alınır. Aşağıdaki varsayımlar aynı zamanda, mevcut sistem için akla uygun olarak yapılabilir:

- a) Gaz ve sıvı, her biri tıkaç akımdadır.
- b) Gaz ve sıvı kütle transfer katsayıları ve ara yüzey alanı etkisi ile tanımlanan kütle transfer özellikleri kolon boyunca muntazamdır.
- c) Kolon içindeki gaz faz su buharı ile doyurulmuştur.
- d) Diferansiyel birim üzerinde izotermal şartlar etkili olmuştur.
- e) Gaz ideal olarak davranmaktadır.
- f)  $HNO_2$  absorpsiyonunun hariç tutulması ile, gaz film kütle transfer direnci ihmal edilebilir.
- g) Hem gaz fazı hem de sıvı fazındaki eksenel yöndeki yayınma ihmal edilebilir.

Gaz fazındaki önemli  $NO_x$  bileşenleri,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $N_2O_3$ ,  $N_2O_4$  ve  $HNO_2$ 'yi içermektedir. Etkili olan azot dioksit ve azot oksidin kısmi basıncı, bu yüzden, aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$P_{eNO_2} = P_{NO_2} + 2P_{N_2O_4} + P_{N_2O_3} + 1/2P_{HNO_2} \quad (4.81)$$

ve

$$P_{eNO} = P_{NO} + P_{N_2O_3} + 1/2P_{HNO_2} \quad (4.82)$$

Farklı bileşenlerin konsantrasyonunu tam olarak tesbit etmek için yukarıdaki denklıklar kullanılabilir;

$$P_{N_2O_4} = K_1 P_{NO_2}^2 \quad (4.83)$$

$$P_{N_2O_3} = K_2 P_{NO} P_{NO_2} \quad (4.84)$$

$$P_{HNO_2} = \sqrt{K_3 P_{NO} P_{NO_2} P_{H_2O}} \quad (4.85)$$

Şekil 4.9.'da gösterilen kolonun diferansiyel hacmini düşünelim. Absorpsiyon kolonunun bu diferansiyel hacmine karşı  $NO_x$  kütle dengesi aşağıdaki sonucu verir:

$$G (C_{NOX}|_h - C_{NOX}|_{h+\Delta h}) = a \cdot A \cdot R_{NOX} \cdot \Delta h \quad (4.86)$$

$$\lim_{\Delta h \rightarrow 0} \frac{C_{NOX}|_h - C_{NOX}|_{h+\Delta h}}{\Delta h} = \frac{dC_{NOX}}{dh} = \frac{a \cdot A \cdot R_{NOX}}{G} \quad (4.87)$$

$$\frac{dC_{NOX}}{R_{NOX}} = \frac{a \cdot A}{G} \cdot dh \quad (4.88)$$

Burada,

$$R_{NOX} = R_1 + R_2 \quad (4.89)$$

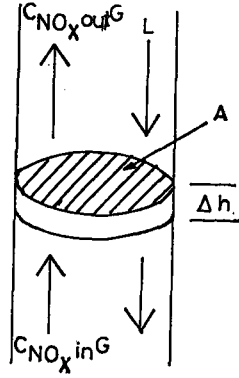
$$R_1 = R_{NO_2} + 2R_{N_2O_4} + R_{N_2O_3} + 1/2R_{HNO_2} + R_{NO_2}^i - R_{NO}^i \quad (4.90)$$

$$R_2 = R_{NO} + R_{N_2O_3} + 1/2R_{HNO_2} + R_{NO}^i \quad (4.91)$$

Kütle transferinin iki film teorisinden yalancı n. mertebeden kimyasal reaksiyonu takip eden x bileşeninin absorpsiyon hızı için genel eşitlik aşağıdaki gibi verilir:

$$R_x = \sqrt{\frac{2}{n+1}} D_x k_x (\bar{H}_x P_x)^{\frac{(n+1)}{2}}, \text{ mol/m}^2\text{s} \quad (4.92)$$





Şekil 4.9. Absorpsiyon kolonun diferansiyel hacmi (Katima and Handley, 1991).

Bu nedenle, paralel proseslere katkıda bulunması için hız ifadeleri aşağıdaki gibidir:

$$R_{N_2O_4} = (\bar{H}\sqrt{kD})_{N_2O_4} P_{N_2O_4} \quad (N_2O_4\text{'ün kimyasal absorpsiyonu}) \quad (4.93)$$

$$R_{N_2O_3} = (\bar{H}\sqrt{kD})_{N_2O_3} P_{N_2O_3} \quad (N_2O_3\text{'ün kimyasal absorpsiyonu}) \quad (4.94)$$

$$R_{NO_2} = \sqrt{\frac{2}{3} K_{NO_2} D_{NO_2} (\bar{H}_{NO_2} P_{NO_2})^{1.5}} \quad (NO_2\text{'nin kimyasal absorpsiyonu}) \quad (4.95)$$

$$R'_{NO_2} = k_1 \bar{H}_{NO_2} P_{NO_2} \quad (NO_2\text{'nin fiziksel absorpsiyonu}) \quad (4.96)$$

$$R_{HNO_2} = k_8 \sqrt{K_3 P_{NO} P_{NO_2} P_{H_2O}} \quad (HNO_2\text{'nin fiziksel absorpsiyonu}) \quad (4.97)$$

$$R_{NO} = k_1 \bar{H}_{NO} P_{NO} \quad (NO\text{'nun fiziksel absorpsiyonu}) \quad (4.98)$$

$$R'_{NO} = k_1 P_{NO}^2 P_{O_2} \quad (NO\text{'nun gaz faz oksidasyonu}) \quad (4.99)$$

Yukarıdaki varsayımlar ve açıklanan denklemler kullanılarak yapılan dolgulu absorpsiyon kolonunun bilgisayar destekli tasarımı Ek Açıklamalar B'de verilmiştir. Bu bilgisayar programında, gaz taşıma hızı için Bertetti denklemi (Brockmier ve Himmelblau, 1972) kullanılmış ve gaz taşıma hızından yararlanarak dolgulu kolon çapı hesaplanmıştır. Dolgulu kolondaki basınç düşüşü için bilgisayar programından hesaplanan X-Y (apsis-ordinat) değerleri yardımıyla taşıma hızı grafiği (Şekil 3.5.) kullanılmış fakat basınç düşüşü değerleri bu şartlarda okunamamıştır. Ayrıca, maliyet hesapları da bilgisayar programında yer almıştır.

## 5. TEORİK BULGULAR

Bu çalışmada,  $\text{NO}_x$  gazlarının dolgulu bir kolonda kimyasal olarak absorpsiyonu için bilgisayar tasarımı yapılmıştır. Tasarımda aşağıda verilen ve Kütahya Gübre Fabrikası A. Ş.'den elde edilen gerçek işletme verileri kullanılmıştır.  $\text{NO}_x$  gazının  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}_4$  ve  $\text{HNO}_2$  bileşenlerinden oluştuğu kabul edilmiştir. Kütle transferinin iki film teorisinden yalancı n. mertebeden kimyasal reaksiyonu için x bileşeninin absorpsiyon hızı Eşitlik 4.92 kullanılarak bulunmuştur. Dolgulu absorpsiyon kolonu üzerinde alınan bir diferansiyel hacim üzerinde kütle denkliği kurulmuş; elde edilen eşitliğin düzenlenmesi sonucu oluşan integral Simpson yöntemi ile çözümlenerek kolon yüksekliği hesaplanmıştır. Tasarımda gaz taşma hızı için Bertetti eşitliği kullanılmış ve gaz taşma hızından yararlanarak dolgulu kolon çapı da hesaplanmıştır. Dolgulu kolondaki basınç düşüşü için taşma hızı grafiği (Şekil 3.5) kullanılmıştır. Hesaplanan X-Y değerleri taşma grafiğinde okunamadığı için basınç düşüşü bulunamamıştır.

Tasarımda  $23547 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 'lik gaz girişi (% 0.7  $\text{NO}$ ; %6.3  $\text{NO}_2$ ) için 4.3 ton/h'lik sıvı akış hızı ve  $19497.74 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 'lik gaz çıkışı (% 0.193  $\text{NO}$ ; % 0.057  $\text{NO}_2$ ) ve 1 atmosfer çalışma basıncı,  $30^\circ\text{C}$  çalışma sıcaklığı ile çalışılmıştır.

Dolgu maddesi olarak  $120*120*10 \text{ mm}$  boyutundaki seramik raschig halkalar kullanılmıştır. Yukarıda verilen işletme verilerine göre, 4.7 m çapındaki kolon için yükseklik,  $\text{KYUK} \cong 16 \text{ m}$  ve gaz taşma hızı kesri, %8 olarak bulunmuştur. Bu değer literatürde (% 30-70) kullanılan gaz taşma kesrine göre oldukça düşüktür. Bu nedenle bu gaz akış hızında dolgulu kolondaki basınç düşüşü ( $X= 8.597\text{E}-3$ ;  $Y=1.249\text{E}-3$ ; Şekil 3.5 kullanılarak) okunamamıştır. Kolon yüksekliği Kütahya asit üretim fabrikasında kullanılan dolgulu absorpsiyon kolonunun boyutu ( $\text{KYUK}= 16000 \text{ mm}$ ) ile uyum içerisindedir. Dolgulu kolon ile ilgili maliyetler ( $\text{TC}= 43303.04 \text{ \$}$ ;  $\text{RC}= 3778332 \text{ \$}$ ;  $\text{BC}= 638.7335 \text{ \$}$ ;  $\text{DC}= 133754.7 \text{ \$}$ ;  $\text{CC}= 0 \text{ \$}$ ;  $\text{TCOST}= 3956028 \text{ \$}$ ) olarak hesaplanmıştır.

Bu gaz giriş hızında gaz taşma hızı kesri değeri ( $\text{FF}= 0.3$ ;  $0.45$ ;  $0.60$ ) değiştirilerek; gaz akış hızı ( $\text{GY}= 1181.789$ ;  $1772.683$ ;  $2363.577 \text{ lb}/\text{ft}^2\text{h}$ ), kolon çapı ( $\text{DIAM}= 7.736$ ;  $6.316$ ;  $5.470 \text{ ft}$ ), maliyet ( $\text{TC}=53494.77 \text{ \$}$ ;  $\text{RC}=1007555 \text{ \$}$ ;

BC=33683.22 \$; DC= 133754.7 \$; CC= 0 \$; TCOST= 1228488 \$); (TC= 58295.43 \$; RC= 671703.4 \$; BC= 113680.8 \$; DC= 133754.7 \$; CC= 0 \$; TCOST= 977434.4 \$); (TC= 62354.17 \$; RC= 503777.5 \$; BC= 269465.8 \$; DC= 3754.7 \$; CC= 0 \$; TCOST= 969352.2 \$)) olarak hesaplanmıştır.

Ayrıca sıvı giriş hızı (3.5 ton/h) için, gaz taşma hızı kesri değeri (FF= 0.3; 0.45; 0.60) değiştirilerek sırasıyla; gaz akış hızı (GY= 714.5487; 1071.823; 1429.097 lb/ft<sup>2</sup>h), kolon çapı (DIAM= 9.9488; 8.1232; 7.0348 ft), maliyet ((TC= 33742.05 \$; RC= 1551387 \$; BC= 14304.74 \$; DC= 118322.6 \$; CC= 0 \$; TCOST= 1717756 \$); (TC= 36281.76 \$; RC= 1034258 \$; BC= 48278.48; DC= 118322.6 \$; CC= 0 \$; TCOST= 1237141 \$); (TC= 38437.71 \$; RC= 775693.4 \$; BC= 114437.9 \$; DC= 118322.6 \$; CC= 0 \$; TCOST= 1046892 \$)) olarak hesaplanmıştır.

Sıvı giriş hızı (5.5 ton/h) için, gaz taşma hızı kesri değeri (FF= 0.3; 0.45; 0.60) değiştirilerek sırasıyla; gaz akış hızı (GY= 906.1362; 1359.204; 1812.272 lb/ft<sup>2</sup>h), kolon çapı (DIAM= 8.83; 7.21; 6.24 ft), maliyet ((TC= 47623.57 \$; RC= 1450091 \$; BC= 24034.5 \$; DC= 156902.8 \$; CC= 0 \$; TCOST= 1678652 \$); (TC= 51543.99 \$; RC= 966727.5 \$; BC= 81116.45 \$; DC= 156902.8 \$; CC= 0 \$; TCOST= 1256291 \$); (TC= 54862.27 \$; RC= 725045.6 \$; BC= 192276.1 \$; DC= 156902.8 \$; CC= 0 \$; TCOST= 1129087 \$)) olarak hesaplanmıştır.

## 6. SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

NO<sub>x</sub> gazlarının dolgulu bir kolonda kimyasal olarak absorpsiyonu için Kütahya Gübre Fabrikası'ndan elde edilen işletme verileri kullanılarak bilgisayar tasarımı sonucu bulunan kolon yüksekliği gerçek kolon yüksekliği ile uyum içerisindedir. İşletmede kullanılan gaz taşıma hızı kesri (FF= 0.08), literatüre göre olması gereken gaz taşıma hızı kesrinden (FF= 0.30-0.70) oldukça düşüktür. Bu gaz taşıma hızı kesri için basınç düşüşü değeri Şekil 3.5'den görüldüğü gibi okunamamıştır.

NO<sub>x</sub> absorplayıcı kolonun tasarımı için Kütahya Gübre Fabrikası'ndaki nitrik asit üretiminin gerçekleştirildiği NO<sub>x</sub> absorpsiyon kolonlarında kullanılan çözücü, çözünen ve inert gaza ait fiziksel ve kimyasal özellikler; sıcaklık, basınç, gaz ve sıvı akış hızı gibi işletme verileri dışındaki diğer veriler literatürden temin edilerek Çizelge 4.5.'de verilmiştir. Dolgulu kolon tasarımında, gaz ve sıvı ortamda kimyasal reaksiyon ve gaz absorpsiyonu işlemleri gözönünde bulundurulmuştur.

NO<sub>x</sub> gazlarının dolgulu kolonda kimyasal olarak absorpsiyonu tasarımında kolon boyunca çalışma sıcaklığı sabit alındığı için enerji denkliği tasarımda kullanılmamıştır.

Bundan sonra yapılacak çalışmalarda enerji denkliği de gözönüne alınarak kolon tasarımı bilgisayar programında yapılabilir. Dolgulu kolonun maliyet hesapları, literatürden temin edilen birim maliyet değerleri kullanılarak hesaplanmış, bu hesaplama sonuçları gerçek işletme maliyetleri temin edilemediği için karşılaştırılamamıştır. Ayrıca, dolgulu absorpsiyon kolonu öncelikle dinamik olarak modellenabilir ardından otomatik kontrolü bilgisayarda yapılabilir.

### KAYNAKLAR DİZİNİ

Baumann, W., Jordan, S., Maetzing, H., Paur, H.-R., Schikarski, W., Wiens, H., 1987, Simultane Rauchgasreinigung durch Elektronenstrahl, Projekt Europäisches Forschungszentrum für Massnahmen zur Luftreinhaltung (PEF), Kernforschungszentrum Karlsruhe, BRD, 318 s.

Bosch, H. and Janssen F., 1988, Catalytic Reduction of Nitrogen Oxide-A Review on the Fundamentals and Technology, Catalysis Today, Vol 2, 372 p.

Çataltaş, İ., 1973, Kimya Mühendisliğine Giriş, İnkılap ve Aka Basımevi, İstanbul, Cilt 2, 888 s.

Cost, W., 1985, Need for a Decision Nitrogen Removal, Primary and Secondary Nitrogen Oxides (NO<sub>x</sub>) Reduction Measures with Regard to Japanese Experiences, Energie, Vol. 37, 54 p.

Counce, R. M. and J. J. Perona, 1983, Scrubbing of Gaseous Nitrogen Oxides in Packed Towers, AIChE J., 29, 26-32.

Counce, R. M., 1977, A Literature Review of Nitrogen Oxide Absorption into Water and Dilute Nitric Acid, Oak Ridge National Laboratory, Energy Research and Development Administration, 26 p.

Counce, R. M. and Selby, G. W., 1988, Aqueous Scrubbing of Dilute Nitrogen Oxide Gas Mixtures, Ind. Eng. Chem. Res., 27, 1917-1922.

Cox, R. A. and Penkett, S. A., 1983, Formation of atmospheric acidity, in: "Acid Deposition" (Beilke S. and Elshout S., Eds.), D. Reidel Publishing Co., Dordrecht, 56 p.

Demir, N., 1983, Azot Oksitleri İçin Soğurma Kolonu Tasarımı, Ankara Üniversitesi Fen Fak. Kimya Müh. Böl., Yüksek Lisans tezi, 46 s.

Deiss, K. H., 1986, Einfluss des Elektrolyt gehaltes auf die Absorption der Stickoxid-Komponenten N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in wässrigen Lösungen, Dissertation, Facultt Für Chemie der Universitt (TH) Karlsruhe, BRD, 175 s.

Döğeroğlu, T., 1988, Azot Oksitlerin Hava Kalitesine Etkileri Uzaklaştırma ve Değerlendirilebilme Seçenekleri, Yüksek lisans tezi, Anadolu Ü. Fen Bil. Enst. Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 212 s.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Düzcesoy, K. and Kara, E., 1992, Azot Oksit Gazları ve Absorpsiyonu için Dolgulu bir Kolon Tasarımı, Bitirme Ödevi, Anadolu Ü. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 68 s.

Erdik, E. ve Sarıkaya, Y., 1985, Temel Üniversite Kimyası, Hacettepe- Taş Kitapçılık Ltd. Şti., Ankara, cilt 2, 1003 s.

Foust, A. S., 1960, Principles of Unit Operations, John Willey and Sons, Inc., New York and London, 578 p.

Gerrard, W., 1980, Gas Solubilities, Pergamon Press, London, 342 p.

Gestrich, W., 1989, Reversible Absorption of Nitric Oxide in Low Volatile Organic Liquids Containing Cupric Halides, Chem. Eng. Technol., Vol. 12, 33-37.

Gözoğul, R. ve Kaytakoğlu, S., 1986, Absorpsiyon ve Termodinamiği, İleri Termodinamik Dersi Projesi, Anadolu Üniv. Müh. Mim. Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 67 s.

Gülbaran, E., 1984, Kimya Mühendisliği Ünit Operasyonları, Akışkanlar Mekaniği, Cilt 1, İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi Ofset Atölyesi, İstanbul, 322 s.

Harrison, B., Diwell, A. F. and Wyatt, M., 1985, Controlling Nitrogen Oxide Emissions from Industrial Sources, Platinum Metals Rev., 29, 50 p.

Hoffmann, U. and Emig, G., 1979, Designing Columns for Absorption of Nitrous Fumes during the Production of Nitric Acid, Ger. Chem. Eng. Vol 2, 282-293.

HKKY, Hava Kalitesini Koruma Yönetmeliği, 2 Kasım 1986, T. C. Resmi Gazete, sayı: 19269, 103-105 s.

Ishimoto, R., and Miyamae, S., 1985, NO<sub>x</sub> Abatement Technologies in IHL, in: "NO<sub>x</sub> Symposion", (Rentz, O., Iszle, F., and Weibel, M., Eds.), Internationale Betriebserfahrungen, paper N, Karlsruhe, FRG.

Kameoka, Y., Pigford, R. L., 1977, Ind. Eng. Chem. Fundam, 16, 163 p.

Kara, S., 1984, Hava Kirliliğini Kontrol Amacı ile Azot Oksitlerin Uzaklaştırılmasında Kullanılabilecek Tekniklerin İncelenmesi ve Karşılaştırılması, TÜBİTAK Proje Raporu I, ÇAĞ 89, Anadolu Üniv. Müh. Mim. Fak. Kimya Müh. Böl., Eskişehir, 28 s.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Kara, S., Kaytakoğlu, S. ve Döğeroğlu, T., 1987, Azot Oksitlerin Oluşturulması, Ölçümü ve Değerlendirilmesi, Uluslararası Çevre '87 Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 5-9 Haziran 1987, İstanbul, 307 s.

Katima, J. H. Y. and Handley, D., 1991, Modelling of Nitrogen Oxides Absorption into Sodium Hydroxide Solution in a Packed Column, Trans IChemE, Vol 69, Part B.

Katima, J. H. Y., Azapagic, A. and Handley, D., 1992, Nitrogen Oxides Absorption into Sodium Hydroxide Solutions in a Packed Column, Trans IChemE, Vol 70, Part B.

Katima, J. H. Y., Azapagic, A. and Handley, D., 1993, Absorption of Nitrogen Oxides into Sodium Hydroxide Solution in a Packed Column, Trans IChemE, Vol 71, Part B.

Kaytakoğlu, S., 1991, Azot Oksitlerin İkili ve Üç Fazlı Sistemlerde Fiziksel ve Kimyasal Yolla Giderilmesi ve Giderme Yöntemlerinin Karşılaştırılması, Doktora Tezi, Anadolu Ü. Fen Bil. Enst. Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 189 s.

Kaytakoğlu, S., Schmitt, R. L., Weisweiler, W., 1989, Stickoxid Sorption an Calciumoxid, Wissenschaftliche Abschluss Berichte 24. Internationales Seminar an der Universitaet Karlsruhe, BRD.

McCabe, W. L., Smith, J. C., Unit Operations of Chemical Engineering, 1976, Third Edition, 4 Section, McGraw-Hill, Kogakusha Ltd. Tokyo, Japan, 1028 p.

Nato, 1973, Air Pollution, Air Quality Criteria for Nitrogen Oxides, Committee on the Challenges of Modern Society (CCMS), No.15, NATO 1110, Brüksel, Belçika, 213 p.

Nato, 1973, Air Pollution, Control Techniques for Nitrogen Oxide Emissions from Stationary Sources, Committee on the Challenges of Modern Society (CCMS), No. 20, NATO 1110, Brüksel, Belçika, 132 p.

Necker, P., 1985, Survey on Measurements to Reduce NO<sub>x</sub> in Europa, in: NO<sub>x</sub> Symposium, (Rentz, O., Iszle, F. and Weibel, M., Eds) Internationale Betriebserfahrungen, paper D, Karlsruhe, FRD.

Öser, P., 1982, Emission Control Systems for Gasoline Engines with Emphasis on Catalyst Concepts, Wolkswagenwerk A. G., Wolfsburg, FRG, 1-14.



### KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Parkinson, G., 1981, NO<sub>x</sub> Controls-Many New Systems Undergo Trials, Chem. Eng., Vol 9, 39 p.

Perry, R. H. and Chilton, C. H., 1973, Chemical Engineers Handbook, McGraw Hill, Kogakusha, Tokyo, Japan.

Sada, E., Kumazawa, H., Hayakawa, N., 1977, Absorption of NO in Aqueous Solution of KMnO<sub>4</sub>, Chemical Engineering Science, Vol 32, 1171 s.

Sada, E., Kumazawa, H., Kudo, I. and Kondo, T., 1980, Individual and Simultaneous Absorption of Dilute NO and SO<sub>2</sub> in Aqueous Slurries of MgSO<sub>3</sub> with Fe(II)-EDTA, Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., 19, 3,377-382.

Sada, E., Kumazawa, H., Tsuboi, N., Kudo, I., Kundo, T., 1978, Absorption of Nitric Oxide in Aqueous Ferrous Sulfate Solution, Ind. Eng. Chem. Pro. Des. Dev., Vol 17, No 3.

Schrod, M., Semel, J. and Steiner, R., 1985 Processes for Lowering NO<sub>x</sub> Emissions in Flue-Gas, Chem. Ing. Tech., 57, 717-727.

Suchak, N.J.Jethani, K.R.and Joshi, J.B., 1991, Modelling and Simulation of NO<sub>x</sub> Absorption in Pilot -Scale Packed Columns, AIChE Journal, Vol 37, No 3, 323-339.

Takeuchi, H., Ando, M., Kizawa, N., 1977, Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev, 16, 303 p.

Treybal, R. E., 1981, Mass Transfer Operations, Third Edition, Mc Graw- Hill International Book Company, Tokyo, Japan, 784 p.

Ünal, P., 1985, Azot Monoksit Giderici Dolgulu Bir Absorpsiyon Kolonunun Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Ü. Fen Bil. Enst. Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 102s.

Wark, K. and Warner, C.F., 1976, Air Pollution Its Origin and Control, Harper Row Pub., 519 p.

Weber, E., 1987, Special Anwenderreport Rauchgasreinigung, VDI-Verlag, Düsseldorf, 12-17.

Wendel, M. M. and Pigford, R. L., 1958, Kinetics of Nitrogen Tetra Oxide Absorption in Water, AIChE, Journal, Vol. 4, No. 3, 249-2.

Wilke, C. R., Chang, P., 1955, AIChE Journal, 1, Nr. 2, 264-270.





EK AÇIKLAMALAR - A

```

10 REM Dolgulu kolon yüksekli9i hesaplamasi
20 DIM Y(100), R(100), R1(100), R2(100), P(100), P1(100)
30 DIM P2(100), P3(100), P4(100), P5(100)
40 Y1 = 0: Y2 = 0
50 INPUT n: LPRINT "n="; n
60 G = .000666: k1 = 6.86: k2 = .535: k3 = 1.01
70 av = 157: R = .082: D = .075: T = 298
80 Psu = .02: LPRINT "Psu="; Psu
90 INPUT n1: LPRINT "n1="; n1
100 INPUT n2: LPRINT "n2="; n2
110 INPUT verim: LPRINT "verim="; verim
120 INPUT cNOXin: LPRINT "cNOXin="; cNOXin
130 c1in = cNOXin / (n1 + n2)
140 c2in = cNOXin - c1in
150 P1(0) = c1in / 1000000!
160 P2(0) = c2in / 1000000!
170 cNOXout = cNOXin - (cNOXin * verim)
180 clout = cNOXout / (n1 + n2)
190 c2out = cNOXout - clout
200 P1(n) = clout / 1000000!
210 P2(n) = c2out / 1000000!
220 dp1 = (P1(0) - P1(n)) / n: LPRINT "dP1="; dp1
230 dp2 = (P2(0) - P2(n)) / n: LPRINT "dP2="; dp2
240 GOSUB 500
250 GOSUB 1000
260 dP = P(0) - P(n): LPRINT "dP="; dP
270 FOR I = 0 TO n STEP 2
280 Y2 = Y2 + Y(I + 2): NEXT I
290 Y2 = Y2 * 2
300 k = n - 1
310 FOR J = 1 TO k STEP 2
320 Y1 = Y1 + Y(J): NEXT J
330 Y1 = Y1 * 4
340 s = Y(0) + Y(n) + Y1 + Y2
350 l = n / 2
360 ss = (dP / (6 * l)) * s
370 a = ss * G
380 aa = (3.1416 * D ^ 2) / 4
390 b = R * T * av * aa
400 Kyuk = (a / b)
410 LPRINT "P1(0)="; P1(0); "P2(0)="; P2(0); "P3(0)="; P3(0)
420 LPRINT "P4(0)="; P4(0); "P5(0)="; P5(0)
430 LPRINT "P1(n)="; P1(n); "P2(n)="; P2(n); "P3(n)="; P3(n)
440 LPRINT "P4(n)="; P4(n); "P5(n)="; P5(n)
450 LPRINT "ss="; ss
460 LPRINT "Kyuk="; Kyuk
470 END
500 '
510 P3(0) = k2 * P1(0) * P2(0)
520 P4(0) = k1 * (P2(0) ^ 2)
540 P5(0) = SQR(k3 * P1(0) * P2(0) * Psu)
550 P(0) = P1(0) + P2(0) + 2 * P3(0) + 2 * P4(0) + P5(0)
560 LPRINT "P(0)="; P(0)
570 P3(n) = k2 * P1(n) * P2(n)
580 P4(n) = k1 * (P2(n) ^ 2)
590 P5(n) = SQR(k3 * P1(n) * P2(n) * Psu)
600 P(n) = P1(n) + P2(n) + 2 * P3(n) + 2 * P4(n) + P5(n)
610 LPRINT "P(n)="; P(n)
620 RETURN
1000 '
1130 R1(0) = 7.2375E-08 * P1(0) + 1.9319E-04 * (P2(0) ^ 1.5) + 2 * (.1113521) * P3(0)
1140 R2(0) = 2 * (.0047471) * P4(0) + .00086 * P5(0) + (4.5E-07) * P2(0)
1150 R(0) = R1(0) + R2(0)
1160 Y(0) = (1 / R(0))
1170 FOR m = 1 TO n
1180 P1(m) = P1(m - 1) - dp1
1190 P2(m) = P2(m - 1) - dp2
1200 P3(m) = k2 * P1(m) * P2(m)

```

```

1210 P4(m) = k1 * (P2(m) ^ 2)
1220 P5(m) = SQR(k3 * P1(m) * P2(m) * Psu)
1230 P(m) = P1(m) + P2(m) + 2 * P3(m) + 2 * P4(m) + P5(m)
1240 R1(m) = 7.2375E-08 * P1(m) + 1.9319E-04 * (P2(m) ^ 1.5) + 2 * (.1113521) * P3(m)
1250 R2(m) = 2 * (.0047471) * P4(m) + .00086 * P5(m) + (4.5E-07) * P2(m)
1260 R(m) = R1(m) + R2(m)
1270 Y(m) = (1 / R(m))
1280 NEXT m
1290 RETURN

```

```

n= 6
Psu= .02
n1= 1
n2= 2
verim= .9
cNOXin= 10000
dP1 .0005
dP2= 9.999999E-04
P(0)= 1.130355E-02
P(n)= 1.073335E-03
dP= 1.023021E-02
P1(0)= 3.333333E-03 P2(0)= 6.666667E-03 P3(0)= 1.188889E-05
P4(0)= 3.048889E-04 P5(0)= 6.699917E-04
P1(n)= 3.333334E-04 P2(n)= 6.666668E-04 P3(n)= 1.188889E-07
P4(n)= 3.048889E-06 P5(n)= 6.699918E-05
ss= 22171.26
Kyuk= .8712071

```

**EK AÇIKLAMALAR - B**

```

10 'Bu program dolgulu bir absorpsiyon kolonunun capini dolgu yüksekligini
20 ' yillik isletme, yatirim ve toplam maliyetler ile mumkun olan
30 ' en ekonomik dolgulu kolon dizaynini yapar.
50 'Dolgulu kolonun alanı ve çapı
60 'FF: Gaz tafma hızı kesri
70 'Glin: Sivi giriş hızı, lb/st
80 'Ggin: Gaz giriş hızı, lb/st
90 'Ggout: Gaz çıkış hızı, lb/st
100 'dP: Dolgu maddesinin çapı, in
110 'CF: Doldurma faktörü
120 'VIS: Suyun viskozitesi, cp
130 'DENS: Çözücünün ortalama yoğunluğu, lb/ft3
140 'DENG: Giren gazın yoğunluğu, lb/ft3
150 'PCOST: Kübik FT bafına doldurma fiyatı ve doldurucu fiyatı, $
160 'DCOST: Zengin sividan çözüneni geri kazanma fiyatı, $/lb
170 'QMG: Giren gazın ortalama molekül ağırlığı, lb/lbmol
180 'QMNOX: Çözünen gazın ortalama molekül ağırlığı, lb/lbmol
190 'CPL: Sivinın isi kapasitesi, Btu/lb°F
200 'TIF: Baflangıç sıcaklığı, °F
210 'TF: Çalıfma sıcaklığı, °F
220 'TI: Baflangıç sıcaklığı, K
230 'T: Çalıfma sıcaklığı, K
240 'PI: Baflangıç basıncı, atm
250 'P: Çalıfma basıncı, atm
260 INPUT Glin: LPRINT "Glin="; Glin
270 INPUT Ggin: LPRINT "Ggin="; Ggin
280 INPUT Ggout: LPRINT "Ggout="; Ggout
290 INPUT dP: LPRINT "dP="; dP
300 INPUT CF: LPRINT "CF="; CF
310 INPUT av: LPRINT "av="; av
320 INPUT FF: LPRINT "FF="; FF
330 READ VIS, DENS, DENG
340 DATA 0.9, 68.507, 0.0668
350 'Kolon etrafında kütle denklisi
360 Glout = Glin + Ggin - Ggout
370 '*****
380 '***** Gaz tafma hızı, BERTETTY DENKLEMİ *****
390 '*****
400 CFF = (CF) ^ .33
410 V = 4.1 * (VIS) ^ .1
420 VS = 4.85 * (VIS) ^ .04
430 GD = (Glout / (Ggin * DENS)) ^ .67
440 DEN = (1 / (DENG * DENS)) ^ .33
450 GYF = (1890 / (CFF * (VS * DEN + V * GD))) ^ 1.5; LPRINT "GYF="; GYF
460 GY = FF * GYF; LPRINT "GY="; GY
470 AREA = Ggin / GY
480 DIAM = SQR(1.27324 * AREA); LPRINT "DIAM="; DIAM; "ft"
490 D = DIAM * .3048; LPRINT "D="; D; "m"
500 '*****
510 '***** simpson yöntemi *****
520 '*****
530 DIM Y(200), R(200), R1(200), RZ(200), P(200), P1(200)
540 DIM P2(200), P3(200), P4(200), P5(200), Psu(200)
550 Y1 = 0: Y2 = 0
560 INPUT n: LPRINT "n="; n
570 klin = 1.097; k2in = .1516; k3in = .414; G = 6.54; T = 303
580 k1 = 4.4862; k2 = .402; k3 = 1.088; R = .082
590 P1(0) = .007; P2(0) = .063; Psu(0) = .105
600 P1(n) = .001925; P2(n) = .000575; Psu(n) = .009898
610 dP1 = (P1(0) - P1(n)) / (n); LPRINT "dP1="; dP1
620 dP2 = (P2(0) - P2(n)) / (n); LPRINT "dP2="; dP2
630 dPsu = (Psu(0) - Psu(n)) / (n); LPRINT "dPsu="; dPsu
640 GOTO 910
660 delP = P(0) - P(n); LPRINT "delP="; delP
670 FOR I = 0 TO n STEP 2
680 Y2 = Y2 + Y(I + 2); NEXT I
690 Y2 = Y2 * 2
700 K = n - 1

```

```

710 FOR J = 1 TO K STEP 2
720 Y1 = Y1 + Y(J): NEXT J
730 Y1 = Y1 * 4
740 s = Y(0) + Y(n) + Y1 + Y2
750 l = n / 2
760 ss = (delP / (6 * l)) * s
770 LPRINT "P1(0)="; P1(0); " P2(0)="; P2(0); "P3(0)="; P3(0)
780 LPRINT "P4(0)="; P4(0); "P5(0)="; P5(0); "Psu(0)="; Psu(0)
790 LPRINT "P1(n)="; P1(n); "P2(n)="; P2(n); "P3(n)="; P3(n)
800 LPRINT "P4(n)="; P4(n); "P5(n)="; P5(n); "Psu(n)="; Psu(n)
810 LPRINT "delP="; delP; "ss="; ss
820 LPRINT "P(0)="; P(0); "P(n)="; P(n)
830 LPRINT "R(0)="; R(0); "R(n)="; R(n)
840 LPRINT "Y(0)="; Y(0); "Y(n)="; Y(n)
850 a = ss * G
860 aa = (3.1416 * D ^ 2) / 4
870 B = R * T * av * aa
880 KYUK = (a / B) / 6: LPRINT "KYUK="; KYUK; "m"
890 HT = KYUK / .3048: LPRINT "HT="; HT; "ft"
892 '*****
893 '***** Dolgulu kolonda basınç düfufü,DP, hesabi *****
894 '*****
895 READ gc, J
896 DATA 4.18E+8, 1.502
897 X = Glout / (GY * AREA) * (DENG / (DENS - DENG)) ^ .5: LPRINT "X="; X
898 Y = ((GY) ^ 2 * CF * VIS ^ .1 * J) / (DENG * (DENS - DENG) * gc): LPRINT "Y="; Y
899 LPRINT "DP, basınç düfufü için (X-Y'ye göre) xekil 3.5 kullanılır"
900 GOTO 1160
910 '
920 P3(0) = k2in * P1(0) * P2(0)
930 P4(0) = klin * (P2(0) ^ 2)
940 P5(0) = SQR(k3in * P1(0) * P2(0) * Psu(0))
950 P(0) = P1(0) + P2(0) + 2 * P3(0) + 2 * P4(0) + P5(0)
960 R1(0) = (7.24E-08) * P1(0) + (1.52E-06) * P2(0) + (.00125) * (P2(0) ^ 1.5)
970 R2(0) = 2 * (.000573) * P4(0) + 2 * (.003) * P3(0) + (.0003024) * P5(0)
980 R(0) = R1(0) + R2(0)
990 Y(0) = (1 / R(0))
1010 '
1020 FOR m = 1 TO n
1030 P1(m) = P1(m - 1) - dP1
1040 P2(m) = P2(m - 1) - dP2
1050 P3(m) = k2 * P1(m) * P2(m)
1060 P4(m) = k1 * (P2(m) ^ 2)
1070 Psu(m) = Psu(m - 1) - dPsu
1080 P5(m) = SQR(k3 * P1(m) * P2(m) * Psu(m))
1090 P(m) = P1(m) + P2(m) + 2 * P3(m) + 2 * P4(m) + P5(m)
1100 R1(m) = (7.24E-08) * P1(m) + (1.52E-06) * P2(m) + (.00125) * (P2(m) ^ 1.5)
1110 R2(m) = 2 * (.000573) * P4(m) + 2 * (.003) * P3(m) + (.0003024) * P5(m)
1120 R(m) = R1(m) + R2(m)
1130 Y(m) = (1 / R(m))
1140 NEXT m
1150 GOTO 660
1160 '*****
1170 '***** Maliyet Hesabi *****
1180 '*****
1190 READ YNOXin, YNOXout, QMNOX, QMG, CPL, TIF, TF, P, PI
1200 DATA 0.07, 2.5E-3, 44.4, 28.398, 1, 122, 86, 1, 1
1210 READ PCOST, DCOST
1220 DATA 17.4, 0.001
1230 TC = 14.4 * DIAM * HT * P + 33 * DIAM + .2 * AREA * HT * PCOST
1240 HP = 1.172E-05 * (GY / 100) ^ 3 * CF * HT * AREA / (100 * DENG) ^ 2
1250 BC = 528 * HP
1260 DC = Glout * 8750 * DCOST
1270 CC = -366 * PI * (Ggin * QMG) * ((PI / P) ^ .23 - 1)
1280 GXAV = .5 * (Glin + Glout)
1290 GYAV = .5 * (Ggin + Ggout)
1300 RX = .0233 * GXAV * AREA * CPL * (TIF - TF)

```

```

1310 RY = .00583 * GYAV * AREA * (TIF - TF)
1320 RW = .0233 * Ggin * (YNOXin - YNOXout) * QMNOX * HVAP / QMG
1330 RC = RX + RY + RW
1340 TCOST = TC + BC + DC + CC + RC
1350 LPRINT "TC="; TC
1360 LPRINT "RC="; RC
1370 LPRINT "BC="; BC
1380 LPRINT "DC="; DC
1390 LPRINT "CC="; CC
1400 LPRINT "TCOST="; TCOST
1410 END

```

```

Glin= 9479.72
Ggin= 55547.83
Ggout= 49741.3
dP= 4.72
CF= 16.17
av= 43
FF= .08
GYF= 3939.295
GY= 315.1436
DIAM= 14.98078 ft
D= 4.566142 m
n= 6
delP= 8.060705E-02
P1(0)= .007 P2(0)= .063 P3(0)= 6.68556E-05
P4(0)= 4.353993E-03 P5(0)= 4.378387E-03 Psu(0)= .105
P1(n)= .001925 p2(n)= 5.750041E-04 P3(n)= 4.44967E-07
P4(n)= 1.483271E-06 P5(n)= 1.091789E-04 Psu(n)= 9.897988E-03
delP= 8.060705E-02 ss= 252592.3
P(0)= 8.322009E-02 P(n)= 2.61304E-03
KYUK= 15.73736 m
HT= 51.63177 ft
X= 8.59828E-03
Y= 1.248985E-03
DP, basınç düfufü için (X-Y'ye göre) xekil 3.5 kullanilir
TC= 43303.04
RC= 3778332
BC= 638.7335
DC= 133754.7
CC= 0
TCOST= 3956028

```

Glin= 9479.72  
 Ggin= 55547.83  
 Ggout= 49741.3  
 dP= 4.72  
 CF= 16.17  
 av= 43  
 FF= .3  
 GYF= 3939.295  
 GY= 1181.789  
 DIAM= 7.736041 ft  
 D= 2.357945 m  
 n= 6  
 delP= 8.060705E-02  
 P1(0)= .007 P2(0)= .063 P3(0)= 6.68556E-05  
 P4(0)= 4.353993E-03 P5(0)= 4.378387E-03 Psu(0)= .105  
 P1(n)= .001925 p2(n)= 5.750041E-04 P3(n)= 4.44967E-07  
 P4(n)= 1.483271E-06 P5(n)= 1.091789E-04 Psu(n)= 9.897988E-03  
 delP= 8.060705E-02 ss= 252592.3  
 P(0)= 8.322009E-02 P(n)= 2.61304E-03  
 KYUK= 59.01513 m  
 HT= 193.6192 ft  
 X= 2.292875E-03  
 Y= 1.756385E-02  
 DP, basınç düfufü için (X-Y'ye göre) xekil 3.5 kullanilir  
 TC= 53494.77  
 RC= 1007555  
 BC= 33683.22  
 DC= 133754.7  
 CC= 0  
 TCOST= 1228488

Glin= 9479.72  
 Ggin= 55547.83  
 Ggout= 49741.3  
 dP= 4.72  
 CF= 16.17  
 av= 43  
 FF= .45  
 GYF= 3939.295  
 GY= 1772.683  
 DIAM= 6.316452 ft  
 D= 1.925255 m  
 n= 6  
 delP= 8.060705E-02  
 P1(0)= .007 P2(0)= .063 P3(0)= 6.68556E-05  
 P4(0)= 4.353993E-03 P5(0)= 4.378387E-03 Psu(0)= .105  
 P1(n)= .001925 p2(n)= 5.750041E-04 P3(n)= 4.44967E-07  
 P4(n)= 1.483271E-06 P5(n)= 1.091789E-04 Psu(n)= 9.897988E-03  
 delP= 8.060705E-02 ss= 252592.3  
 P(0)= 8.322009E-02 P(n)= 2.61304E-03  
 KYUK= 88.52267 m  
 HT= 290.4287 ft  
 X= 1.528583E-03  
 Y= 3.951865E-02  
 DP, basınç düfufü için (X-Y'ye göre) xekil 3.5 kullanilir  
 TC= 58295.43  
 RC= 671703.4  
 BC= 113680.8  
 DC= 133754.7  
 CC= 0  
 TCOST= 977434.4



Glin= 9479.72  
 Ggin= 55547.83  
 Ggout= 49741.3  
 dP= 4.72  
 CF= 16.17  
 av= 43  
 FF= .6  
 GYF= 3939.295  
 GY= 2363.577  
 DIAM= 5.470207 ft  
 D= 1.667319 m  
 n= 6  
 delP= 8.060705E-02  
 P1(0)= .007 P2(0)= .063 P3(0)= 6.68556E-05  
 P4(0)= 4.353993E-03 P5(0)= 4.378387E-03 Psu(0)= .105  
 P1(n)= .001925 p2(n)= 5.750041E-04 P3(n)= 4.44967E-07  
 P4(n)= 1.483271E-06 P5(n)= 1.091789E-04 Psu(n)= 9.897988E-03  
 delP= 8.060705E-02 ss= 252592.3  
 P(0)= 8.322009E-02 P(n)= 2.61304E-03  
 KYUK= 118.0303 m  
 HT= 387.2384 ft  
 X= 1.146437E-03  
 Y= 7.025541E-02  
 DP, basınç düfufü için (X-Y'ye göre) xekil 3.5 kullanilir  
 TC= 62354.17  
 RC= 503777.5  
 BC= 269465.8  
 DC= 133754.7  
 CC= 0  
 TCOST= 969352.2

Glin= 7716.05  
 Ggin= 55547.83  
 Ggout= 49741.3  
 dP= 3  
 CF= 45.04  
 av= 62.34  
 FF= .3  
 GYF= 2381.829  
 GY= 714.5487  
 DIAM= 9.948847 ft  
 D= 3.032408 m  
 n= 6  
 delP= 8.060705E-02  
 P1(0)= .007 P2(0)= .063 P3(0)= 6.68556E-05  
 P4(0)= 4.353993E-03 P5(0)= 4.378387E-03 Psu(0)= .105  
 P1(n)= .001925 p2(n)= 5.750041E-04 P3(n)= 4.44967E-07  
 P4(n)= 1.483271E-06 P5(n)= 1.091789E-04 Psu(n)= 9.897988E-03  
 delP= 8.060705E-02 ss= 252592.3  
 P(0)= 8.322009E-02 P(n)= 2.61304E-03  
 KYUK= 24.61258 m  
 HT= 80.74992 ft  
 X= 3.354647E-03  
 Y= 1.788514E-02  
 DP, basınç düfufü için (X-Y'ye göre) xekil 3.5 kullanilir  
 TC= 33742.05  
 RC= 1551387  
 BC= 14304.74  
 DC= 118322.6  
 CC= 0  
 TCOST= 1717756

Glin= 7716.05  
 Ggin= 55547.83  
 Ggout= 49741.3  
 dP= 3  
 CF= 45.04  
 av= 62.34  
 FF= .45  
 GYF= 2381.829  
 GY= 1071.823  
 DIAM= 8.123199 ft  
 D= 2.475951 m  
 n= 6  
 delP= 8.060705E-02  
 P1(0)= .007 P2(0)= .063 P3(0)= 6.68556E-05  
 P4(0)= 4.353993E-03 P5(0)= 4.378387E-03 Psu(0)= .105  
 P1(n)= .001925 p2(n)= 5.750041E-04 P3(n)= 4.44967E-07  
 P4(n)= 1.483271E-06 P5(n)= 1.091789E-04 Psu(n)= 9.897988E-03  
 delP= 8.060705E-02 ss= 252592.3  
 P(0)= 8.322009E-02 P(n)= 2.61304E-03  
 KYUK= 36.91886 m  
 HT= 121.1249 ft  
 X= 2.236431E-03  
 Y= 4.024155E-02  
 DP, basınç düfufü için (X-Y'ye göre) xekil 3.5 kullanilir  
 TC= 36281.76  
 RC= 1034258  
 BC= 48278.48  
 DC= 118322.6  
 CC= 0  
 TCOST= 1237141

Glin= 7716.05  
 Ggin= 55547.83  
 Ggout= 49741.3  
 dP= 3  
 CF= 45.04  
 av= 62.34  
 FF= .6  
 GYF= 2381.829  
 GY= 1429.097  
 DIAM= 7.034897 ft  
 D= 2.144237 m  
 n= 6  
 delP= 8.060705E-02  
 P1(0)= .007 P2(0)= .063 P3(0)= 6.68556E-05  
 P4(0)= 4.353993E-03 P5(0)= 4.378387E-03 Psu(0)= .105  
 P1(n)= .001925 p2(n)= 5.750041E-04 P3(n)= 4.44967E-07  
 P4(n)= 1.483271E-06 P5(n)= 1.091789E-04 Psu(n)= 9.897988E-03  
 delP= 8.060705E-02 ss= 252592.3  
 P(0)= 8.322009E-02 P(n)= 2.61304E-03  
 KYUK= 49.22514 m  
 HT= 161.4998 ft  
 X= 1.677324E-03  
 Y= 7.154054E-02  
 DP, basınç düfufü için (X-Y'ye göre) xekil 3.5 kullanilir  
 TC= 38437.71  
 RC= 775693.4  
 BC= 114437.9  
 DC= 118322.6  
 CC= 0  
 TCOST= 1046892

Glin= 12125.22  
 Ggin= 55547.83  
 Ggout= 49741.3  
 dP= 4  
 CF= 27.34  
 av= 45.93  
 FF= .3  
 GYF= 3020.454  
 GY= 906.1362  
 DIAM= 8.834702 ft  
 D= 2.692817 m  
 n= 6  
 delP= 8.060705E-02  
 P1(0)= .007 P2(0)= .063 P3(0)= 6.68556E-05  
 P4(0)= 4.353993E-03 P5(0)= 4.378387E-03 Psu(0)= .105  
 P1(n)= .001925 p2(n)= 5.750041E-04 P3(n)= 4.44967E-07  
 P4(n)= 1.483271E-06 P5(n)= 1.091789E-04 Psu(n)= 9.897988E-03  
 delP= 8.060705E-02 ss= 252592.3  
 P(0)= 8.322009E-02 P(n)= 2.61304E-03  
 KYUK= 42.36322 m  
 HT= 138.987 ft  
 X= 3.507909E-03  
 Y= 1.745885E-02  
 DP, basınç düfufü için (X-Y'ye göre) xekil 3.5 kullanilir  
 TC= 47623.57  
 RC= 1450091  
 BC= 24034.5  
 DC= 156902.8  
 CC= 0  
 TCOST= 1678652

Glin= 12125.22  
 Ggin= 55547.83  
 Ggout= 49741.3  
 dP= 4  
 CF= 27.34  
 av= 45.93  
 FF= .45  
 GYF= 3020.454  
 GY= 1359.204  
 DIAM= 7.213505 ft  
 D= 2.198676 m  
 n= 6  
 delP= 8.060705E-02  
 P1(0)= .007 P2(0)= .063 P3(0)= 6.68556E-05  
 P4(0)= 4.353993E-03 P5(0)= 4.378387E-03 Psu(0)= .105  
 P1(n)= .001925 p2(n)= 5.750041E-04 P3(n)= 4.44967E-07  
 P4(n)= 1.483271E-06 P5(n)= 1.091789E-04 Psu(n)= 9.897988E-03  
 delP= 8.060705E-02 ss= 252592.3  
 P(0)= 8.322009E-02 P(n)= 2.61304E-03  
 KYUK= 63.54483 m  
 HT= 208.4804 ft  
 X= 2.338606E-03  
 Y= 3.928241E-02  
 DP, basınç düfufü için (X-Y'ye göre) xekil 3.5 kullanilir  
 TC= 51543.99  
 RC= 966727.5  
 BC= 81116.45  
 DC= 156902.8  
 CC= 0  
 TCOST= 1256291

Glin= 12125.22  
Ggin= 55547.83  
Ggout= 49741.3  
dP= 4  
CF= 27.34  
av= 45.93  
FF= .6  
GYF= 3020.454  
GY= 1812.272  
DIAM= 6.247078 ft  
D= 1.904109 m  
n= 6  
delP= 8.060705E-02  
P1(0)= .007 P2(0)= .063 P3(0)= 6.68556E-05  
P4(0)= 4.353993E-03 P5(0)= 4.378387E-03 Psu(0)= .105  
P1(n)= .001925 p2(n)= 5.750041E-04 P3(n)= 4.44967E-07  
P4(n)= 1.483271E-06 P5(n)= 1.091789E-04 Psu(n)= 9.897988E-03  
delP= 8.060705E-02 ss= 252592.3  
P(0)= 8.322009E-02 P(n)= 2.61304E-03  
KYUK= 84.72646 m  
HT= 277.974 ft  
X= 1.753955E-03  
Y= 6.983539E-02  
DP, basınç düfufü için (X-Y'ye göre) xekil 3.5 kullanilir  
TC= 54862.27  
RC= 725045.6  
BC= 192276.1  
DC= 156902.8  
CC= 0  
TCOST= 1129087

İNŞAAT  
KURUMU  
MİMARLIK